



(11) **EP 4 553 586 A1**

(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
14.05.2025 Bulletin 2025/20

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
G04B 17/06 (2006.01) G04B 17/22 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **23208599.3**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
G04B 17/066; G04B 17/227

(22) Date de dépôt: **08.11.2023**

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Etats d'extension désignés:
BA
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

(72) Inventeurs:
• **Maier, Frédéric**
1228 Plan-les-Ouates (CH)
• **Bucaille, Jean-Luc**
1228 Plan-les-Ouates (CH)
• **Jeanneret, Sylvain**
1228 Plan-les-Ouates (CH)

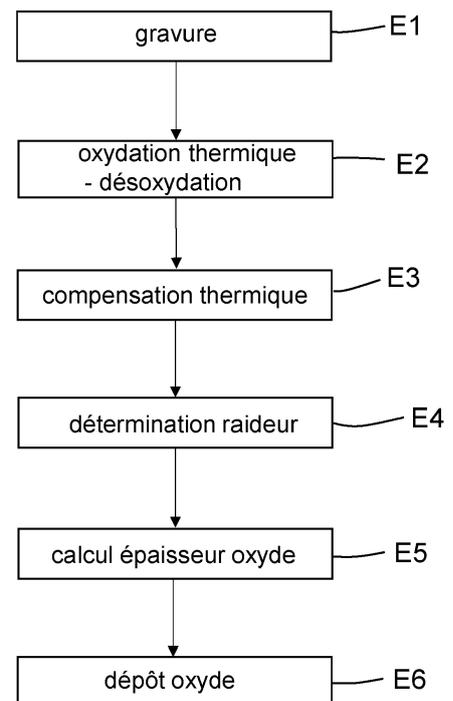
(71) Demandeur: **Patek Philippe SA Genève**
1204 Genève (CH)

(74) Mandataire: **Micheli & Cie SA**
Rue de Genève 122
Case Postale 61
1226 Genève-Thônex (CH)

(54) **PROCÉDÉ DE FABRICATION D'UN RESSORT DE RAPPEL DE RAIDEUR PRÉCISE POUR UN RÉSONATEUR HORLOGER**

(57) L'invention propose selon un premier mode de réalisation un procédé de fabrication d'un ressort de rappel pour résonateur horloger comprenant les étapes suivantes : a) former un ressort de rappel dans des dimensions inférieures aux dimensions nécessaires pour que le ressort de rappel ait une raideur prédéterminée ; b) déterminer la raideur du ressort de rappel ; c) à partir du résultat de l'étape b) calculer une épaisseur d'oxyde à déposer sur le ressort de rappel pour que ce dernier ait la raideur prédéterminée ; d) déposer ladite épaisseur d'oxyde sur le ressort de rappel à une température n'excédant pas 500°C afin que le ressort de rappel ait la raideur prédéterminée. Deux autres modes de réalisation impliquant eux aussi un dépôt d'oxyde à une température n'excédant pas 500°C sont également proposés.

Fig. 4



EP 4 553 586 A1

Description

[0001] La présente invention concerne la fabrication d'un ressort de rappel pour un résonateur horloger.

[0002] Dans un résonateur horloger tel qu'un balancier-spiral ou un résonateur à guidage flexible, un élément inertiel (balancier) oscille sous l'action d'un échappement qui lui communique des impulsions d'énergie mécanique et sous l'action d'un ressort de rappel (spiral ou guidage flexible du résonateur) qui le ramène dans une position d'équilibre. Dans le cas du balancier-spiral, le balancier est porté par un arbre dont les pivots tournent dans des paliers et le spiral est fixé à l'arbre par son extrémité intérieure et à un pont de bâti par son extrémité extérieure. Dans le cas d'un résonateur à guidage flexible, le balancier est suspendu à une base et guidé en rotation par un agencement de parties élastiques (le guidage flexible), qui sert aussi de ressort de rappel. Le résonateur constitue la base de temps d'un mouvement ou mécanisme horloger. Avec l'échappement, il forme un oscillateur. On utilise cependant parfois le terme « oscillateur » pour désigner le résonateur seul.

[0003] La présente invention concerne plus particulièrement la fabrication d'un ressort de rappel pour résonateur horloger par gravure d'une plaquette de matériau (« wafer »). Il est en effet maintenant bien connu dans l'horlogerie d'utiliser des techniques de gravure telles que la gravure ionique réactive profonde dite DRIE, la gravure chimique ou la gravure au laser pour fabriquer en grand nombre et de manière précise des composants horlogers. Le matériau de gravure le plus courant est le silicium.

[0004] Actuellement, sur une plaquette de matériau de gravure on grave généralement plusieurs centaines de composants. Les caractéristiques de gravure ne sont pas toujours stables dans le temps ni homogènes dans l'espace, de sorte qu'on peut constater une dispersion géométrique entre les composants de plaquettes différentes voire d'une même plaquette. Dans le cas des ressorts de rappel pour résonateurs, cela se traduit par une dispersion de raideur. Or la raideur est l'un des deux paramètres (l'autre étant le moment d'inertie du balancier) qui déterminent la fréquence du résonateur. Il est dès lors important de pouvoir la maîtriser avec le plus de précision possible.

[0005] On connaît par le brevet EP 3181938 un procédé de fabrication d'un spiral de raideur précise selon lequel a) on forme un spiral dans des dimensions supérieures aux dimensions nécessaires pour obtenir un spiral d'une raideur prédéterminée, b) on détermine la raideur du spiral formé lors de l'étape a) par mesure de la fréquence du spiral couplé avec un balancier doté d'une inertie prédéterminée, c) on calcule l'épaisseur de matériau à retirer pour obtenir le spiral d'une raideur prédéterminée et d) on retire du spiral formé lors de l'étape a) l'épaisseur de matériau calculée. Ce procédé nécessite d'éliminer de la matière, ce qui est peu économique.

