

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
13 avril 2023 (13.04.2023)

(10) Numéro de publication internationale
WO 2023/057629 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G04F 5/14 (2006.01) H03L 7/26 (2006.01)
H01S 1/06 (2006.01)

(72) Inventeurs : BASTIN, Thierry ; Rue des Nations 8, 4102 Ougrée (BE). VAN DER BEKEN, Emeline ; Rue du Pres-soir 3, 4000 Liège (BE).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2022/077947

(74) Mandataire : IP HILLS NV ; Hubert Frère-Orbanlaan 329, 9000 Gent (BE).

(22) Date de dépôt international :
07 octobre 2022 (07.10.2022)

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

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
BE 2021/5787 08 octobre 2021 (08.10.2021) BE

(71) Déposant : UNIVERSITÉ DE LIÈGE [BE/BE] ; Place du 20-Août, 7, 4000 Liège (BE).

(54) Title: METHOD FOR PRODUCING A MAGNETRON CAVITY FOR ATOMIC CLOCKS

(54) Titre : PROCEDE DE FABRICATION D'UNE CAVITE MAGNETRON POUR HORLOGES ATOMIQUES

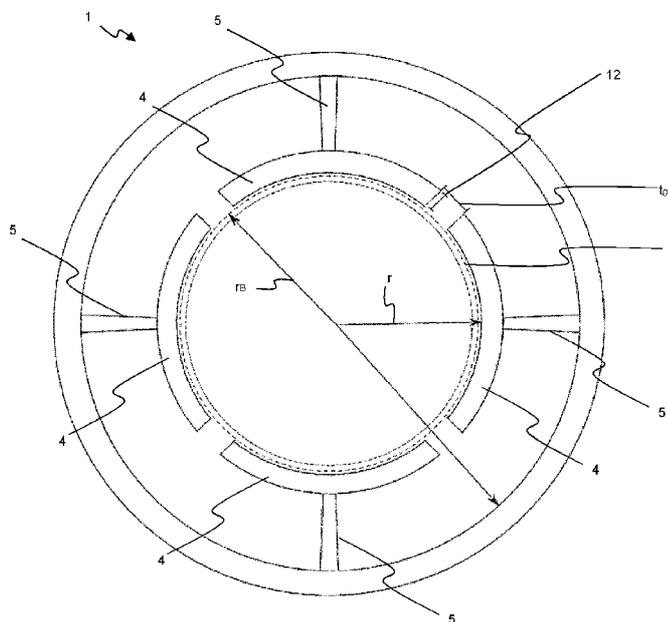


Fig. 1B

(57) Abstract: The invention relates to a computer-assisted method for sizing and then producing a magnetron cavity for an atomic clock, in particular for a hydrogen maser, the cavity being substantially cylindrical and including at least two curved electrodes arranged along an arc of a circle and delimiting a substantially cylindrical space of predetermined radius r, the cavity also including a substantially cylindrical storage bulb of radius r_s arranged in said space so that there is a radial gap e_i between the at least two electrodes and the storage bulb.

(57) Abrégé : Procédé assisté par ordinateur pour le dimensionnement et puis pour la 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



WO 2023/057629 A1

SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

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

Publiée:

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

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_s disposé dans ledit espace tel qu'il existe un interstice radial e_i entre les au moins deux électrodes et le ballon de stockage.

PROCEDE DE FABRICATION D'UNE CAVITE MAGNETRON POUR
HORLOGES ATOMIQUES**Domaine technique de l'invention**

5

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

10

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 1420.406MHz entre les deux niveaux hyperfins $F = 0$ et $F = 1$ de l'état fondamental $1s_{1/2}$ 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 $30 \text{ kHz}^\circ\text{C}^{-1}$ 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 $2,5 \text{ kHz}^\circ\text{C}^{-1}$ 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
5 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
10 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
15 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
20 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
1420.406MHz +/- 1 MHz, à ladite température de référence. Ces paramètres
géométriques de cavité, comme par exemple une hauteur et/ou un rayon de la cavité
25 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
30 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 $FTC = \partial v_c / \partial T$. 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 v_c de la cavité soit la fréquence de résonance requise, en particulier 1420.406 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.

