SPF Economie, PME, Classes
Moyennes & Energie
Office de la Propriété intellectuelle

(11) 1029832 B1

(47) Date de délivrance : 08/05/2023

(12) BREVET D'INVENTION BELGE

(47) Date de publication : 08/05/2023

(21) Numéro de demande : BE2021/5787

(22) Date de dépôt : 08/10/2021

(62) Divisé de la demande de base :

(62) Date de dépôt demande de base :

(51) Classification internationale : G04F 5/14, H01S 1/06, H03L 7/26

(30) Données de priorité :

(73) Titulaire(s) :

UNIVERSITE DE LIEGE
Etablissement public
4000, LIEGE
Belgique

(72) Inventeur(s) :

BASTIN Thierry
4102 OUGREE
Belgique

VAN DER BEKEN Emeline
4000 LIEGE
Belgique

(54) PROCÉDÉ POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UNE CAVITÉ MAGNÉTRON POUR HORLOGE ATOMIQUE

(57)Procédé assisté par ordinateur pour le dimensionnement d'une cavité magnétron pour horloge atomique, en particulier pour un maser à hydrogène, la cavité étant sensiblement cylindrique et incluant au moins deux électrodes incurvées disposées le long d'un arc de cercle et délimitant un espace sensiblement cylindrique de rayon prédéterminé r, la cavité incluant également un ballon de stockage sensiblement cylindrique de rayon rB disposé dans ledit espace tel qu'il existe un interstice radial ei entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage.

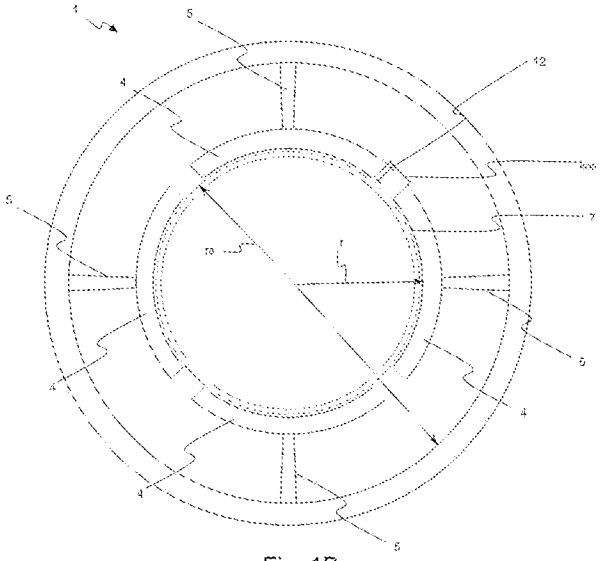


Fig. 1B

PROCÉDÉ POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UNE CAVITÉ MAGNÉTRON POUR HORLOGE ATOMIQUE

Domaine technique de l'invention

[01] La présente invention se rapporte au domaine des cavités magnétron pour horloges atomiques, en particulier pour horloges atomiques de type maser à hydrogène.

Etat de la technique

[02] Il est connu d'utiliser des masers à hydrogène comme horloges atomiques. Parmi les normes de fréquence actuelles, le maser à hydrogène a la meilleure stabilité à court terme et est donc utilisé dans de nombreuses applications comme par exemple la synchronisation des radiotélescopes utilisés pour l'interférométrie à très longues bases. Ce type d'horloge atomique comprend généralement une cavité électromagnétique au centre de laquelle est situé un ballon de stockage. Des atomes d'hydrogène sont confinés dans ledit ballon afin d'induire l'émission stimulée à 1420.405MHz entre les deux niveaux hyperfins F = 0 et F = 1 de l'état fondamental 1s1/2 de l'atome d'hydrogène.

[03] Cependant, les masers à hydrogène de taille standard sont volumineux et lourds, ce qui pose problème pour, en particulier, les applications spatiales, par exemple dans le contexte d'un système de positionnement global, pour lesquelles la conception de modèles compacts est d'une importance primordiale. Il est connu que les dimensions de la cavité dictent les dimensions des différents éléments qui l'entourent, essentiellement une cloche à vide, un solénoïde et des boucliers thermiques et magnétiques. Par conséquent, la seule façon d'obtenir un design de maser plus petit est de réduire la taille de la cavité.

[04] Dans le document US4,123,727, H. Peters a montré la possibilité d'une horloge atomique de taille réduite en diminuant la taille de la cavité cylindrique grâce à une structure d'électrodes qui modifient les lignes de champ électrique au sein de ce

cylindre et ainsi permettent de modifier la fréquence de résonance. Typiquement, dans cette conception, la cavité consiste en un cylindre métallique extérieur fermé entourant un cylindre intérieur ouvert à quatre fentes, les quatre éléments du cylindre intérieur étant appelés électrodes. L'ensemble est en une seule pièce et le ballon de stockage est placé au sein du cylindre intérieur formé par les électrodes. Si ce principe de cavité de type magnétron est bien connu, l'incidence des paramètres géométriques de cette cavité sur les propriétés métrologiques de l'horloge reste méconnue.

[05] Il est connu également qu'un coefficient important pour le fonctionnement correct de telles horloges atomiques est le coefficient dit de fréquence-température (FTC), c'est-à-dire le coefficient indiquant la variation de la fréquence de résonance de la cavité par unité de variation de température de la cavité. Le FTC de la cavité affecte directement la stabilité globale de l'horloge atomique. Plus ce coefficient est bas en valeur absolue, plus le système est stable. Les cavités maser de taille standard ont typiquement des valeurs de FTC de l'ordre de 30 $kHz°C^{-1}$ en valeur absolue pour des dimensions de la cavité de l'ordre d'environ 27 cm à la fois en hauteur et en diamètre.

[06] Dans le document CN103515171, Chen et al. suggèrent des cavités magnétron avec un FTC plus faible via l'utilisation de différents matériaux métalliques pour les éléments à l'intérieur de la cavité du magnétron. Des valeurs FTC aussi basses que 2,5 $kHz°C^{-1}$ ont été prédites. Néanmoins, la méthode de prédiction du FTC proposée par Chen et al. présente plusieurs inconvénients. Premièrement, la prédictibilité se révèle insuffisante, les résultats expérimentaux n'étant pas toujours suffisamment proches des résultats théoriques. Deuxièmement, la prédictibilité n'est pas possible en présence du ballon de stockage au sein de la cavité magnétron. Troisièmement, la conception d'une cavité multi-matériaux n'est pas pratique d'un point de vue usinage. Elle engendre une augmentation du temps et des coûts de production.

[07] La présente invention vise donc à répondre au moins partiellement à un ou plusieurs inconvénients mentionnés ci-dessus. En particulier, l'objectif de l'invention est de fournir une méthode de dimensionnement d'une cavité magnétron pour horloge atomique, en particulier pour un maser à hydrogène, qui permet la fabrication d'une cavité magnétron de taille réduite avec une stabilité prévisible et optimisée.

Résumé de l' invention

[08] A cet effet, un premier aspect de la présente invention vise un procédé assisté par ordinateur pour le dimensionnement d'une cavité magnétron pour horloge atomique, en particulier pour un maser à hydrogène, le procédé étant caractérisé par les éléments cités dans la revendication 1. En particulier, la cavité magnétron est sensiblement cylindrique et inclut au moins deux électrodes incurvées disposées le long d'un arc de cercle délimitant un espace sensiblement cylindrique de rayon prédéterminé r. Par électrode, on entend une pièce métallique qui est configurée à modifier les lignes de champ électrique au sein de cet espace sensiblement cylindrique permettant ainsi de modifier la fréquence de résonance de la cavité magnétron. La cavité inclut également un ballon de stockage sensiblement cylindrique de rayon r_B disposé dans ledit espace tel qu'il existe un interstice radial e_i entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage. Cet interstice radial e_i est donc égal à $r - r_B$, étant le rayon de l'espace sensiblement cylindrique moins le rayon du ballon de stockage sensiblement cylindrique.

[09] Le procédé de dimensionnement assisté par ordinateur comprend l'étape A d'obtention d'un jeu de paramètres géométriques de la cavité comprenant une valeur initiale dudit interstice radial e_i, tel que la fréquence de résonance ν_c de la cavité à une température de référence est la fréquence de résonance requise, en particulier 1420.405MHz +/- 1 MHz, à ladite température de référence. Ces paramètres géométriques de cavité, comme par exemple une hauteur et/ou un rayon de la cavité sensiblement cylindrique, peuvent d'une part être imposés par des facteurs extérieurs, comme par exemple par le type d'application, par exemple dans le cas d'une horloge atomique pour un satellite. D'autre part, d'autres paramètres géométriques peuvent être variés. Les paramètres imposés sont introduits dans un programme d'ordinateur configuré à déterminer, à l'aide des équations de Maxwell, la fréquence de résonance de la cavité, aussi appelée la fréquence propre de la cavité, pour un ensemble de paramètres géométriques et une température de référence. Cette étape permet d'obtenir un jeu de paramètres géométriques de la cavité qui fournit la fréquence de résonance requise à une température de référence, par exemple la température ambiante.