[0006] Un autre brevet, EP 3181939, décrit un procédé de fabrication d'un spiral de raideur précise selon lequel a) on forme un spiral dans des dimensions inférieures aux dimensions nécessaires pour obtenir un spiral d'une raideur prédéterminée, b) on détermine la raideur du spiral formé lors de l'étape a) par mesure de la fréquence du spiral couplé avec un balancier doté d'une inertie prédéterminée, c) on calcule l'épaisseur de matériau manquante pour obtenir le spiral d'une raideur prédéterminée et d) on ajoute de la matière sur le spiral formé lors de l'étape a) pour compenser l'épaisseur de matériau manquante. L'inconvénient de ce procédé est que la matière qui est ajoutée sur le spiral modifie le coefficient thermoélastique (coefficient thermique du module de Young, dit CTE) et le coefficient de dilatation thermique du spiral. Si l'on souhaite thermocompenser le résonateur, c'est-à-dire rendre sa fréquence quasiment insensible aux variations thermiques en faisant par exemple subir au spiral une oxydation thermique, comme le proposent les brevets EP 3181938 et EP 3181939 en tant qu'étape supplémentaire du procédé, il est nécessaire de tenir compte de la perturbation causée par l'étape d) sur le coefficient thermoélastique et le coefficient de dilatation thermique, ce qui complique les calculs et l'étude théorique du spiral.

[0007] Les mêmes inconvénients que ceux mentionnés ci-dessus se retrouvent dans les procédés décrits dans d'autres brevets ou demandes de brevet, notamment EP 3416001 (relatif à un procédé de fabrication d'un résonateur à guidage flexible de fréquence précise), EP 3982205 (relatif à un procédé de fabrication d'un ressort horloger, en particulier guidage flexible ou partie de guidage flexible de résonateur, de raideur précise) et EP 4030242 (relatif à un procédé de fabrication de spiraux de raideur précise, de type itératif).

[0008] La présente invention vise à remédier aux inconvénients susmentionnés, ou au moins à les atténuer, et propose à cette fin, selon un premier mode de réalisation, un procédé de fabrication d'un ressort de rappel pour résonateur horloger comprenant les étapes suivantes :

- a) former un ressort de rappel dans des dimensions inférieures aux dimensions nécessaires pour que le ressort de rappel ait une raideur prédéterminée ;
- b) déterminer la raideur du ressort de rappel ;
- c) à partir du résultat de l'étape b), calculer une épaisseur d'oxyde à déposer sur le ressort de rappel pour que ce dernier ait la raideur prédéterminée ;
- d) déposer ladite épaisseur d'oxyde sur le ressort de rappel à une température n'excédant pas 500°C afin que le ressort de rappel ait la raideur prédéterminée.

[0009] Selon un deuxième mode de réalisation, la présente invention propose un procédé de fabrication d'un ressort de rappel pour résonateur horloger comprenant les étapes suivantes :

- a) former un ressort de rappel dans des dimensions inférieures aux dimensions nécessaires pour que le ressort de rappel ait une raideur située dans une plage prédéterminée ;
- b) déposer une épaisseur prédéterminée d'oxyde sur le ressort de rappel à une température n'excédant pas 500°C ;
- c) déterminer la raideur du ressort de rappel obtenu à l'étape b) ;
- d) répéter les étapes b) et c) si et tant que la raideur déterminée à l'étape c) n'est pas dans la plage prédéterminée.

[0010] Selon un troisième mode de réalisation, la présente invention propose un procédé de fabrication de ressorts de rappel pour résonateurs horlogers comprenant les étapes suivantes :

- a) former des ressorts de rappel dans une plaquette,
- b) identifier les ressorts de rappel ayant une raideur comprise dans une plage prédéterminée,
- c) optionnellement, détacher de la plaquette les ressorts de rappel identifiés à l'étape b),
- d) déposer, uniquement sur les autres ressorts de rappel, une couche d'oxyde à une température n'excédant pas 500°C pour que la raideur d'au moins une partie d'entre eux soit comprise dans la plage prédéterminée,
- e) détacher de la plaquette ces autres ressorts de rappel et, s'ils n'ont pas été détachés à l'étape c), les ressorts de rappel identifiés à l'étape b).

[0011] La présente invention concerne également un résonateur horloger comprenant un ressort de rappel fabriqué par l'un de ces deux procédés et une pièce d'horlogerie, par exemple une montre, comprenant un tel résonateur horloger.

[0012] La présente invention repose sur l'observation qu'un oxyde déposé à basse température ne modifie pas, ou quasiment pas, les caractéristiques thermiques (coefficient thermoélastique et coefficient de dilatation thermique) du matériau sur lequel il est déposé. Il est ainsi possible, avec la présente invention, d'ajuster la raideur du ressort de rappel indépendamment de la compensation thermique, donc de manière plus simple et plus fiable que dans la technique antérieure.

[0013] Déposer un oxyde à basse température sur un ressort de rappel pour résonateur horloger a déjà été proposé dans le brevet EP 3002638 mais dans un but contraire à celui de la présente invention, à savoir ajuster le coefficient thermoélastique du ressort. Pour permettre à l'oxyde d'avoir un effet sur le coefficient thermoélastique, le procédé décrit dans le brevet EP 3002638 fait suivre le dépôt d'oxyde d'un traitement thermique de recuit à une température d'au moins 550°C, de préférence comprise entre 800°C et 1050°C, ceci probablement pour densifier l'oxyde et lui donner une structure proche de celle de l'oxyde thermique classiquement utilisé pour la thermocompensation du silicium. Un tel traitement de recuit est volontairement omis dans la présente invention.

[0014] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée suivante faite en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 montre un spiral (avec sa virole) pour résonateur balancier-spiral ;
- la figure 2 montre un résonateur horloger à guidage flexible ;
- la figure 3 montre une partie de guidage flexible de résonateur horloger ;
- la figure 4 est un schéma-bloc d'un premier mode de réalisation du procédé selon l'invention ;
- la figure 5 est un schéma-bloc d'un deuxième mode de réalisation du procédé selon l'invention.