5 [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
15 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
20 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
25 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
30 de température appropriée.

[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 1420.406 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.

25

[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.

30

[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.

25 **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

10

[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

30

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 ν_c de la cavité à une température de référence de 20°C est la fréquence de résonance requise, en particulier 1420.406MHz. 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 $\epsilon_r = 3.78 \pm 0.08$ et un coefficient d'expansion thermique $\alpha_{\text{quartz}} = 0.40 \pm 0.03 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, le coefficient d'expansion thermique pour le cuivre étant $\alpha_{\text{Cu}} = 16.5 \pm 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. 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 circonférentielle 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

5 A) du procédé, un jeu de paramètres géométriques est obtenu. Ce jeu de paramètres peut par exemple comprendre les paramètres du Tableau 1 ou un jeu de paramètres géométriques différent, 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

10 valeur initiale ϵ_{i0} de l'interstice radial ϵ_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. Ce jeu de paramètres

15 géométriques, par exemple le jeu du Tableau 1 ou tout autre 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 1420.406MHz +/- 1. Il est préférable d'ajuster uniquement la distance circonférentielle t_{gap} entre deux électrodes adjacentes des au moins deux

20 électrodes incurvées de la cavité magnétron afin d'obtenir cette fréquence de résonance requise. Additionnellement, ou alternativement, il est possible de jouer sur la hauteur 2 de la cavité.

[28] Puis, dans une deuxième étape B) du procédé, la température de référence T_0

25 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 $\nu_{cj}(T_j)$ 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.

5 **[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
10 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 $1420.406 \text{ MHz} \pm 1$. 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 .

15

[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
20 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 1420.406
25 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 $60 \text{ kHz}^\circ\text{C}^{-1}$ et 0 (mais 0 exclus), de préférence entre environ $30 \text{ kHz}^\circ\text{C}^{-1}$ et 0 (mais 0 exclus), de préférence entre $20 \text{ kHz}^\circ\text{C}^{-1}$ et 0 (0 exclus) puisse être obtenue. Il est important de souligner que
30 même si ce graphique a été obtenu à partir d'un jeu de paramètres géométriques d'une cavité magnétron choisi, il a été démontré que le comportement de cette dépendance du FTC en fonction de la valeur de l'interstice e_i ne dépend pas de ces paramètres géométriques initialement choisis. En effet, pour des valeurs de l'interstice entre 0 et 1 mm, la valeur du FTC semble très vite passer d'une valeur relativement élevée, telle

qu'environ $70 \text{ kHz}^\circ\text{C}^{-1}$ ou environ $60 \text{ kHz}^\circ\text{C}^{-1}$ ou encore environ $50 \text{ kHz}^\circ\text{C}^{-1}$ quand l'interstice est proche de 0 mm (tel qu'entre 0.05 et 0.2 mm) vers des valeurs du FTC se rapprochant de 0 quand la valeur de l'interstice monte vers 1 mm ou au-delà. Donc, si, par exemple, un utilisateur souhaite obtenir une cavité magnétron ayant un FTC de d'environ $20 \text{ kHz}^\circ\text{C}^{-1}$, la dernière étape E) du procédé lui permet de déterminer la valeur de l'interstice e_i à utiliser, en particulier $e_i =$ environ 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, comme par exemple le Tableau 2, ou par tout autre méthode ou programme d'ordinateur approprié.

[32] Tableau 2 : exemple des valeurs de l'interstice, du FTC et du t_{gap} comme représenté dans la Figure 4 :

e_i (mm)	FTC ($\text{kHz}/^\circ\text{C}$)	t_{gap} (mm)
0.1	69.2	4.41
0.2	42.6	4.26
0.3	30.4	4.16
0.4	22.5	4.08
0.5	16.6	4.01
0.6	11.8	3.95
0.7	7.9	3.92
0.8	4.7	3.89
0.9	2.0	3.87
1.0	-0.4	3.85
1.1	-2.5	3.83
1.2	-4.4	3.82