[10] Puis, le procédé de dimensionnement assisté par ordinateur comprend l'étape B de la détermination d'une déformation géométrique potentielle de la cavité et détermination de la fréquence de résonance associée à ladite déformation potentielle et cela pour une pluralité de températures de fonctionnement de l'horloge. Cette déformation est due à la dilatation thermique des matériaux. La déformation comprend la déformation de la géométrie de la cavité, des au moins deux électrodes et du ballon de stockage et se base sur les coefficients d'expansion thermique connus des matériaux utilisés qui sont introduits dans un programme d'ordinateur destiné à déterminer cette déformation géométrique potentielle de la cavité et la fréquence de résonance associée. La détermination de la fréquence de résonance associée à ladite déformation géométrique potentielle peut par exemple se faire à l'aide du même programme d'ordinateur qu'à la première étape en partant des géométries déformées.

[11] Le procédé de dimensionnement assisté par ordinateur comprend ensuite l'étape C de détermination du coefficient fréquence - température (FTC) correspondant à la variation de la fréquence de résonance par rapport à ladite pluralité de températures de fonctionnement, en particulier par la formule FTC = $\partial\ \nu_c\ /\ \partial$ T. Ces deux dernières étapes, en particulier l'étape B de la détermination d'une déformation géométrique potentielle de la cavité et la détermination de la fréquence de résonance associée à ladite déformation potentielle et cela pour une pluralité de températures de fonctionnement de l'horloge et l'étape C de détermination du coefficient fréquence - température (FTC) sont alors répétées pour une pluralité de valeurs dudit interstice e_i en gardant les mêmes paramètres géométriques tels que déterminés à la première étape pour autant que la fréquence de résonance ν_c de la cavité soit la fréquence de résonance requise, en particulier 1420.405 MHz +/- 1 MHz. Cette étape D permet d'obtenir une pluralité de valeurs FTC en fonction dudit interstice e_i. Finalement, le procédé comprend l'étape E de la détermination de l'interstice radial e_i correspondant au coefficient fréquence - température (FTC) souhaité.

[12] Contrairement à l'art antérieur, ce procédé assisté par ordinateur permet le dimensionnement d'une cavité magnétron pour horloge atomique ayant un coefficient FTC contrôlable et prévisible. Il devient donc possible d'obtenir des cavités magnétron ayant un FTC relativement bas, par exemple à une valeur comprise entre 0 et 60

kHz°C^{-1}, de préférence entre 0 et 30 kHz°C^{-1}, de préférence entre 0 et 20 kHz°C^{-1}. La précision du FTC est seulement limitée par la précision avec laquelle la cavité, les au moins deux électrodes, et le ballon de stockage peuvent être usinés. Ce procédé permet donc de manière avantageuse d'optimiser la stabilité d'une horloge atomique tout en gardant un contrôle sur la fréquence de résonance de la cavité magnétron. De plus, ce procédé permet d'éviter de modifier les matériaux utilisés pour la cavité magnétron, le ballon et/ou les électrodes, ou de combiner plusieurs matériaux en vue de réduire le FTC, comme cela a été proposé dans l'art antérieur.

[13] La pluralité de valeurs dudit interstice radial e_i peut de préférence être choisie entre 0 et 3 mm, de préférence entre 0.1 mm et 2 mm, de préférence entre 0.2 et 1.2 mm. En dimensionnant une cavité magnétron de cette manière, un coefficient fréquence – température prévisible et relativement bas peut être obtenu. Il est d'ailleurs préféré d'exclure la valeur 0, correspondant à un ballon de stockage placé contre les au moins deux électrodes, car cette configuration donne un coefficient fréquence – température très élevé.

[14] Il est préférable que le coefficient fréquence – température (FTC) souhaité soit de l'ordre d'environ 20 kHz°C^{-1} en valeur absolue ou moins. Un tel coefficient peut garantir une stabilité relativement grande à la cavité magnétron et donc à l'horloge atomique. En même temps, le procédé permet également de dimensionner une cavité magnétron tel qu'elle ait un FTC plus grand, si souhaité.

[15] De manière avantageuse, ladite pluralité de températures de fonctionnement de l'horloge peut comprendre des températures entre environ 5°C et 70°C, de préférence entre 10° C et 60°C. Cette pluralité de températures peut par exemple inclure la gamme de température d'utilisation de l'horloge atomique. En fonction de la précision souhaitée, la répétition des étapes du procédé peut se faire pour des pas de température de par exemple 5°C ou de 1°C ou encore de 10°C ou pour tout autre pas de température approprié.

[16] Le jeu de paramètres géométriques de la cavité peut par exemple comprendre le rayon de la cavité sensiblement cylindrique, la hauteur de ladite cavité sensiblement cylindrique, la hauteur et l'épaisseur des au moins deux électrodes incurvées, le rayon

de l'espace sensiblement cylindrique délimité par lesdits au moins deux électrodes, la hauteur et le rayon dudit ballon de stockage. Ce jeu de paramètres peut en partie être imposé par des contraintes extérieures comme par exemple par l'utilisation de la cavité magnétron. Les contraintes imposées par une utilisation d'un maser à hydrogène dans un satellite peuvent par exemple être différentes d'une utilisation sur Terre.

[17] La première étape, c'est-à-dire l'étape d'obtention d'un jeu de paramètres géométriques de la cavité, comprend une détermination de la distance circonférentielle entre deux électrodes adjacentes des au moins deux électrodes incurvées tel que la fréquence de résonance ν_c de la cavité à une température de référence est la fréquence de résonance requise, en particulier 1420.405 MHz +/- 1 MHz, à ladite température de référence. Même si la fréquence de résonance ν_c d'une cavité magnétron dépend de l'ensemble des paramètres géométriques de la cavité magnétron, il s'est avéré possible d'ajuster cette distance circonférentielle entre deux électrodes adjacentes en gardant les autres paramètres géométriques fixés afin de permettre d'obtenir la fréquence de résonance requise. Comme cette distance circonférentielle entre deux électrodes adjacentes n'est pas imposée par des contraintes extérieures, cette détermination de la distance circonférentielle entre deux électrodes adjacentes permet d'obtenir une fréquence de résonance de la cavité magnétron requise en respectant un maximum de contraintes géométriques imposées. Il est également préférable d'inclure cette étape de détermination de la distance circonférentielle entre deux électrodes adjacentes dans l'étape D) du procédé, c'est-à-dire dans le but de redéterminer cette distance circonférentielle pour chaque interstice e_i modifié.

[18] L'étape B) du procédé assisté par ordinateur, en particulier la détermination d'une déformation géométrique potentielle de la cavité et détermination de la fréquence de résonance associée à ladite déformation pour une pluralité de températures de fonctionnement de l'horloge, peut comprendre l'utilisation d'une méthode d'éléments finis, par exemple par un programme de modélisation par éléments finis. Cette méthode peut permettre une modélisation d'une structure complexe, d'épouser la géométrie que l'on modélise, sans perdre de vue l'influence des effets locaux.

[19] De manière avantageuse, l'étape C) du procédé assisté par ordinateur, en particulier la détermination du coefficient fréquence – température, peut comprendre une régression linéaire. Cette régression linéaire peut par exemple s'effectuer par la méthode des moindres carrés réalisée avec les résultats de fréquence pour chaque température. En particulier, cette étape peut s'effectuer de façon graphique en reportant les variations de la fréquence de résonance en fonction de la température dans un graphique.

[20] Un deuxième aspect de l'invention vise un procédé de fabrication d'une cavité magnétron pour horloge atomique, en particulier pour un maser à hydrogène caractérisé par les éléments cités dans la revendication 9. Ce procédé peut fournir un ou plusieurs avantages cités ci-dessus.

[21] Un troisième aspect de l'invention vise une cavité magnétron pour horloge atomique, en particulier pour un maser à hydrogène, caractérisé par les éléments cités dans les revendications 10 à 14. Cette cavité magnétron peut fournir un ou plusieurs avantages cités ci-dessus.

[22] Un quatrième aspect de l'invention vise une horloge atomique de type maser à hydrogène, caractérisé par les éléments cités dans la revendication 15. Cette horloge atomique de type maser à hydrogène peut fournir un ou plusieurs avantages cités ci-dessus.

Brève description des dessins

[23] Un mode de réalisation préféré de l'invention sera décrit en référence aux dessins annexes dans lesquels

- la Figure 1A représente une vue schématique latérale d'un mode de réalisation préféré d'une cavité magnétron selon un deuxième aspect de l'invention ;
- la Figure 1B représente une vue schématique de dessus de la cavité magnétron de la Figure 1 ;

- la Figure 2 représente un diagramme d' un mode de réalisation préféré d'un procédé assisté par ordinateur selon un premier aspect de l'invention pour le dimensionnement d'une cavité magnétron de la Figure 1A;
- la Figure 3 représente un graphique illustrant l'étape C) du procédé de la Figure 2 ;
- la Figure 4 représente un graphique illustrant l'étape E) du procédé de la Figure 2.