[0015] Le ressort de rappel pour résonateur horloger fabriqué par le procédé selon l'invention est par exemple (i) un spiral 1 tel qu'illustré à la figure 1, destiné à être monté sur l'axe d'un balancier pour former avec ce dernier un résonateur balancier-spiral, ou (ii) le guidage flexible d'un résonateur à guidage flexible 2 tel qu'illustré à la figure 2 et décrit dans le brevet EP 3839651, guidage flexible formé par exemple par une pièce 3 comprenant deux lames élastiques croisées 4, 5 et destinée à être assemblée au balancier 6 du résonateur, ou encore (iii) une partie de guidage flexible, par exemple une pièce 7 (cf. figure 3) comprenant une lame 8 et destinée à être assemblée tête bêche à une pièce identique pour former le guidage flexible d'un résonateur tel que décrit dans la demande de brevet WO 2022/009102. De manière générale, le ressort de rappel peut être une pièce à part entière ou une partie d'une pièce monolithique.

[0016] La fréquence d'oscillation d'un résonateur horloger est donnée par la formule suivante :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I}} \quad (1)$$

EP 4 553 586 A1

où K est la raideur du spiral ou du guidage flexible et I est le moment d'inertie du balancier.

[0017] La raideur K est donnée par des formules qui sont connues, par exemple :

- dans le cas d'un spiral à section de lame constante :

$$K = \frac{E \cdot h \cdot e^3}{12L} \quad (2)$$

- dans le cas d'un guidage flexible à lames croisées séparées (lames croisées s'étendant dans des plans parallèles) à section constante :

$$K = \frac{1}{6} \cdot E \cdot \frac{he^3}{L} \quad (3)$$

- dans le cas d'un guidage flexible à lames croisées non séparées (lames croisées s'étendant dans le même plan) à section constante :

$$K = \frac{2}{3} \cdot E \cdot \frac{he^3}{L} \quad (4)$$

- dans le cas d'un guidage flexible à centre de rotation déporté (RCC) à section de lames constante :

$$K = \frac{2}{3} \cdot E \cdot \frac{he^3}{L} \left(1 + \frac{3p}{L} + \frac{3p^2}{L^2} \right) \quad (5)$$

où E est le module d'élasticité du matériau utilisé, h est la hauteur de la lame du spiral ou de chaque lame du guidage flexible (dimension dans la direction de l'axe de rotation), e est l'épaisseur de la lame du spiral ou de chaque lame du guidage flexible, L est la longueur de la lame du spiral ou de chaque lame du guidage flexible et, dans le cas du RCC, p est la distance entre le point de croisement fictif des lames et l'extrémité de chaque lame la plus proche de ce point de croisement.

[0018] Les formules (2) à (5) ci-dessus peuvent être adaptées à un spiral ou guidage flexible dont la ou les lames ont une section variable. Ainsi, par exemple, dans le cas d'un spiral la raideur peut s'exprimer de la manière suivante :

$$K = \frac{E}{12} \cdot \frac{1}{\int_0^L \frac{1}{h(l) \cdot e^3(l)} \cdot dl} \quad (6)$$

[0019] La variation relative de fréquence d'un résonateur horloger en fonction de la température est donnée par la formule suivante :

$$\frac{df}{f} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E} \frac{dE}{dT} + 3\alpha_s - 2\alpha_b \right) \cdot dT \quad (7)$$

où df est la variation de fréquence, dT est la variation de température, $\frac{1}{E} \frac{dE}{dT}$ est la variation relative du module de Young en fonction de la température, c'est-à-dire le coefficient thermoélastique (CTE) du spiral ou du guidage flexible, α_s est le coefficient de dilatation thermique du spiral ou du guidage flexible, exprimé en ppm.°C⁻¹, et α_b est le coefficient de

dilatation thermique du balancier, exprimé en ppm.°C⁻¹. On cherche généralement à annuler cette variation de fréquence en fonction de la température en jouant sur le coefficient thermoélastique et le coefficient de dilatation thermique du spiral ou guidage flexible, typiquement en oxydant thermiquement le spiral ou guidage flexible lorsque celui-ci est en silicium de sorte que le signe du coefficient thermoélastique, initialement négatif, devienne positif pour que le terme $CTE+3\alpha_s$ puisse compenser le terme $2\alpha_b$.

[0020] Selon un premier mode de réalisation, le procédé selon l'invention comprend des étapes E1 à E6 illustrées à la figure 4.

[0021] A une première étape E1, on forme un ressort de rappel ayant la forme du ressort de rappel souhaité mais ayant des dimensions inférieures aux dimensions nécessaires pour que sa raideur soit égale à une raideur prédéterminée (raideur souhaitée). A l'étape E1, soit toutes les dimensions (hauteur h, épaisseur e et longueur L de la ou des lames du ressort de rappel) sont inférieures aux dimensions permettant d'obtenir la raideur prédéterminée, soit une partie seulement de ces dimensions est/sont inférieures aux dimensions permettant d'obtenir la raideur prédéterminée.

[0022] L'étape E1 est réalisée de préférence par gravure d'une plaquette de matériau. Typiquement, plusieurs ressorts de rappel, et même un grand nombre de ressorts de rappel, sont réalisés simultanément dans une même plaquette. La gravure peut être une gravure ionique réactive profonde (DRIE), une gravure chimique, une gravure au plasma, une gravure par faisceaux d'ions focalisés (FIB) ou une gravure au laser, par exemple. Le matériau peut être homogène ou composite. Il est par exemple à base de silicium, de quartz, de verre (minéral), de céramique (par exemple carbure de silicium ou nitrure de silicium), de carbone (cristallin ou amorphe), de métal ou d'alliage. Le matériau à base de silicium peut être du silicium monocristallin (quelle que soit son orientation cristalline, notamment {001} ou {111}), du silicium polycristallin ou du silicium amorphe. Il peut être dopé ou non. Le matériau choisi devra cependant avoir un point de fusion compatible avec l'étape E6 décrite ci-dessous. D'autres techniques de fabrication que la gravure peuvent être employées pour former le ressort de rappel, comme la croissance galvanique, la croissance par dépôt chimique en phase gazeuse ou la fabrication additive.

[0023] Parmi les techniques mentionnées ci-dessus, la plus précise est la gravure ionique réactive profonde. Des phénomènes qui interviennent pendant la gravure ou entre deux gravures successives peuvent néanmoins induire des variations géométriques.