[33] 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

5 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

10 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

15 relatives. On comprendra que ces termes sont interchangeable 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

- 5 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
- 10 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

15 fréquence de résonance ν_c de la cavité à une température de référence est la fréquence de résonance requise, en particulier 1420.406 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

20 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;

25

 - 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.
- 30 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 $20 \text{ kHz}^\circ\text{C}^{-1}$ en valeur absolue ou moins.
- 5 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 .
- 10 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
15 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.
20
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
25 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
30 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
35

- 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.
- 5
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 environ 0.1 mm et environ 2 mm et en ce qu'un coefficient fréquence-température est compris entre 0 et environ 70 kHz°C⁻¹ en valeur absolue, de préférence en ce que ledit interstice est compris entre environ 0.2 mm et environ 2 mm et en ce qu'un coefficient fréquence - température est compris entre 0 et environ 50 kHz°C⁻¹ en valeur absolue, de préférence en ce que ledit interstice est compris entre environ 0.3 mm et environ 2 mm et en ce qu'un coefficient fréquence - température est compris entre 0 et environ 30 kHz°C⁻¹ en valeur absolue.
- 10
- 15
- 20
- 25
11. Cavité magnétron selon la revendication 10, dans laquelle une distance circonférentielle (t_{gap}) entre deux électrodes adjacentes des au moins deux électrodes est ajustée pour qu'une fréquence de résonance de ladite cavité soit comprise dans 1420.406 MHz + /- 1 MHz.
- 30
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.
- 5
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.
- 10
15. Horloge atomique de type maser à hydrogène comprenant une cavité magnétron selon l'une quelconque des revendications précédentes 10 à 14.