Description détaillée de l'invention

[24] La Figure 1A représente une vue schématique latérale d'une réalisation préférée d'une cavité magnétron 1 pour une horloge atomique, en particulier pour un maser à hydrogène, selon un deuxième aspect de l'invention. La Figure 1B représente une vue schématique de dessus de ladite cavité magnétron 1. La cavité magnétron 1 est sensiblement cylindrique ayant une hauteur 2 et un diamètre 3 qui peuvent être imposés par des contraintes extérieures telles que l'espace disponible pour le maser, par exemple dans un satellite. Une hauteur de la cavité peut par exemple mesurer entre 75 mm et 250 mm, par exemple entre 100 mm et 200 mm, par exemple environ 113 mm. Le diamètre (interne) 3 de la cavité peut également varier entre par exemple 75 mm et 200 mm, par exemple entre 100 mm et 150 mm, étant de préférence d'environ 100 mm pour une hauteur d'environ 113 mm. La cavité magnétron 1 inclut au moins deux électrodes 4, de préférence quatre électrodes 4, incurvées disposées le long d'un arc de cercle et délimitant un espace sensiblement cylindrique de rayon prédéterminé r. Le rayon prédéterminé r est le rayon interne de l'espace délimité par les électrodes. Ce rayon r peut par exemple être compris dans un intervalle entre environ 25 mm et environ 40 mm. Ces électrodes peuvent être physiquement connectées à la paroi intérieure de la cavité magnétron 1 via des supports 5. Les électrodes 4 sont de préférence des plaques métalliques, tel qu'en cuivre ou en aluminium ou en aluminium argenté. Elles sont de préférence du même matériau que les parois de la cavité 1. Une épaisseur 12 desdites électrodes 4 peut par exemple être entre 1 et 6 mm, par exemple autour de 4 mm. Une hauteur 6 desdites électrodes 4 est de préférence sensiblement plus petite que la hauteur 2 de la cavité magnétron 1 et peut par exemple valoir environ 80 mm si la hauteur 2 de la cavité est d'environ 113 mm. Les électrodes 4 sont de préférence placées à une distance 9 du fond de la

cavité magnétron 1. La distance circonférentielle de la fente entre deux électrodes 4 est indiquée par t_{gap}. La cavité magnétron 1 inclut également un ballon de stockage 7 (représenté par des pointillés) sensiblement cylindrique disposé dans ledit espace sensiblement cylindrique formé par les électrodes 4. Le ballon 7 possède une hauteur externe 8 qui est de préférence la même que la hauteur 6 des électrodes 4. Le ballon 7 est disposé à une distance 10 du fond de la cavité 1, de préférence à la même distance que la distance 9 entre les électrodes 4 et le fond de la cavité 1. Le ballon 7 a une épaisseur de paroi 11 de par exemple environ 1.5 mm et est situé à une distance 10 d'environ 10 à 20 mm, par exemple environ 12 mm du fond de la cavité 1. Le ballon 7 est de préférence en quartz. Le ballon a un rayon externe r_B. Le rayon r_B du ballon est de préférence légèrement plus petit que le rayon r de l'espace sensiblement cylindrique formé par les électrodes 4, par exemple environ 2 mm plus petit, ou moins. Le ballon 7 est disposé au sein de cet espace sensiblement cylindrique formé par les électrodes 4 tel qu'il existe un interstice radial e_i (pas indiqué sur les figures) entre les électrodes 4 et le ballon de stockage 7, en particulier entre l'extérieur de la paroi du ballon 7 et l'intérieur des électrodes 4. Cet interstice radial e_i correspond à la différence entre le rayon r de l'espace sensiblement cylindrique formé par les électrodes 4 et le rayon r_B du ballon de stockage : $e_i = r - r_B$.

[25] Le tableau 1 reprend à titre d'exemple un jeu de paramètres géométriques de la cavité magnétron 1 tel que la fréquence de résonance v_c de la cavité à une température de référence de 20°C est la fréquence de résonance requise, en particulier 1420.405MHz. Il est entendu que d'autres jeux de paramètres sont possibles afin d'atteindre cette fréquence. Ces valeurs correspondent à une cavité magnétron 1 en cuivre et un ballon de stockage 7 en quartz avec une constante diélectrique $e_r = 3.78 \pm 0.08$ et un coefficient d'expansion thermique $\alpha_{quartz} = 0.40 \pm 0.03 .10^{-6}$ °C^{-1}, le coefficient d'expansion thermique pour le cuivre étant $\alpha_{C0} = 16.5 \pm 0.5 .10^{-6}$ °C^{-1}. Une valeur initiale dudit interstice radial e_i peut être déduit de ces paramètres. Les éléments de la cavité magnétron 1 sont de préférence usinés avec une tolérance mécanique de 0.1 mm.

[26] Tableau 1 : exemple d'un jeu de paramètres géométriques d'une cavité magnétron telle que représentée dans les Figures 1A et 1B :

Paramètres	Valeur (mm)
Diamètre interne 3 de la cavité	100.1
Hauteur 2 de la cavité	113.6
Rayon r	29.7
Hauteur 6 des électrodes	80.0
Epaisseur 12 des électrodes	4.0
Distance 9 des électrodes du fond de la cavité	12.0
Distance circomférentielle t_{gap}	4.9
Rayon du ballon r_B	59.0
Hauteur 8 du ballon	80.0
Epaisseur 11 de la paroi du ballon	1.5
Distance 10 du ballon du fond de la cavité	12.0

[27] La Figure 2 représente un diagramme d'un mode de réalisation préféré d'un procédé assisté par ordinateur selon un premier aspect de l'invention pour le dimensionnement d'une cavité magnétron de la Figure 1A. Dans une première étape A) du procédé, un jeu de paramètres géométriques est obtenu. Ce jeu de paramètres peut par exemple comprendre les paramètres du Tableau 1, ainsi que les coefficients d'expansion thermique et/ou les constantes diélectriques des matériaux utilisés. Ces paramètres géométriques, ainsi qu'une température de référence T_0, par exemple une température de 20°C, et une valeur initiale e_{i0} de l'interstice radial e_i peuvent être introduit dans un programme d'ordinateur destiné à déterminer une déformation géométrique potentielle de la cavité et à déterminer la fréquence de résonance associée à ladite déformation, par exemple dans un programme de modélisations par éléments finis, par exemple dans Comsol® Multiphysics, ou dans tout autre programme approprié. Le jeu de paramètres géométriques est choisi tel que la fréquence de résonance ν_c de la cavité à la température de référence est la fréquence de résonance requise pour un maser à hydrogène, en particulier 1420.405MHz +/- 1. Il est préférable d'ajuster uniquement la distance circonférentielle t_{gap} entre deux électrodes adjacentes des au moins deux électrodes incurvées de la cavité magnétron afin d'obtenir cette fréquence de résonance requise.

[28] Puis, dans une deuxième étape B) du procédé, la température de référence T_0 peut être modifiée, par exemple en ajoutant un pas ε_j fixe à chaque itération, par exemple de 10° C, ou de 5°C, ou de 1°C, ou tout autre pas approprié. Il est également possible de modifier T_0 par un pas variable ou même aléatoire. L'ensemble des n (n étant un nombre entier strictement positif) températures modifiées T_j couvre de

préférence un intervalle de températures de fonctionnement potentielles de la cavité magnétron, par exemple entre environ 5°C et environ 50°C. Pour cet ensemble de températures modifiées T_j, l'étape B) comprend la détermination d'une déformation géométrique potentielle de la cavité induite par l'expansion thermique due à cette température modifiée qui peut comprendre une élévation ou diminution de la température de référence en considérant les paramètres d'expansion thermique du ou des matériaux, par exemple du cuivre pour la cavité magnétron 1 et les électrodes 4 et du quartz pour le ballon de stockage 7. Cette étape peut par exemple s'effectuer en déplaçant un maillage selon trois directions perpendiculaires dans un programme de modélisations par éléments finis, par exemple dans une interface du même programme Comsol® Multiphysics qu'à l'étape A), ou dans tout autre programme approprié. Pour ce maillage, chaque élément, ou maille, est par exemple un tétraèdre et chaque point de maille est repéré de manière univoque dans l'espace par les 3 coordonnées u, v, w. De préférence, le maillage est le plus petit possible afin de simuler au mieux la cavité. Il est par exemple noté que l'épaisseur de la paroi du ballon de stockage peut être très mince, par exemple de l'ordre d'1 mm d'épaisseur. Ainsi il est préférable que les mailles soient plus petites que cette épaisseur du ballon. Pour chaque géométrie déformée, le procédé, en particulier l'étape B), comprend la détermination de la fréquence de résonance ν_{cj} (T_j) associée à cette déformation géométrique potentielle, qui est obtenue à l'aide des équations de Maxwell, par exemple en utilisant une interface appropriée du même programme d'ordinateur qu'à l'étape A) ou dans tout autre programme d'ordinateur approprié.

[29] Ensuite, dans l'étape C) du procédé, le coefficient fréquence - température FTC est déterminé. Le FTC correspond à la variation de la fréquence de résonance ν_{cj} par rapport à ladite pluralité de températures de fonctionnement T_j. Cette détermination peut par exemple s'effectuer par régression linéaire par une méthode des moindres carrés dans tout programme d'ordinateur approprié. La Figure 3 représente un graphique illustrant un résultat potentiel de cette étape C) du procédé. Chaque point correspond à une prédiction. La droite de régression linéaire est également présentée. Selon cette droite de régression, un FTC de 16.5 $kHz°C^{-1}$ est obtenu avec le ballon de stockage. Il est également possible d'utiliser des mesures expérimentales et il s'est avéré que les valeurs du FTC prédites et celles résultant de mesures expérimentales sont en très bon accord.