[0024] A une deuxième étape E2, optionnelle, qui peut être mise en oeuvre en particulier lorsque le matériau de la plaquette est à base de silicium ou de carbure de silicium, le ressort de rappel, et plus généralement la plaquette sur laquelle il reste attaché avec les autres ressorts de rappel, est soumis à une opération d'oxydation thermique suivie d'une opération de désoxydation pour atténuer les défauts de surface du ressort de rappel et augmenter sa résistance mécanique, comme proposé par exemple dans le brevet EP 3769162. L'oxydation thermique est typiquement réalisée entre 600°C et 1300°C, de préférence entre 800°C et 1200°C, sous une atmosphère oxydante (dans un four d'oxydation) comprenant de la vapeur d'eau ou du gaz de dioxygène. La couche d'oxyde, typiquement de dioxyde de silicium (SiO₂), qui recouvre la plaquette et en particulier le ressort de rappel se forme en consommant du matériau de la plaquette, ce qui fait reculer l'interface entre le matériau de la plaquette et l'oxyde. L'opération de désoxydation qui suit consiste à éliminer la couche d'oxyde, par exemple par gravure humide, gravure en phase vapeur ou gravure sèche.

[0025] Une troisième étape E3 est mise en oeuvre lorsque le matériau du ressort de rappel réalisé à l'étape E1 ne peut pas à lui seul, par son coefficient thermoélastique (CTE) et son coefficient de dilatation thermique α_s , compenser le terme $2\alpha_b$ dans la formule (7) ci-dessus parce que par exemple son coefficient thermoélastique est de signe négatif. Le silicium, certains verres, le carbure de silicium et la plupart des métaux, par exemple, ont un coefficient thermoélastique de signe négatif. En revanche, certains alliages spécialement conçus pour la compensation thermique ont un coefficient thermoélastique de signe positif. Dans le cas donc d'un matériau à coefficient thermoélastique de signe négatif, on le soumet à l'étape E3 à une opération de compensation thermique visant à modifier le signe de son coefficient thermoélastique. On peut en variante mettre en oeuvre une compensation thermique visant à annuler sensiblement le terme $CTE+3\alpha_s$, quel que soit le signe du coefficient thermoélastique initial du ressort de rappel, lorsque le balancier est en un matériau à coefficient de dilatation α_b sensiblement nul.

[0026] L'opération de compensation thermique peut consister à former sur le matériau une couche ayant un coefficient thermoélastique de signe opposé à celui dudit matériau, par exemple à faire croître une couche de dioxyde de silicium par oxydation thermique (comme décrit ci-dessus) sur du silicium ou du carbure de silicium constituant le matériau de gravure de l'étape E1 ou à déposer une couche de dioxyde de silicium sur le matériau de gravure par dépôt chimique ou physique en phase vapeur (CVD, PVD). Alternativement, l'opération de compensation thermique peut consister à modifier la structure ou la composition selon une profondeur prédéterminée de tout ou partie de la surface du ressort de rappel, par exemple par cristallisation (si un matériau amorphe est utilisé à l'étape E1), dopage ou diffusion d'atomes interstitiels ou de substitution.

[0027] A la fin de l'étape E3, les dimensions du ressort de rappel sont encore inférieures aux dimensions nécessaires pour obtenir la raideur prédéterminée.

[0028] A une quatrième étape E4, on détermine la raideur du ressort de rappel obtenu à l'étape E1, le cas échéant à l'étape E2 ou E3. Cette détermination de raideur peut être directe, c'est-à-dire être réalisée sur le ressort de rappel lui-

même, ou indirecte, c'est-à-dire être réalisée sur un ou plusieurs autres ressorts de rappel fabriqués avec ledit ressort de rappel dans la plaquette, par exemple sur un ou plusieurs autres ressorts de rappel fabriqués dans la même zone de la plaquette que ledit ressort de rappel ou sur plusieurs autres ressorts de rappel répartis sur la plaquette et dont la moyenne des raideurs peut être considérée comme représentative de tous les ressorts de rappel de la plaquette.

5 **[0029]** Pour déterminer directement la raideur d'un ressort de rappel donné, on peut le coupler à un balancier d'inertie prédéterminée alors que le ressort de rappel est encore attaché à la plaquette ou après le détachement du ressort de rappel de la plaquette, mesurer la fréquence du résonateur ainsi formé et en déduire la raideur du ressort de rappel à l'aide de la formule (1) ci-dessus. Dans le cas où le ressort de rappel est un spiral, le balancier d'inertie prédéterminée peut être un balancier intégré à une machine à compter sur l'axe de travail duquel on monte le spiral. D'autres méthodes que celles
10 consistant à coupler le ressort de rappel à un balancier d'inertie prédéterminée peuvent être employées, par exemple celle consistant à coupler le ressort de rappel à un spiral de référence (cf. brevet EP 2423764) ou les méthodes décrites dans la demande de brevet EP 4030243.

[0030] Une méthode indirecte de détermination de la raideur du ressort de rappel fabriqué à l'étape E1 peut consister à détacher de la plaquette un échantillon de ressorts de rappel fabriqués avec ledit ressort de rappel et à déterminer la
15 moyenne des raideurs de ces ressorts de rappel, ledit ressort de rappel et d'autres ressorts de rappel fabriqués avec lui à l'étape E1 étant laissés sur la plaquette pour les étapes E5 et E6 décrites ci-dessous.

[0031] A une cinquième étape E5 on calcule, en utilisant le résultat de l'étape E4 et en s'aidant par exemple de l'une des formules (2) à (6) ci-dessus, une épaisseur d'oxyde à déposer sur le ressort de rappel obtenu à l'étape E1, le cas échéant à l'étape E2 ou E3, pour que la raideur dudit ressort de rappel soit égale à la raideur prédéterminée. L'épaisseur ou volume
20 d'oxyde à déposer peut être homogène ou non sur la surface du ressort de rappel. L'oxyde est de préférence du dioxyde de silicium (SiO_2), mais d'autres oxydes peuvent être envisagés tels que l'oxyde de germanium, de tantale, de zirconium ou d'hafnium.