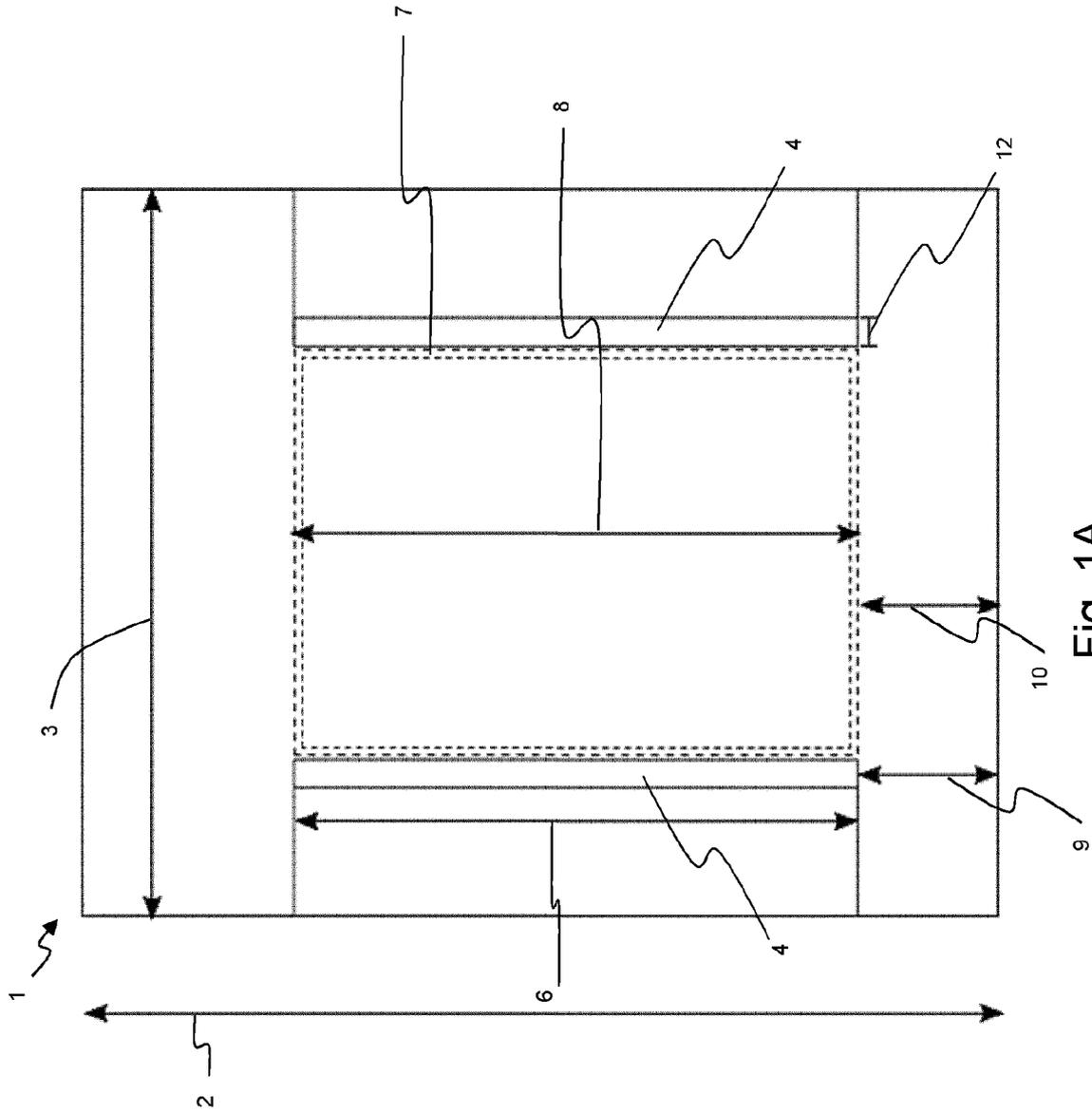


Fig. 1A

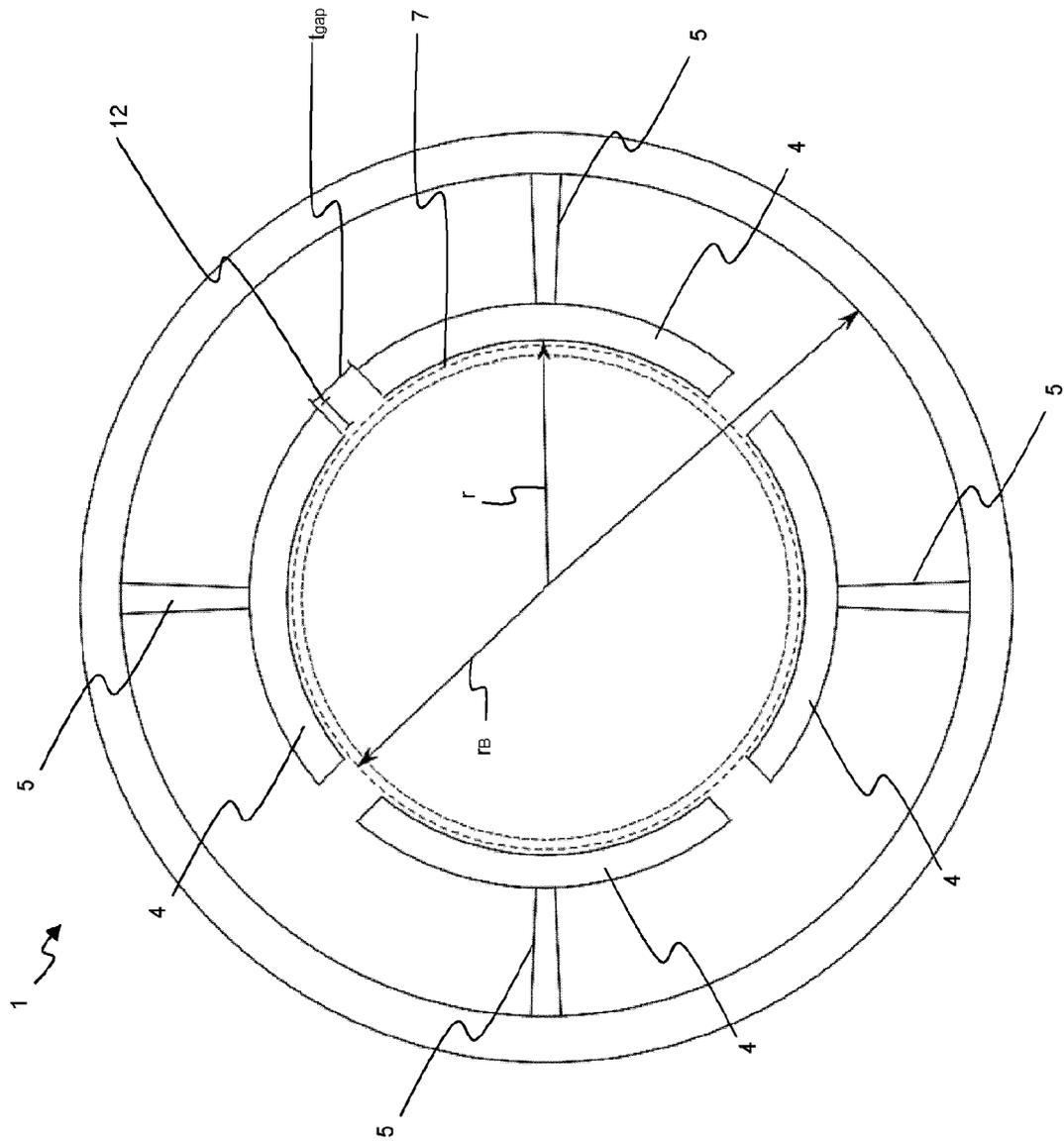


Fig. 1B

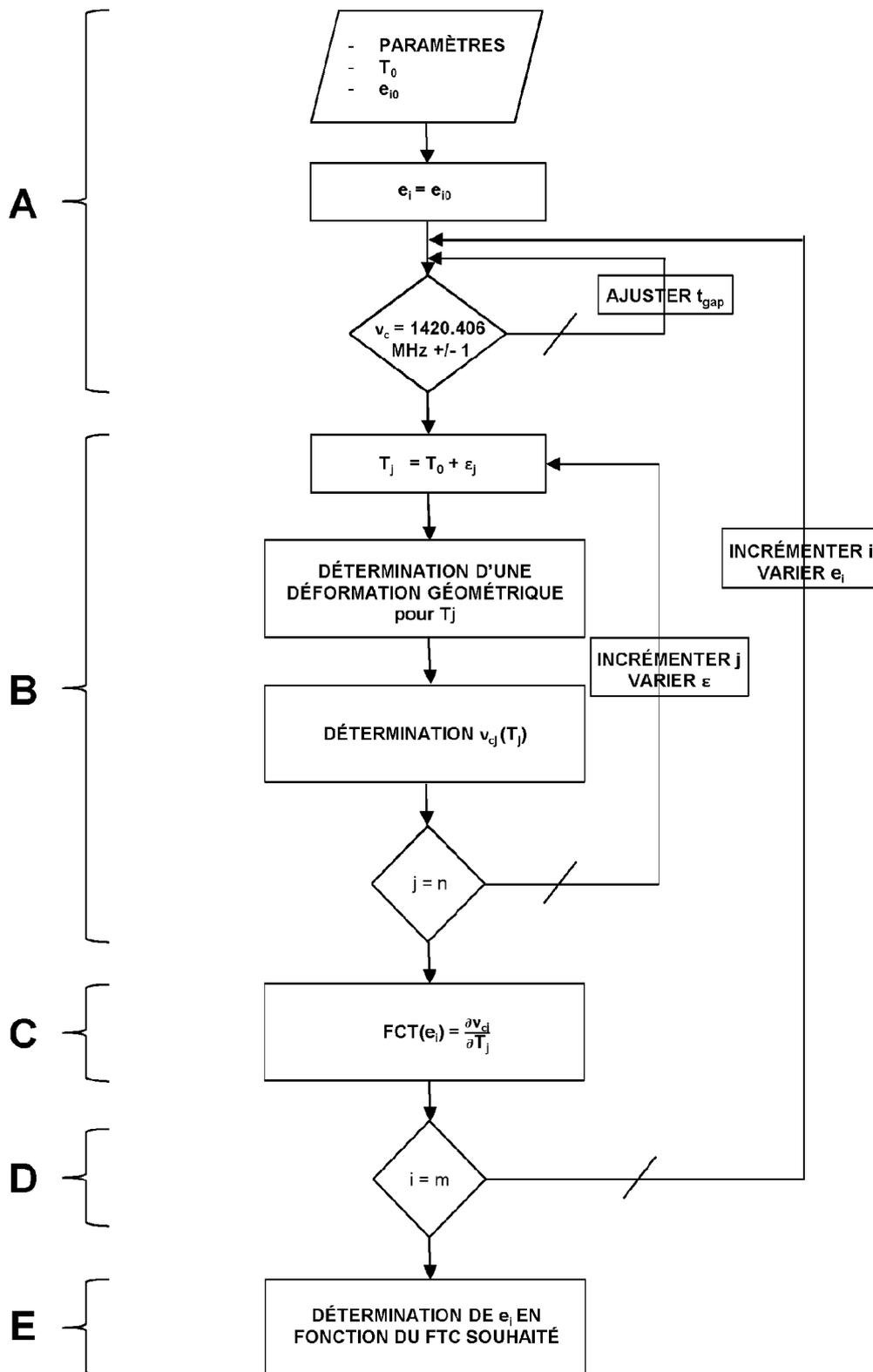


Fig. 2

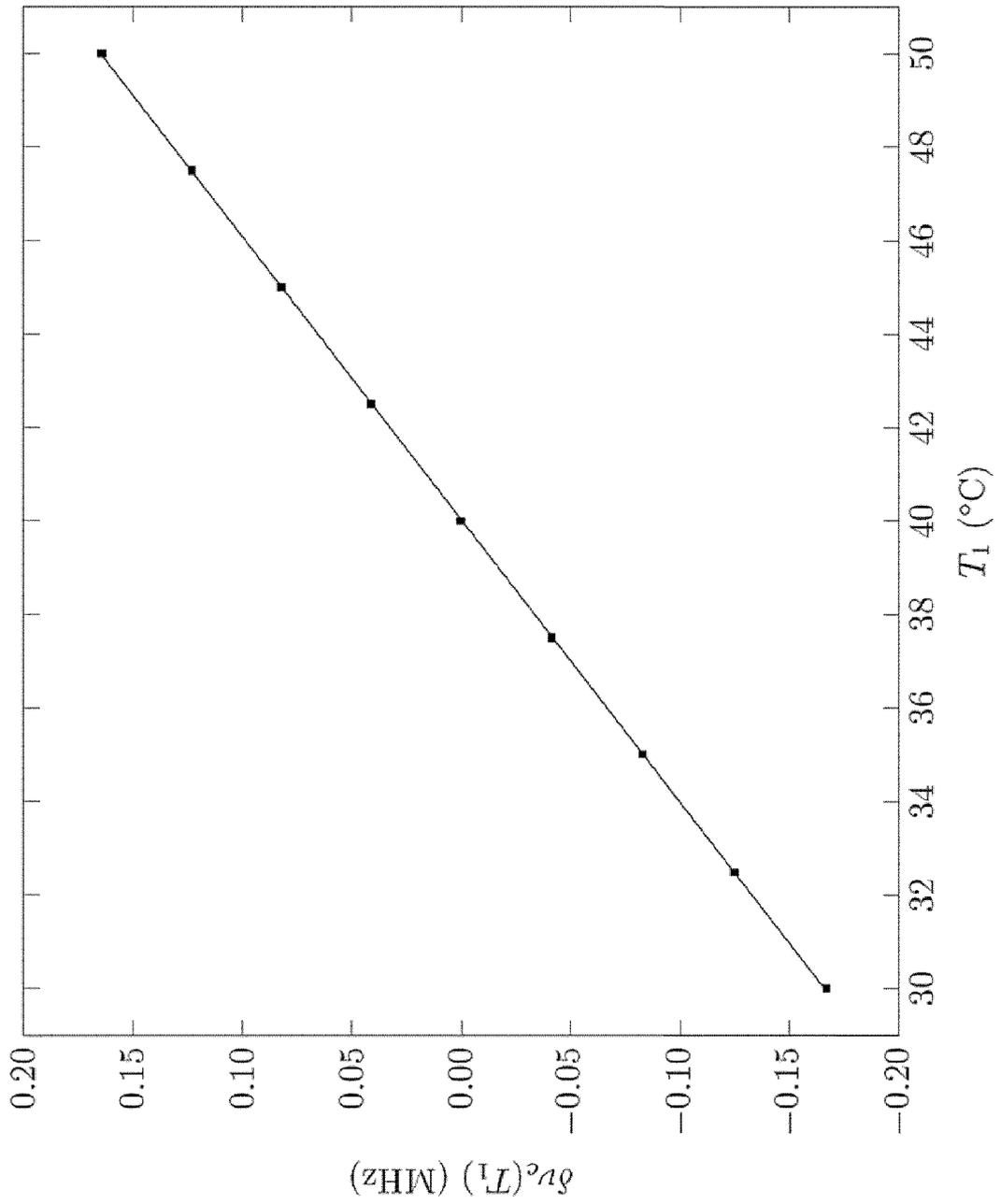


Fig. 3

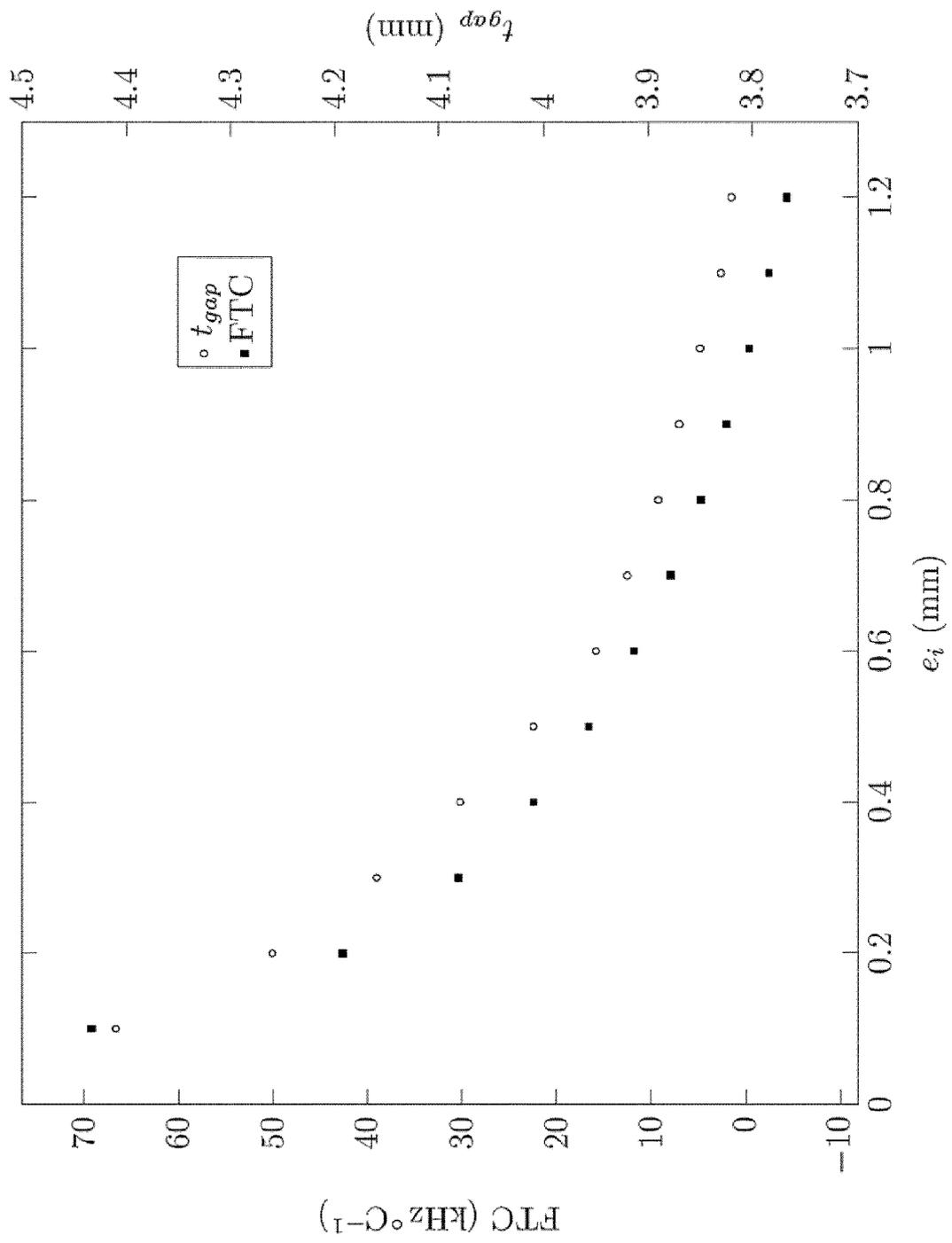


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2022/077947

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
G04F 5/14(2006.01)i; H01S 1/06(2006.01)i; H03L 7/26(2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G04F; H03L; H01S		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 4123727 A (PETERS HARRY E) 31 October 1978 (1978-10-31) cited in the application	1-8,10-15
A	column 2, line 56 - column 4, line 27 figures 1, 2	9