[30] Comme le FTC ainsi obtenu est un FTC pour un interstice e_i donné et comme il s'est avéré que le FTC est très dépendant de la valeur de cet interstice e_i, le procédé comprend ensuite l'étape D) qui est la répétition des étapes B) et C) pour une pluralité de valeurs de cet interstice, par exemple pour m valeurs différentes de l'interstice, m étant un nombre entier strictement positif. Pour chaque nouvelle valeur de cet interstice e_i, il est préférable de redéterminer aussi une valeur pour la distance circonférentielle t_{gap} entre deux électrodes 4 adjacentes afin d'obtenir la fréquence de résonance ν_c requise, en particulier de 1420.405 MHz + /- 1. Le résultat de cette étape est l'obtention d'une pluralité de valeurs de FTC en fonction de l'interstice e_i et éventuellement en fonction d'une valeur t_{gap} associée à l'interstice e_i.

[31] Dans une dernière étape E) du procédé, l'interstice radial e_i correspondant au coefficient fréquence - température (FTC) souhaité est déterminé. Cette étape peut comprendre un affichage graphique à l'aide d'un programme d'ordinateur approprié de la pluralité de valeurs de FTC en fonction de l'interstice e_i. La Figure 4 représente un graphique illustrant cette étape E) du procédé montrant le FTC (carrés noirs) en fonction de l'interstice e_i à rayon r_B constant, tous les autres paramètres géométriques étant maintenus constants, à l'exception du t_{gap} (ronds) qui a été adapté à chaque e_i de manière à maintenir la fréquence de résonance de la cavité endéans 1 MHz de la fréquence de la cavité magnétron pour un maser à hydrogène qui est de 1420.405 MHz. Cet affichage permet de visualiser la dépendance du FTC de la valeur de l'interstice et permet de déduire et donc de déterminer comment ajuster l'interstice e_i pour qu'une cavité magnétron ayant un FTC entre environ 60 $kHz°C^{-1}$ et 0 (mais 0 exclus), de préférence entre environ 30 $kHz°C^{-1}$ et 0 (mais 0 exclus), de préférence entre 20 $kHz°C^{-1}$ et 0 (0 exclus) puisse être obtenue. Par exemple, si un utilisateur souhaite obtenir une cavité magnétron ayant un FTC de 20 $kHz°C^{-1}$, la dernière étape E) du procédé lui permet de déterminer la valeur de l'interstice e_i à utiliser, en particulier e_i = 0.4 mm, pour dimensionner correctement une cavité magnétron ayant le FTC souhaité. Au lieu d'utiliser un affichage, cette étape peut également se réaliser à l'aide d'un tableau ou par tout autre méthode ou programme d'ordinateur approprié.

[32] Même si la présente invention a été illustrée en référence à des modes de réalisation spécifiques, l'homme du métier comprendra que l'invention n'est pas limitée

aux détails des modes de réalisations illustratifs, et que la présente invention peut être réalisée avec de nombreuses modifications sans s'écarter de la portée de l'invention. Les modes de réalisation doivent être considérés comme illustratifs et non de façon restrictive, la portée de l'invention étant définie par les revendications qui suivent plutôt que par la description qui précède. Toute modification qui entre dans la signification ou l'équivalence des revendications est destinée à être comprise. Autrement dit, il est envisagé de couvrir toutes les modifications, variations ou équivalences qui tombent sous la portée des principes de base sous-jacents et dont les caractéristiques essentielles sont revendiquées dans cette demande de brevet. Le lecteur de cette demande de brevet comprendra que les mots "comprenant" ou "comprend" n'excluent pas d'autre élément ou étape, et que les mots "un" ou "une" n'excluent pas une pluralité. Les signes de références dans les revendications ne peuvent être considérés comme limitant la revendication concernée. Les termes "premier", "deuxième", "troisième", "a", "b", "c", etcetera sont introduits pour distinguer différents éléments ou étapes et ne décrivent pas nécessairement un ordre séquentiel ou chronologique. De même, les termes "supérieure", "inférieure", "dessus", "dessous", etcetera sont introduits à des fins descriptives et pas nécessairement pour désigner des positions relatives. On comprendra que ces termes sont interchangeables sous des conditions appropriées et que des modes de réalisations de l'invention sont capables d'être opérables selon la présente invention dans d'autres séquences ou dans des orientations qui diffèrent de celles décrites ou illustrées ci-dessus.

REVENDICATIONS

1. Procédé assisté par ordinateur pour le dimensionnement d'une cavité magnétron pour horloge atomique, en particulier pour un maser à hydrogène, la cavité étant sensiblement cylindrique et incluant au moins deux électrodes incurvées disposées le long d'un arc de cercle et délimitant un espace sensiblement cylindrique de rayon prédéterminé r, la cavité incluant également un ballon de stockage sensiblement cylindrique de rayon r_B disposé dans ledit espace tel qu'il existe un interstice radial e_i entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage, le procédé comprenant les étapes de
   - A) obtention d'un jeu de paramètres géométriques de la cavité comprenant une valeur initiale dudit interstice radial e_i, tel que la fréquence de résonance v_c de la cavité à une température de référence est la fréquence de résonance requise, en particulier 1420.405 MHz +/- 1 MHz, à ladite température de référence;
   - B) pour une pluralité de températures de fonctionnement de l'horloge, détermination d'une déformation géométrique potentielle de la cavité et détermination de la fréquence de résonance associée à ladite déformation;
   - C) détermination du coefficient fréquence - température (FTC) correspondant à la variation de la fréquence de résonance par rapport à ladite pluralité de températures de fonctionnement;
   - D) répétition des étapes B) et C) pour une pluralité de valeurs dudit interstice e_i
   - E) détermination de l'interstice radial e_i correspondant au coefficient fréquence - température (FTC) souhaité.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la pluralité de valeurs dudit interstice radial e_i est choisie entre 0 et 3 mm, de préférence entre 0.1 mm et 2 mm, de préférence entre 0.2 et 1.2 mm.

3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le coefficient fréquence – température (FTC) souhaité est de l'ordre d'environ 20 $kHz°C^{-1}$ en valeur absolue ou moins.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ladite pluralité de températures de fonctionnement de l'horloge comprend des températures entre environ 5°C et 70°C, de préférence entre 10° C et 60°C.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le jeu de paramètres géométriques de la cavité comprend le rayon de la cavité sensiblement cylindrique, la hauteur de ladite cavité sensiblement cylindrique, la hauteur et l'épaisseur des au moins deux électrodes incurvées, le rayon de l'espace sensiblement cylindrique délimité par lesdits au moins deux électrodes, la hauteur et le rayon dudit ballon de stockage.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'étape A) comprend une détermination de la distance circonférentielle entre deux électrodes adjacentes des au moins deux électrodes incurvées.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'étape B) comprend l'utilisation d'une méthode d'éléments finis.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'étape C) comprend une régression linéaire.

9. Procédé de fabrication d'une cavité magnétron pour horloge atomique, en particulier pour un maser à hydrogène, la cavité étant sensiblement cylindrique et incluant au moins deux électrodes incurvées disposées le long d'un arc de cercle et délimitant un espace sensiblement cylindrique de rayon prédéterminé r, la cavité incluant également un ballon de stockage sensiblement cylindrique de rayon r_B disposé dans ledit espace tel qu'il existe un interstice radial e_i entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage, le procédé comprenant les étapes de

- Obtention de la valeur dudit interstice pour un coefficient fréquence - température (FTC) souhaité par le procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 8 ;
- Fabrication de la cavité magnétron ayant ledit interstice radial e_i entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage de la cavité et le jeu de paramètres géométriques pour lequel ledit interstice a été déterminé.

10. Cavité magnétron pour horloge atomique, en particulier pour un maser à hydrogène, la cavité étant sensiblement cylindrique et incluant au moins deux électrodes incurvées disposées le long d'un arc de cercle et délimitant un espace sensiblement cylindrique de rayon prédéterminé r, la cavité incluant également un ballon de stockage sensiblement cylindrique de rayon r_B disposé dans ledit espace tel qu'il existe un interstice radial e_i entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage, caractérisée en ce que ledit interstice est compris entre 0.1 mm et 2 mm.

11. Cavité magnétron selon la revendication 10, dans laquelle un coefficient fréquence – température est compris entre 0 et 30 $kHz°C^{-1}$ en valeur absolue.

12. Cavité magnétron selon l'une quelconque des revendications précédentes 10 à 11, dans laquelle la cavité magnétron est une cavité compacte ayant un diamètre d'au plus 200 mm, de préférence d'au plus 150 mm.

13. Cavité magnétron selon l'une quelconque des revendications précédentes 10 à 12, dans laquelle les au moins deux électrodes sont du même matériau que la cavité sensiblement cylindrique, de préférence de cuivre, d'aluminium ou d'aluminium argenté.

14. Cavité magnétron selon l'une quelconque des revendications 10 à 13, dans laquelle les dimensions de la cavité ont été obtenues par le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8.