[0032] A une sixième étape E6, une couche d'oxyde, de préférence de dioxyde de silicium, ayant l'épaisseur calculée à l'étape E5 est déposée sur le ressort de rappel pour lui donner la raideur prédéterminée. Afin de ne pas modifier les
25 caractéristiques thermiques (coefficient thermoélastique et coefficient de dilatation thermique) du matériau constituant le ressort de rappel, le dépôt d'oxyde est effectué à basse température, c'est-à-dire à une température qui reste inférieure ou égale à 500°C , de préférence inférieure ou égale à 400°C , de préférence inférieure ou égale à 300°C , de préférence inférieure ou égale à 200°C , de préférence inférieure ou égale à 150°C . Déposés à de telles températures, en effet, les oxydes ne sont pas suffisamment denses pour pouvoir avoir une influence sur les caractéristiques thermiques. La
30 température peut varier pendant le dépôt pour autant qu'elle ne dépasse pas les valeurs précitées. Cette couche d'oxyde est typiquement déposée par la technique de dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Elle peut néanmoins être déposée par d'autres techniques telles que le dépôt physique en phase vapeur (PVD), le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD), le dépôt chimique en phase vapeur à plasma haute densité (HDPCVD), le dépôt moléculaire en phase vapeur (MVD), le dépôt de couches atomiques (ALD) ou le procédé sol-gel.

35 **[0033]** Cette couche d'oxyde déposée à basse température non seulement ne perturbe pas les caractéristiques thermiques du ressort de rappel mais également ne modifie pas les propriétés du matériau de base, qu'il soit monocristallin, polycristallin ou amorphe.

[0034] Il est possible de répéter les étapes E4 à E6 pour affiner la valeur de raideur du ressort de rappel.

40 **[0035]** A la fin du procédé, le ressort de rappel ainsi que les autres ressorts de rappel encore situés dans la plaquette et qui ont subi le même traitement que ledit ressort de rappel sont détachés de la plaquette par rupture ou élimination des attaches (formées pendant la gravure de l'étape E1) qui les retenaient.

[0036] La figure 5 montre un deuxième mode de réalisation du procédé selon l'invention. Ce deuxième mode de réalisation diffère du premier mode de réalisation en ce qu'il est itératif (incrémental). Après des étapes F1, F2 et F3 identiques aux étapes E1, E2 et E3 du premier mode de réalisation, le deuxième mode de réalisation met en oeuvre une
45 étape F4 de dépôt à basse température d'une épaisseur prédéterminée d'oxyde, de préférence de dioxyde de silicium, sur le ressort de rappel. L'étape F4 est identique à l'étape E6 du premier mode de réalisation à l'exception du fait que l'épaisseur qui est déposée est prédéterminée plutôt que calculée à partir du résultat d'une mesure de raideur. A une étape suivante F5, la raideur du ressort de rappel est déterminée de la même manière qu'à l'étape E4 du premier mode de réalisation. Si la raideur se situe dans une plage prédéterminée, considérée comme acceptable (étape F6), le procédé se termine, par exemple par détachement du ressort de rappel de la plaquette. Si la raideur ne se situe pas dans la plage
50 prédéterminée, le procédé revient à l'étape F4 pour un dépôt d'oxyde à basse température supplémentaire (selon l'épaisseur prédéterminée) suivi d'une nouvelle détermination de la raideur (étape F5), la boucle se répétant jusqu'à ce que la raideur du ressort de rappel tombe dans la plage prédéterminée. L'épaisseur prédéterminée d'oxyde déposée à chaque étape F4 est choisie suffisamment petite pour que l'augmentation de raideur du ressort de rappel qu'elle provoque soit inférieure à la largeur de la plage prédéterminée, de préférence inférieure à la moitié de la largeur de la plage
55 prédéterminée, de préférence inférieure au quart de la largeur de la plage prédéterminée.

[0037] Un troisième mode de réalisation du procédé selon l'invention, non représenté, consiste à former plusieurs ressorts de rappel dans une plaquette, selon l'une quelconque des méthodes et l'un quelconque des matériaux décrits ci-

dessus en relation avec l'étape E1, à mettre en oeuvre optionnellement les étapes E2 et E3 décrites ci-dessus sur la plaquette, à déterminer la raideur de chacun des ressorts de rappel de la plaquette, à détacher de la plaquette les ressorts de rappel dont la raideur est comprise dans une plage prédéterminée, considérée comme acceptable, à laisser les autres ressorts de rappel sur la plaquette et à les couvrir (de la même manière qu'à l'étape E6) d'une couche d'oxyde, de

5 préférence de dioxyde de silicium, déposée à basse température, c'est-à-dire à une température qui reste inférieure ou égale à 500°C, de préférence inférieure ou égale à 400°C, de préférence inférieure ou égale à 300°C, de préférence inférieure ou égale à 200°C, de préférence inférieure ou égale à 150°C, afin que la raideur de ces autres ressorts de rappel, ou d'une partie d'entre eux, soit comprise dans la plage prédéterminée, et à détacher ces autres ressorts de rappel de la plaquette.

10 **[0038]** Ce troisième mode de réalisation reprend le principe exposé dans le brevet EP 3769161 à la différence que l'oxyde est déposé à basse température pour ne pas modifier les caractéristiques thermiques des ressorts de rappel. L'épaisseur de la couche d'oxyde peut être déterminée par calcul en fonction de la raideur desdits autres ressorts de rappel laissés sur la plaquette. La détermination de la raideur de chacun des ressorts de rappel peut être directe ou

15 indirecte, comme expliqué en relation avec l'étape E4. Par exemple, on peut déterminer la raideur de chaque ressort de rappel directement en couplant chacun d'entre eux à un balancier d'inertie déterminée et en mesurant la fréquence du résonateur ainsi formé, ou on peut déterminer directement la raideur de certains ressorts de rappel représentatifs de zones respectives de la plaquette et attribuer à chacun des autres ressorts de rappel la valeur de raideur du ressort de rappel représentatif de sa zone.