X	OPIE D B ET AL. "A high T/sub c/ superconducting resonator for a compact hydrogen maser" <i>FREQUENCY CONTROL, 1991., PROCEEDINGS OF THE 45TH ANNUAL SYMPOSIUM ON LOS ANGELES, CA, USA 29-31 MAY 1991, NEW YORK, NY, USA, IEEE, US,</i> 29 May 1991 (1991-05-29), pages 467-476 DOI: 10.1109/FREQ.1991.145937 ISBN: 978-0-87942-658-3. XP010040168	1-8,10-15
A	Paragraph "Introduction" figure 1	9
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 17 January 2023		Date of mailing of the international search report 24 January 2023
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Pirozzi, Giuseppe Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2022/077947

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	PELLATON M ET AL. "3D printed microwave cavity for atomic clock applications: proof of concept" <i>ELECTRONICS LETTERS, THE INSTITUTION OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, GB</i> , Vol. 54, No. 11, 31 May 2018 (2018-05-31), pages 691-693 DOI: 10.1049/EL.2017.4176 ISSN: 0013-5194, XP006067537	1-8,10-15
A	the whole document	9
X	US 4661782 A (WEIDEMANN WERNER [US]) 28 April 1987 (1987-04-28)	1-8,10-14
A	single figure column 4, line 53 - column 5, line 35 column 5, line 67 - column 6, line 66	9
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" <i>METROLOGIA, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, GB</i> , Vol. 49, No. 6, 21 November 2012 (2012-11-21), pages 816-820 DOI: 10.1088/0026-1394/49/6/816 ISSN: 0026-1394, XP020233330	1-9