15. Horloge atomique de type maser à hydrogène comprenant une cavité magnétron selon l'une quelconque des revendications précédentes 10 à 14. BE2021/5787

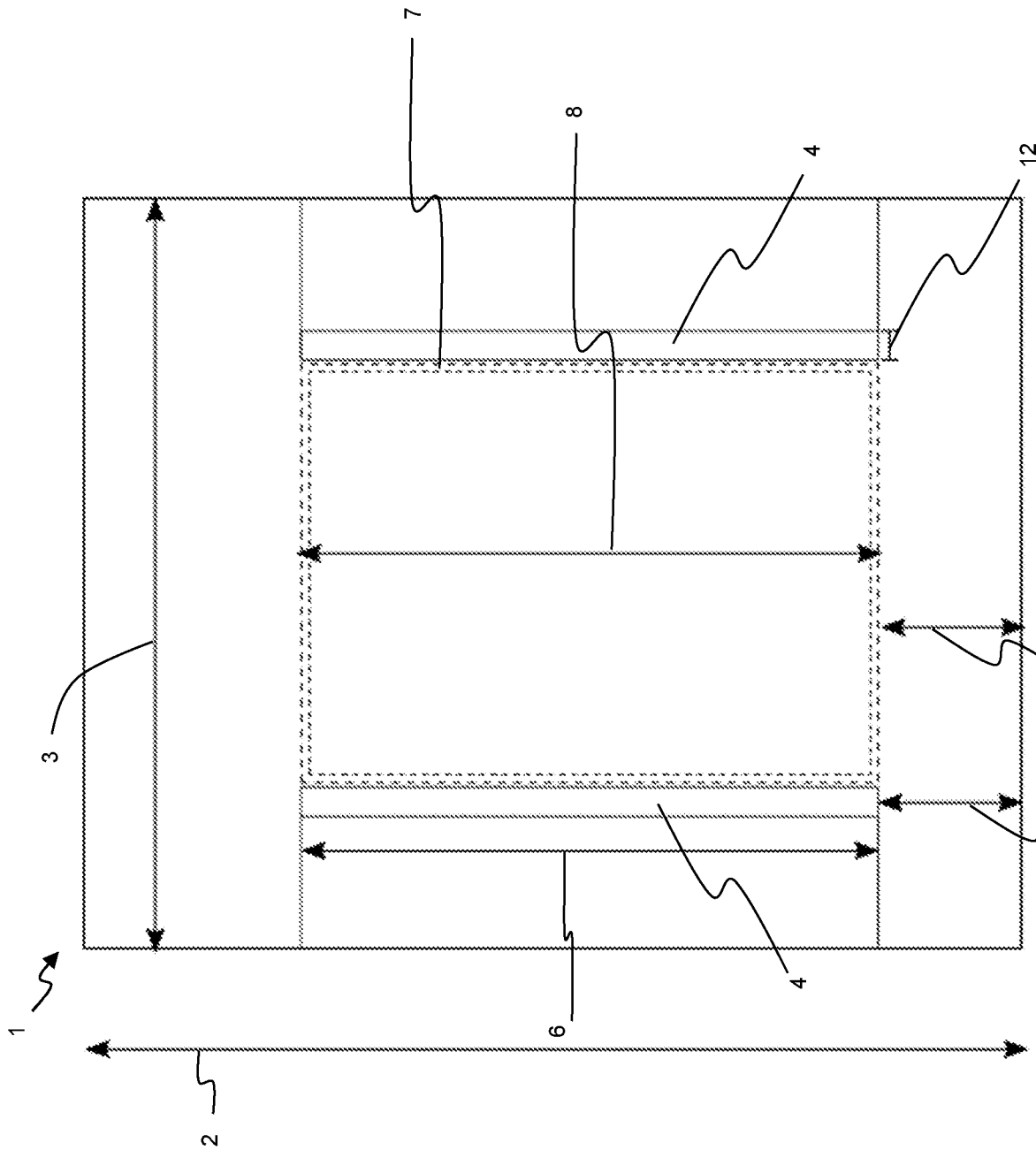


Fig. 1A

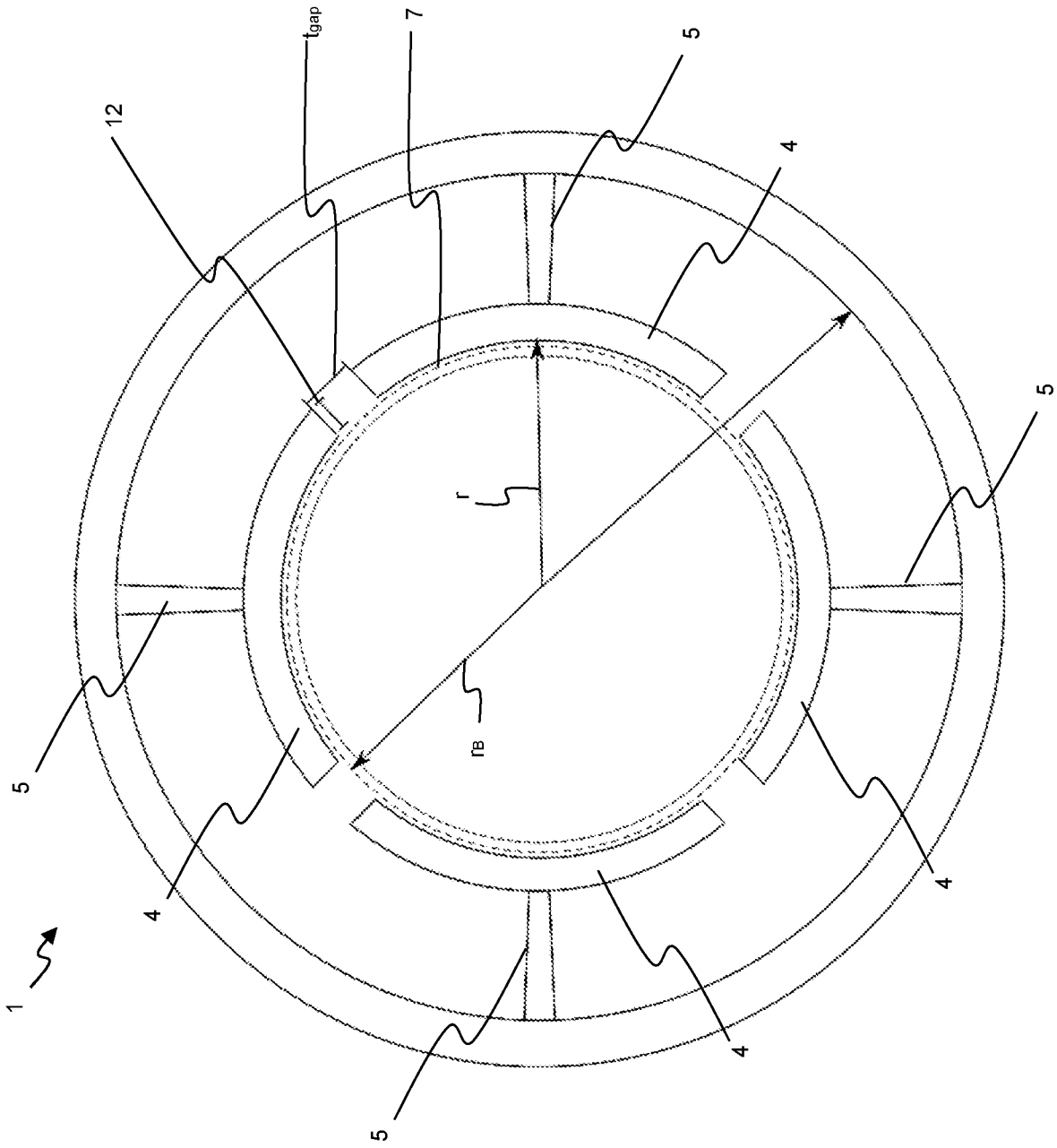


Fig. 1B

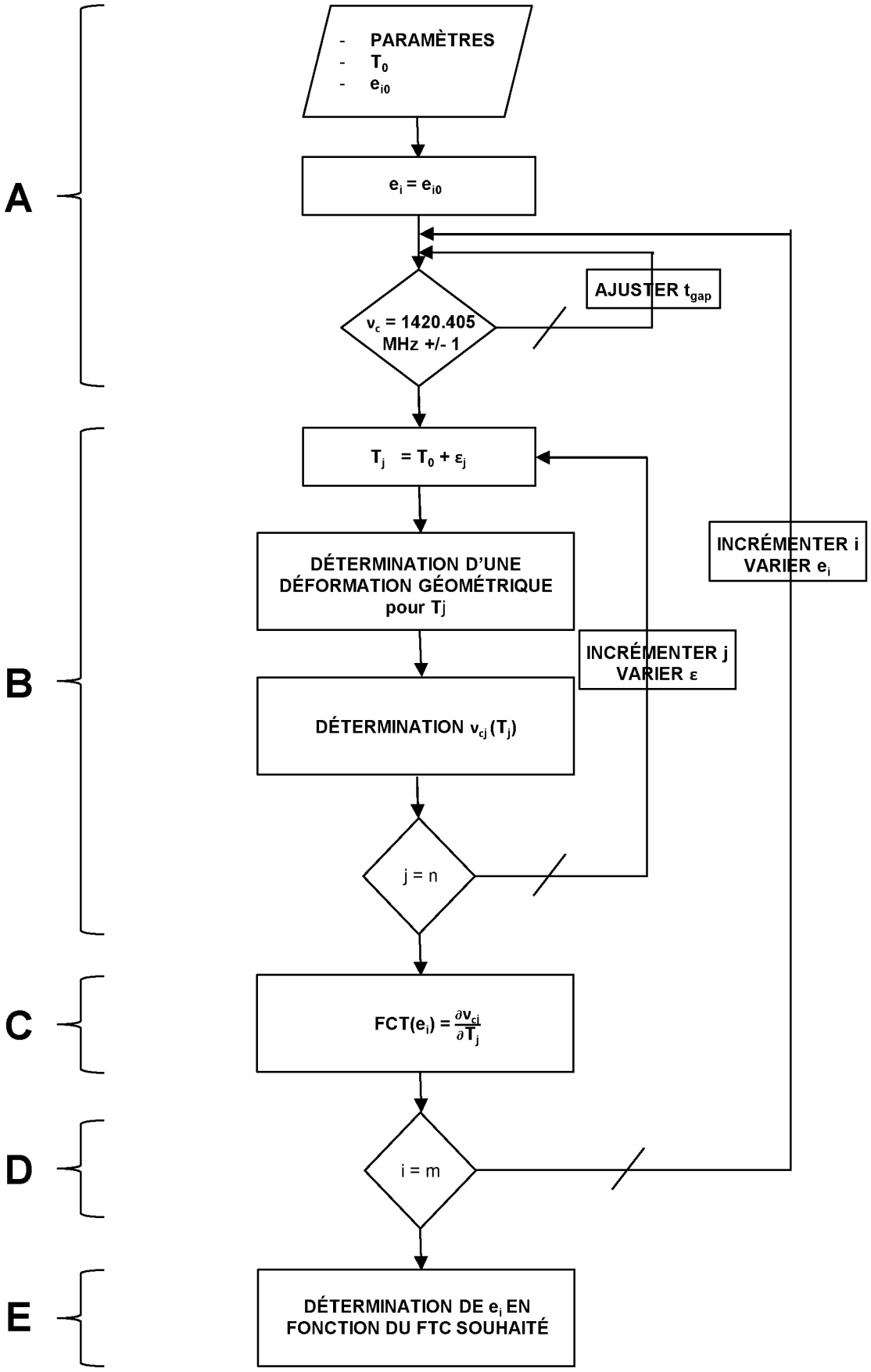

A
B
C
D
E
- PARAMÈTRES
- T_0
- e_{i0}
$e_i = e_{i0}$
v_c = 1420.405 MHz +/- 1
AJUSTER t_{gap}
$T_j = T_0 + \varepsilon_j$