[0039] La plage prédéterminée est par exemple la deuxième moitié de la plage de dispersion de raideur des ressorts de rappel fabriqués dans la plaquette lors de la première étape. Pour les ressorts de rappel dont la raideur se trouve initialement dans la première moitié de ladite plage de dispersion, la couche d'oxyde qu'ils reçoivent permet de porter leur raideur à une valeur comprise dans la deuxième moitié de ladite plage de dispersion. On divise ainsi par deux la largeur de la plage de dispersion de raideur des ressorts de rappel fabriqués dans la plaquette, c'est-à-dire le nombre de classes de ces ressorts de rappel, où chaque classe comprend des ressorts de rappel ayant sensiblement la même raideur. On peut

25 aussi choisir une plage prédéterminée plus courte, par exemple le dernier tiers, le dernier quart, le dernier cinquième, etc. de la plage de dispersion de raideur des ressorts de rappel fabriqués dans la plaquette lors de la première étape, et effectuer plusieurs itérations pour diviser par trois, par quatre, par cinq, etc. le nombre de classes.

[0040] Dans une variante de ce troisième mode de réalisation, au lieu de détacher les ressorts de rappel de la plaquette dès que leur raideur est comprise dans la plage prédéterminée, on peut les laisser sur la plaquette et les protéger, au

30 moyen par exemple de masques, du dépôt d'oxyde effectué sur les autres ressorts de rappel, tous les ressorts de rappel étant alors détachés de la plaquette à la fin du procédé.

Revendications

- 35
1. Procédé de fabrication d'un ressort de rappel pour résonateur horloger, comprenant les étapes suivantes :
 - a) former un ressort de rappel dans des dimensions inférieures aux dimensions nécessaires pour que le ressort de rappel ait une raideur prédéterminée ;
 - 40 b) déterminer la raideur du ressort de rappel ;
 - c) à partir du résultat de l'étape b), calculer une épaisseur d'oxyde à déposer sur le ressort de rappel pour que ce dernier ait la raideur prédéterminée ;
 - d) déposer ladite épaisseur d'oxyde sur le ressort de rappel à une température n'excédant pas 500°C afin que le ressort de rappel ait la raideur prédéterminée.
 - 45 2. Procédé de fabrication d'un ressort de rappel pour résonateur horloger, comprenant les étapes suivantes :
 - a) former un ressort de rappel dans des dimensions inférieures aux dimensions nécessaires pour que le ressort de rappel ait une raideur située dans une plage prédéterminée ;
 - 50 b) déposer une épaisseur prédéterminée d'oxyde sur le ressort de rappel à une température n'excédant pas 500°C ;
 - c) déterminer la raideur du ressort de rappel obtenu à l'étape b) ;
 - d) répéter les étapes b) et c) si et tant que la raideur déterminée à l'étape c) n'est pas dans la plage prédéterminée.
 - 55 3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** l'étape a) comprend une étape de gravure, de préférence une étape de gravure ionique réactive profonde.
 4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** le ressort de rappel formé à l'étape

EP 4 553 586 A1

a) est à base de silicium, de quartz, de verre, de céramique, de carbone, de métal ou d'alliage.

5
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** le ressort de rappel formé à l'étape a) est à base de silicium.

10
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** l'étape consistant à déposer de l'oxyde sur le ressort de rappel à une température n'excédant pas 500°C est réalisée par dépôt chimique en phase vapeur, dépôt physique en phase vapeur, dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma, dépôt chimique en phase vapeur à plasma haute densité, dépôt moléculaire en phase vapeur, dépôt de couches atomiques ou dépôt sol-gel.

15
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** l'étape consistant à déposer de l'oxyde sur le ressort de rappel à une température n'excédant pas 500°C est réalisée par dépôt chimique en phase vapeur.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** l'oxyde est du dioxyde de silicium.

20
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce qu'il** comprend entre les étapes a) et b) une étape d'oxydation thermique du ressort de rappel suivie d'une étape de désoxydation.

25
10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce qu'il** comprend entre les étapes a) et b) une étape de compensation thermique visant à modifier le coefficient thermoélastique du ressort de rappel, par exemple à faire passer son signe de négatif à positif.

30
11. Procédé selon les revendications 9 et 10, **caractérisé en ce que** l'étape de compensation thermique est réalisée après les étapes d'oxydation thermique et de désoxydation.

35
12. Procédé selon la revendication 10 ou 11, **caractérisé en ce que** l'étape de compensation thermique comprend la formation d'une couche sur le ressort de rappel, ladite couche ayant un coefficient thermoélastique de signe opposé à celui du ressort de rappel.

13. Procédé selon la revendication 12, **caractérisé en ce que** ladite couche est en dioxyde de silicium.

40
14. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, **caractérisé en ce que** le ressort de rappel est un spiral.

45
15. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, **caractérisé en ce que** le ressort de rappel est un guidage flexible ou une partie de guidage flexible.

50
16. Procédé de fabrication de ressorts de rappel pour résonateurs horlogers, comprenant les étapes suivantes :

a) former des ressorts de rappel dans une plaquette,

b) identifier les ressorts de rappel ayant une raideur comprise dans une plage prédéterminée,

c) optionnellement, détacher de la plaquette les ressorts de rappel identifiés à l'étape b),

45
d) déposer, uniquement sur les autres ressorts de rappel, une couche d'oxyde à une température n'excédant pas 500°C pour que la raideur d'au moins une partie d'entre eux soit comprise dans la plage prédéterminée,

e) détacher de la plaquette ces autres ressorts de rappel et, s'ils n'ont pas été détachés à l'étape c), les ressorts de rappel identifiés à l'étape b).

55
17. Procédé selon la revendication 16, **caractérisé en ce qu'avant** l'étape e) les étapes b), c) et d) sont répétées une ou plusieurs fois.

18. Résonateur horloger comprenant un ressort de rappel fabriqué par le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 17.

55
19. Pièce d'horlogerie, par exemple montre, comprenant un résonateur horloger selon la revendication 18.