	the whole document	
T	ANTON E. IVANOV ET AL. "Design of atomic clock cavity based on a loop-gap geometry and modified boundary conditions" <i>INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROWAVE AND WIRELESS TECHNOLOGIES, GB</i> , Vol. 9, No. 7, 27 June 2017 (2017-06-27), pages 1373-1386 DOI: 10.1017/S1759078717000691 ISSN: 1759-0787, XP055693597	
	the whole document	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/EP2022/077947

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US	4123727	A	31 October 1978	NONE	
US	4661782	A	28 April 1987	AT	79993 T 15 September 1992
				DE	3686555 T2 04 March 1993
				EP	0224093 A2 03 June 1987
				ES	2033670 T3 01 April 1993
				JP	H0754909 B2 07 June 1995
				JP	S62151002 A 06 July 1987
				US	4661782 A 28 April 1987

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
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	1-8, 10-15
A	Paragraphe "Introduction" figure 1	9
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	1-8, 10-15
A	le document en entier	9
X	US 4 661 782 A (WEIDEMANN WERNER [US]) 28 avril 1987 (1987-04-28)	1-8, 10-14
A	Figure unique colonne 4, ligne 53 - colonne 5, ligne 35 colonne 5, ligne 67 - colonne 6, ligne 66	9
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	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2022/077947

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