DÉTERMINATION D'UNE DÉFORMATION GÉOMÉTRIQUE pour Tj
DÉTERMINATION $v_{cj}(T_j)$
j = n
INCRÉMENTER j VARIER ε
INCRÉMENTER i VARIER e_i
$FCT(e_i) = \frac{\partial v_{ci}}{\partial T_j}$
i = m
DÉTERMINATION DE e_i EN FONCTION DU FTC SOUHAITÉ

Fig. 2

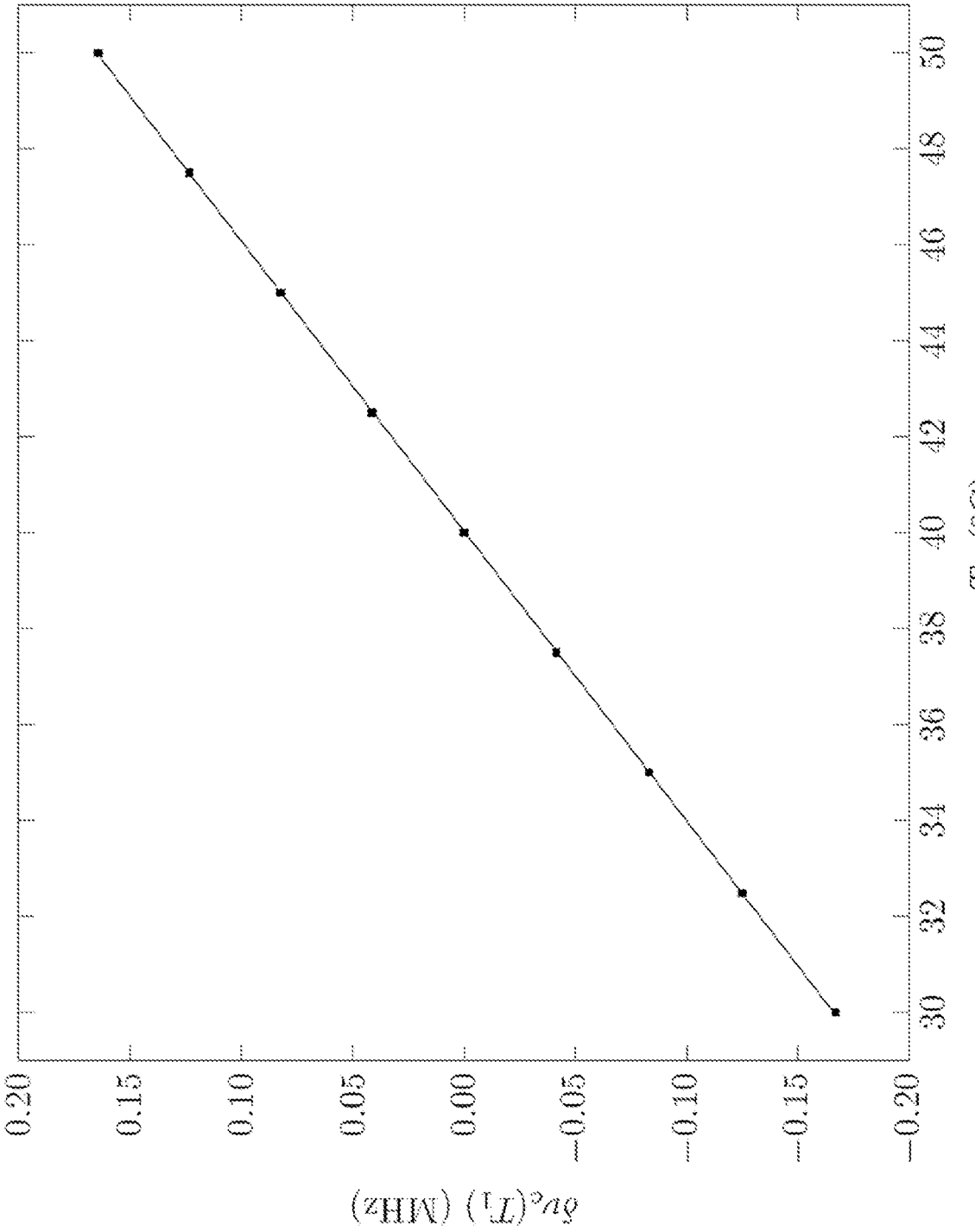

0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
−0.05
−0.10
−0.15
−0.20
30
32
34
36
38
40
42
44
46
48
50
T_1 (°C)
$\delta\nu_c(T_1)$ (MHz_z)