Fig. 1

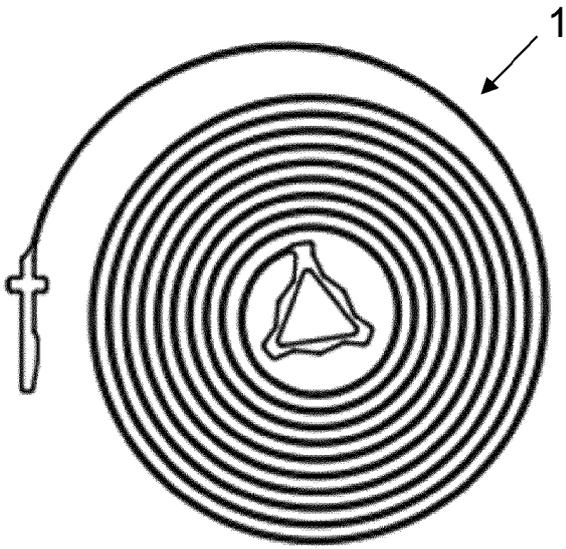


Fig. 2

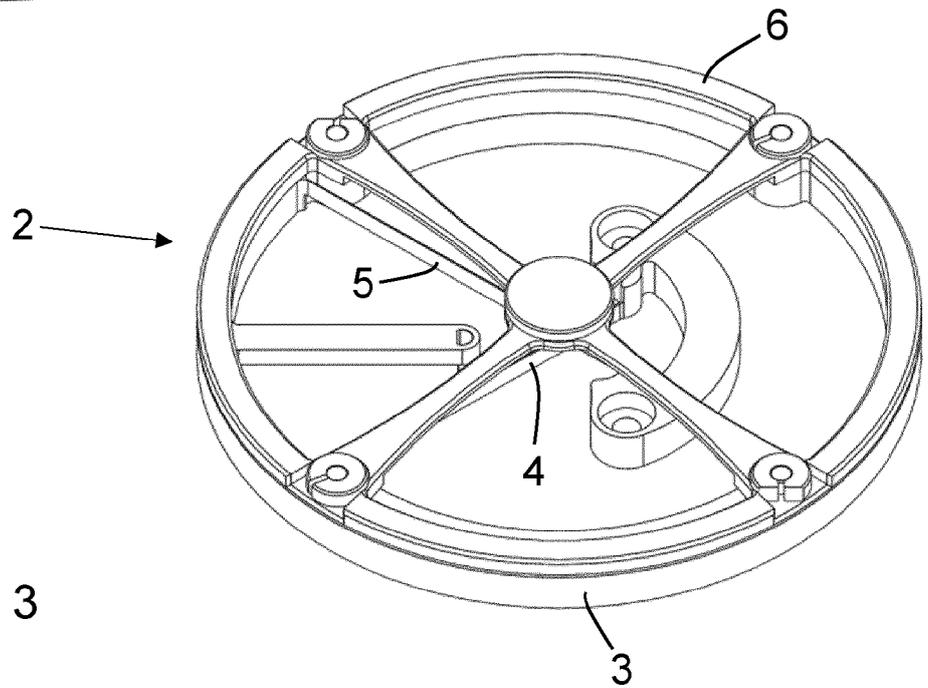


Fig. 3

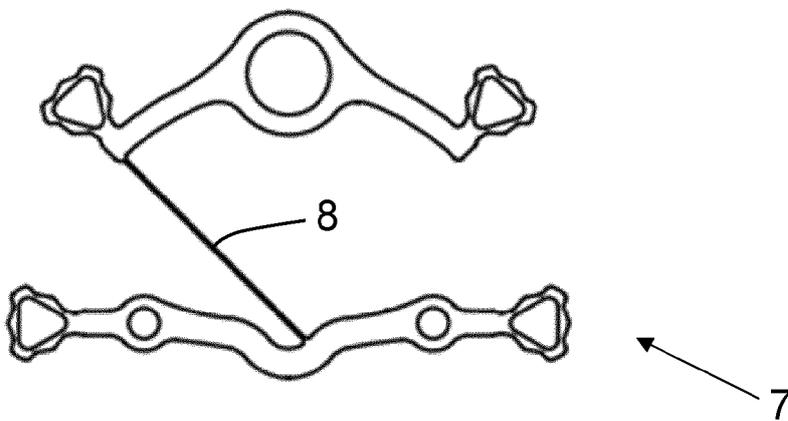


Fig. 4

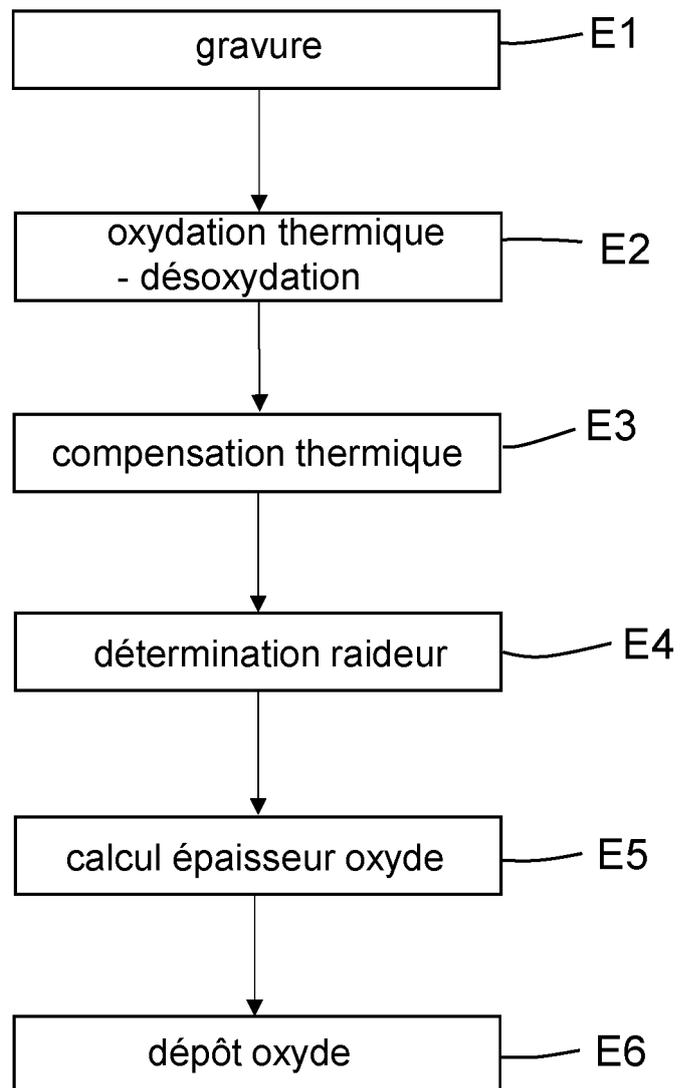
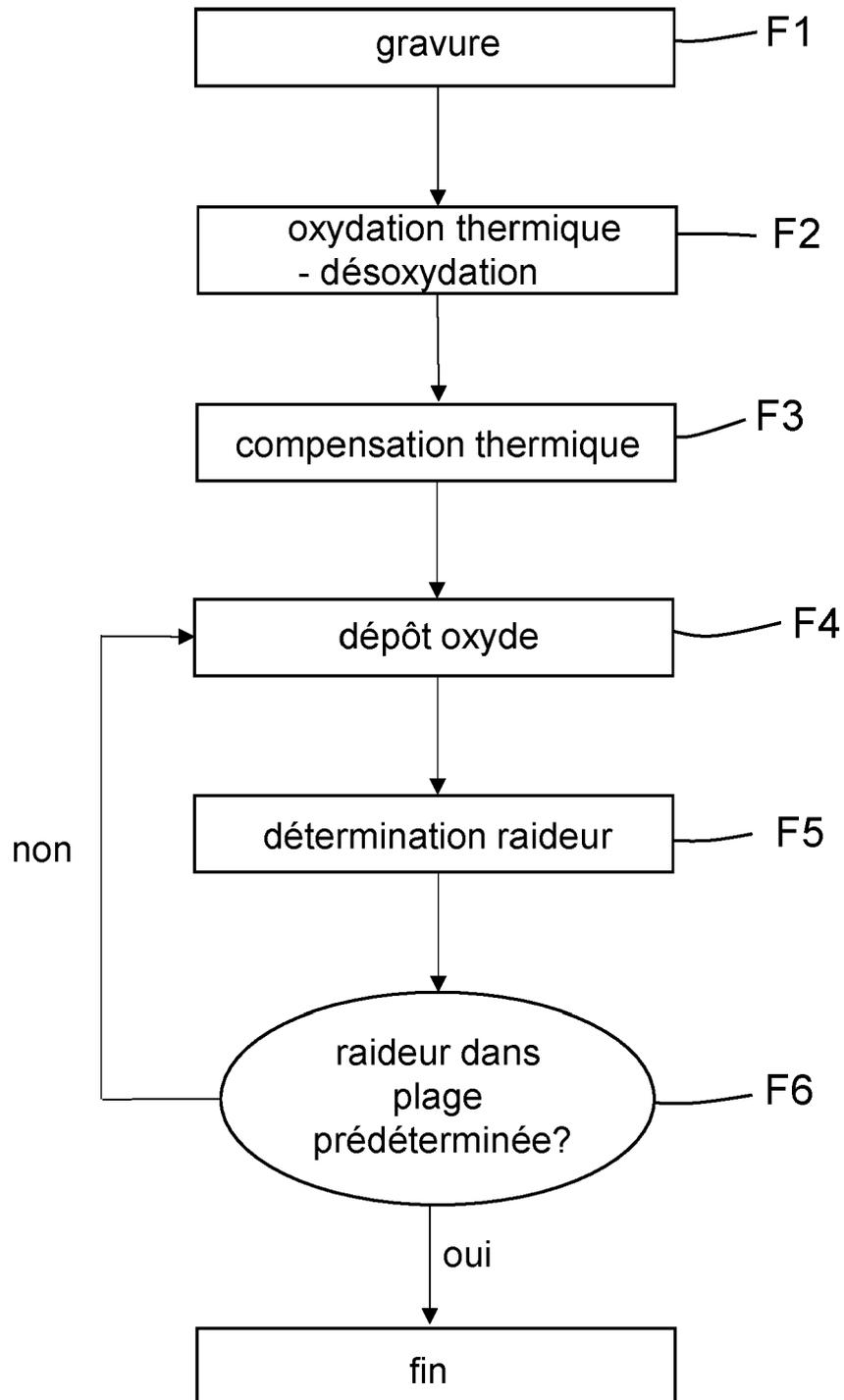


Fig. 5





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 23 20 8599

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

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	EP 3 982 205 A1 (PATEK PHILIPPE SA GENEVE [CH]) 13 avril 2022 (2022-04-13) * alinéa [0025] * * alinéas [0033] - [0035] * * alinéa [0041] * * alinéa [0049] *	1-19	INV. G04B17/06 G04B17/22
A	EP 3 769 161 B1 (PATEK PHILIPPE SA GENEVE [CH]) 13 avril 2022 (2022-04-13) * alinéa [0010] * * alinéa [0013] * * alinéa [0015] * * alinéa [0017] * * alinéa [0019] - alinéa [0020] * * alinéa [0023] * * alinéa [0028] *	1-19	
A	EP 3 181 939 A1 (CSEM CENTRE SUISSE D'ELECTRONIQUE ET DE MICROTECHNIQUE SA - RECH ET DÉ) 21 juin 2017 (2017-06-21) * alinéas [0034], [0035] * * alinéa [0037] * * alinéas [0044] - [0046] *	1-19	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) G04B
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 15 avril 2024	Examineur Marzocchi, Olaf
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 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 23 20 8599

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne 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.

15-04-2024

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 3982205	A1	13-04-2022	AUCUN	

EP 3769161	B1	13-04-2022	CN 111919176 A	10-11-2020
			EP 3769161 A1	27-01-2021
			JP 7227980 B2	22-02-2023
			JP 2021518537 A	02-08-2021
			TW 201945873 A	01-12-2019
			US 2021003971 A1	07-01-2021
			WO 2019180558 A1	26-09-2019

EP 3181939	A1	21-06-2017	CN 106997170 A	01-08-2017
			EP 3181939 A1	21-06-2017
			JP 6343652 B2	13-06-2018
			JP 2017111132 A	22-06-2017
			US 2017176942 A1	22-06-2017

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- EP 3181938 A [0005] [0006]
- EP 3181939 A [0006]
- EP 3416001 A [0007]
- EP 3982205 A [0007]
- EP 4030242 A [0007]
- EP 3002638 A [0013]
- EP 3839651 A [0015]
- WO 2022009102 A [0015]
- EP 3769162 A [0024]
- EP 2423764 A [0029]
- EP 4030243 A [0029]
- EP 3769161 A [0038]