Fig. 3

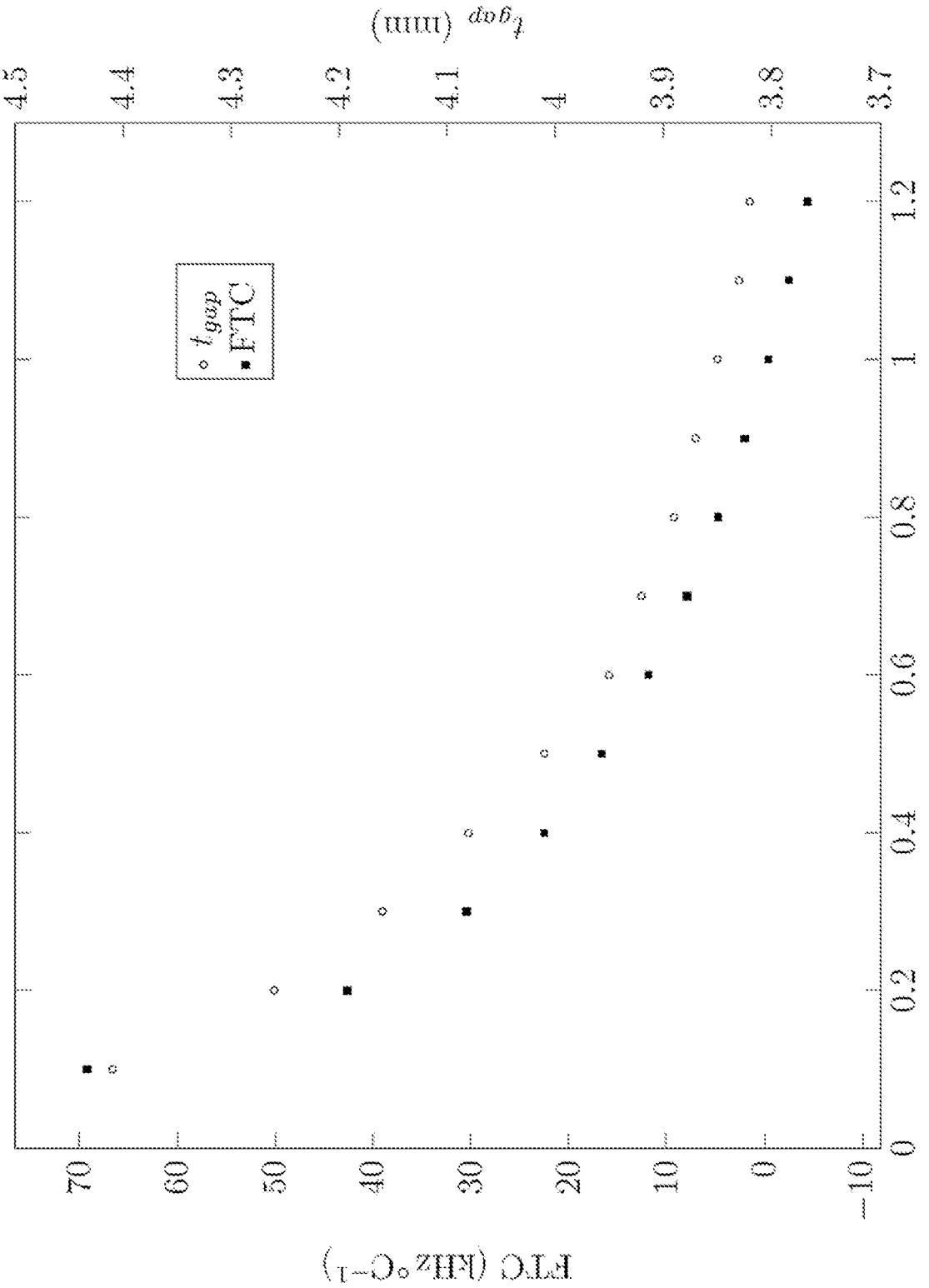

FTC (kHz·°C⁻¹)
70
60
50
40
30
20
10
0
−10
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
e_i (mm)
4.5
4.4
4.3
4.2
4.1
4
3.9
3.8
3.7
t_{gap} (mm)
t_{gap}
FTC

Fig. 4

Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

Numero de la demande nationale

RAPPORT DE RECHERCHE

établi en vertu de l'article XI.23., §2 et §3
du Code de droit économique belge

BO 12337
BE 202105787

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X,D	US 4 123 727 A (PETERS HARRY E) 31 octobre 1978 (1978-10-31) * colonne 2, ligne 56 - colonne 4, ligne 27 * * figures 1, 2 *	10-15	INV. G04F5/14 H01S1/06 H03L7/26
X	OPIE D B ET AL: "A high T/sub c/ superconducting resonator for a compact hydrogen maser", FREQUENCY CONTROL, 1991., PROCEEDINGS OF THE 45TH ANNUAL SYMPOSIUM ON LOS ANGELES, CA, USA 29-31 MAY 1991, NEW YORK, NY, USA,IEEE, US, 29 mai 1991 (1991-05-29), pages 467-476, XP010040168, DOI: 10.1109/FREQ.1991.145937 ISBN: 978-0-87942-658-3 * Paragraphe "Introduction" * * figure 1 *	10-15	
X	PELLATON M ET AL: "3D printed microwave cavity for atomic clock applications: proof of concept", ELECTRONICS LETTERS, THE INSTITUTION OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, GB, vol. 54, no. 11, 31 mai 2018 (2018-05-31), pages 691-693, XP006067537, ISSN: 0013-5194, DOI: 10.1049/EL.2017.4176 * le document en entier *	10-15	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) G04F H03L H01S
X	US 4 661 782 A (WEIDEMANN WERNER [US]) 28 avril 1987 (1987-04-28) * Figure unique * * colonne 4, ligne 53 - colonne 5, ligne 35 * * colonne 5, ligne 67 - colonne 6, ligne 66 *	10-14	

-/--

1

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
24 juin 2022	Pirozzi, Giuseppe

CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : arrière-plan technologique
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons
.....
& : membre de la même famille, document correspondant

EPO FORM 1503 03.82 (P04C48)

Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

Numero de la demande nationale

RAPPORT DE RECHERCHE

établi en vertu de l'article XI.23., §2 et §3
du Code de droit économique belge

BO 12337
BE 202105787

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	HAIBO CHEN ET AL: "Paper;A study on the frequency temperature coefficient of a microwave cavity in a passive hydrogen maser;A study on the frequency temperature coefficient of a microwave cavity in a passive hydrogen maser", METROLOGIA, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, GB, vol. 49, no. 6, 21 novembre 2012 (2012-11-21), pages 816-820, XP020233330, ISSN: 0026-1394, DOI: 10.1088/0026-1394/49/6/816 * le document en entier *	1-9	
T	ANTON E. IVANOV ET AL: "Design of atomic clock cavity based on a loop-gap geometry and modified boundary conditions", INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROWAVE AND WIRELESS TECHNOLOGIES, vol. 9, no. 7, 27 juin 2017 (2017-06-27), pages 1373-1386, XP055693597, GB ISSN: 1759-0787, DOI: 10.1017/S1759078717000691 * le document en entier *		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
24 juin 2022	Pirozzi, Giuseppe

CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : arrière-plan technologique
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons
.....
& : membre de la même famille, document correspondant

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C48)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET BELGE NO.

BO 12337
BE 202105787

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

24-06-2022

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 4123727 A	31-10-1978	AUCUN	
US 4661782 A	28-04-1987	AT 79993 T	15-09-1992
		DE 3686555 T2	04-03-1993
		EP 0224093 A2	03-06-1987
		ES 2033670 T3	01-04-1993
		JP H0754909 B2	07-06-1995
		JP S62151002 A	06-07-1987
		US 4661782 A	28-04-1987

OPINION ÉCRITE

Dossier N°	Date du dépot *(jour/mois/année)*	Date de priorité *(jour/mois/année)*	Demande n°
BO12337	08.10.2021		BE202105787

Classification internationale des brevets (CIB)
INV. G04F5/14 H01S1/06 H03L7/26

Déposant
UNIVERSITE DE LIEGE

La présente opinion contient des indications et les pages correspondantes relatives aux points suivants :

- ☒ Cadre n° I Base de l'opinion
- ☐ Cadre n° II Priorité
- ☐ Cadre n° III Absence de formulation d'opinion quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle
- ☐ Cadre n° IV Absence d'unité de l'invention
- ☒ Cadre n° V Déclaration motivée quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle; citations et explications à l'appui de cette déclaration
- ☐ Cadre n° VI Certains documents cités
- ☐ Cadre n° VII Irrégularités dans la demande
- ☐ Cadre n° VIII Observations relatives à la demande

	Examinateur
	Pirozzi, Giuseppe

Demande n°

OPINION ÉCRITE

BE202105787

Cadre n° I Base de l'opinion

1. Cette opinion a été établie sur la base des revendications déposées avant le commencement de la recherche.

2. En ce qui concerne **la ou les séquences de nucléotides ou d'acides aminés** divulguées dans la demande, le cas échéant, cette opinion a été effectuée sur la base des éléments suivants :

   a. Nature de l'élément:

   ☐ un listage de la ou des séquences

   ☐ un ou des tableaux relatifs au listage de la ou des séquences

   b. Type de support:

   ☐ sur papier

   ☐ sous forme électronique

   c. Moment du dépôt ou de la remise:

   ☐ contenu(s) dans la demande telle que déposée

   ☐ déposé(s) avec la demande, sous forme électronique

   ☐ remis ultérieurement

3. ☐ De plus, lorsque plus d'une version ou d'une copie d'un listage des séquences ou d'un ou plusieurs tableaux y relatifs a été déposée, les déclarations requises selon lesquelles les informations fournies ultérieurement ou au titre de copies supplémentaires sont identiques à celles initialement fournies et ne vont pas au-delà de la divulgation faite dans la demande internationale telle que déposée initialement, selon le cas, ont été remises.

4. Commentaires complémentaires :

Cadre n° V Opinion motivée quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle; citations et explications à l'appui de cette déclaration

1. Déclaration

Nouveauté	Oui :	Revendications	1-15
	Non :	Revendications	
Activité inventive	Oui :	Revendications	1-9
	Non :	Revendications	10-15
Possibilité d'application industrielle	Oui :	Revendications	1-15
	Non :	Revendications	

2. Citations et explications

voir feuille séparée

Ad point V

Déclaration motivée quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle ; citations et explications à l'appui de cette déclaration

Il est fait référence aux documents suivants :

D1 US 4 123 727 A (PETERS HARRY E) 31 octobre 1978 (1978-10-31)

D2 OPIE D B ET AL: "A high T/sub c/ superconducting resonator for a compact hydrogen maser",
FREQUENCY CONTROL, 1991., PROCEEDINGS OF THE 45TH ANNUAL SYMPOSIUM ON LOS ANGELES, CA, USA 29-31 MAY 1991, NEW YORK, NY, USA,IEEE, US, 29 mai 1991 (1991-05-29), pages 467-476, XP010040168,
DOI: 10.1109/FREQ.1991.145937
ISBN: 978-0-87942-658-3

D3 PELLATON M ET AL: "3D printed microwave cavity for atomic clock applications: proof of concept",
ELECTRONICS LETTERS, THE INSTITUTION OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, GB,
vol. 54, no. 11, 31 mai 2018 (2018-05-31), pages 691-693, XP006067537,
ISSN: 0013-5194, DOI: 10.1049/EL.2017.4176

D4 US 4 661 782 A (WEIDEMANN WERNER [US]) 28 avril 1987 (1987-04-28)

D5 HAIBO CHEN ET AL: "Paper;A study on the frequency temperature coefficient of a microwave cavity in a passive hydrogen maser;A study on the frequency temperature coefficient of a microwave cavity in a passive hydrogen maser",
METROLOGIA, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, GB,
vol. 49, no. 6, 21 novembre 2012 (2012-11-21), pages 816-820, XP020233330,
ISSN: 0026-1394, DOI: 10.1088/0026-1394/49/6/816

1 Considérations préliminaires

1.1 On souhaite remarquer que, indépendamment de la nouveauté et de l'activité inventive de l'objet revendiqué, la revendication 1 ne serait pas brevetable dans plusieurs procédures (p. ex. européenne et/ou internationale) car elle tombe dans l'un des cas d'exclusion de la brevetabilité.

1.2 En effet, la méthode telle que définie par la revendication 1 est exécutée exclusivement par un ordinateur, sans interaction avec la réalité physique.

1.2.1 Les données à l'entrée et à la sortie de la méthode ne concernent que l'élaboration/manipulation d'informations. Les données d'entrée sont fournies à l'ordinateur sans effectuer des mesures directes. Les données de sortie ne comportent pas d'effet technique direct (p. ex. l'émission s'un signal de contrôle d'une périphérique et /ou d'un dispositif esclave de l'ordinateur).

1.3 En d'autres termes, la revendication 1 ne concerne qu'un "procédé de conception".

1.3.1 Si une méthode mise en œuvre par ordinateur ne permet d'obtenir qu'un **modèle abstrait** d'un produit (dans ce cas la méthode fournit un modèle d'une cavité magnétron), ce résultat n'est pas considéré en soi comme un effet technique même si le produit est technique.

1.3.2 L'absence d'un effet technique empêche la brevetabilité de l'objet revendiqué.

1.4 La même conclusion reste valable, pour les mêmes raisons, aussi en ce qui concerne les revendications dépendantes 2 à 8.

1.5 La revendication 9, par contre, définit un objet technique, et donc potentiellement brevetable (lorsque la nouveauté et l'activité inventive seront démontrées). Ici, l'étape de "fabrication de la cavité" donne à la méthode revendiquée un caractère technique.

1.6 Dans le cas où la demanderesse envisage une extension de la présente demande dans un contexte européen et / ou international, elle est invitée à modifier les revendications en s'assurant que la méthode revendiquée soit technique et pas *a priori* exclue des critères de brevetabilité. Dans la pratique, cela correspondrait à intégrer la revendication 9 dans la revendication 1.

1.7 Enfin, on remarque que, dans toutes les revendications indépendantes, le fait que la cavité magnétron est utilisée dans un maser à hydrogène ne représente qu'une caractéristique optionnelle (la présence de l'expression "en particulier pour..." rend la caractéristique optionnelle et donc, du point de vue légal, non-incluse dans les revendications).

2 Art antérieur

2.1 On va décrire ici les documents cités dans le rapport de recherche.

2.2 Le document D1 a été cité déjà dans la demande. Son contenu est donc déjà bien connu à la demanderesse. Ce document décrit une cavité magnétron (référence 9) pour maser à hydrogène, la cavité étant sensiblement cylindrique et incluant au moins deux électrodes (référence 11) incurvées disposées le long d'un arc de cercle et délimitant un espace sensiblement cylindrique de rayon prédéterminé r, la cavité incluant également un ballon de stockage (référence 7) sensiblement cylindrique de rayon r_B disposé dans ledit espace tel qu'il existe un interstice radial e_i, entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage (voir figure 2).

2.3 Le D2 décrit une cavité magnétron (figure 1) pour maser à hydrogène, la cavité étant sensiblement cylindrique et incluant au moins deux électrodes ("YBCO coated silver electrodes") incurvées disposées le long d'un arc de cercle et délimitant un espace sensiblement cylindrique de rayon prédéterminé r, la cavité incluant également un ballon de stockage ("Teflon coated storage bulb") sensiblement cylindrique de rayon r_B disposé dans ledit espace tel qu'il existe un interstice radial e_i, entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage (voir figure 1).

2.4 Le D3 décrit une cavité magnétron (figures 1 et 2) pour maser à hydrogène (deuxième alinée: *"e.g. atomic fountain clocks, hydrogen masers, Rb-cell clocks, ..."*), la cavité étant sensiblement cylindrique et incluant au moins deux électrodes incurvées disposées le long d'un arc de cercle et délimitant un espace sensiblement cylindrique de rayon prédéterminé r (voir la partie "b" de la figure 2), la cavité incluant également un ballon de stockage (partie "a" de la figure 2: "vapour cell (glass)") sensiblement cylindrique de rayon r_B disposé dans ledit espace tel qu'il existe un interstice radial e_i, entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage.

2.5 Le document D4 décrit une cavité magnétron (référence 35) pour horloge atomique, ~~en particulier pour un maser à hydrogène~~, la cavité étant sensiblement cylindrique et incluant au moins deux électrodes (références 19A et 19B) incurvées disposées le long d'un arc de cercle et délimitant un espace sensiblement cylindrique de rayon prédéterminé r, la cavité incluant également un ballon de stockage (référence 25) sensiblement cylindrique de rayon r_B disposé dans ledit espace tel qu'il existe un interstice radial e_i, entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage (colonne 6, lignes 46 à 53: *"The coils 19a and 19b may be wound around the outside of the absorption cell 25*

and any separation or space 32 between the absorption cell 25 and said cavity resonator 35 may be readily filled with a non-magnetic polymer material such as polymeric silicone elastomers including room temperature-vulcanizing silicone rubber compounds, organosiloxane polymers and the like").

2.6 Le document D5 décrit une méthode d'étude / détermination du FTC pour une cavité magnétron d'un maser à hydrogène. Cette cavité a une conformation géométrique très similaire par rapport à la cavité selon la présente demande. De plus, la stabilité en fréquence a été étudiée sans et avec un ballon de stockage en quartz (tableau 1).

3 **Brevetabilité des revendications de procédé 1 à 9**

3.1 La recherche n'a pas mis en évidence de méthodes de dimensionnement d'une cavité magnétron dans laquelle la taille de l'interstice radial entre le ballon et les électrodes est variée en fonction de la température, la valeur finale de l'interstice étant choisie pour obtenir le FTC souhaité.

3.2 Par conséquent, l'objet des revendications de procédé semblerait être nouveau et inventif.

3.3 On répète toutefois, que la brevetabilité ne peut être obtenue qu'en incluant aussi l'objet de la revendication 9.

4 **Brevetabilité des revendications de dispositif 10 à 15**

4.1 L'objet de la revendication indépendante 10 n'est pas inventif.

4.1.1 Les documents D1 à D4 couvrent le préambule de cette revendication.

4.1.2 La partie caractérisante ne concerne qu'une plage de valeurs pour l'interstice.

4.1.3 Cette plage de valeurs est complètement normale, pour un homme du métier: il y aura toujours un petit jeu entre la paroi extérieure du ballon et les interstices, dans les documents D1 à D4. La plage revendiquée est entièrement compatible avec un tel jeu.

4.1.4 La revendication 10 ne comporte donc pas d'activité inventive.

4.1.5 On remarque aussi un manque de clarté dans cette revendication: la plage revendiquée dans la partie caractérisante est hors de contexte. Le préambule n'impose pas de limitations dimensionnelles sur les autres parties de la cavité. Si on veut définir un effet technique, il est nécessaire que toutes les dimensions soient bien définies.

4.2 La revendication 11 ne comporte pas de contribution inventive, car la plage de FTC revendiquée correspond, au moins en partie, aux FTCs de l'art antérieur (D1 à D4).

4.3 La revendication 12 ne comporte pas de contribution inventive, car la plage de dimensions revendiquée (20 cm au maximum) est entièrement compatible avec les dimensions des cavités selon D1 à D4.

4.4 La revendication 13 ne comporte pas de contribution inventive, par exemple, par rapport au D3 (cavité et électrodes monobloc).

4.5 La revendication 14 essaye de définir un produit par son procédé d'obtention.

4.5.1 Le fait que la cavité a été dimensionnée/obtenue par le procédé selon les revendications 1 à 8 n'implique pas de caractéristique technique intrinsèque de la cavité.

4.5.2 Cela engendre un manque de clarté et aussi un manque d'activité inventive. En effet, lorsqu'on ignore la partie "dans laquelle les dimensions de la cavité ont été obtenues par le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8" on ne reste qu'avec un objet déjà couvert par D1 à D4.

4.6 La revendication 15 n'est manifestement pas brevetable par rapport à D1 à D3, car ces documents concernent des masers à hydrogène.