



CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH** **714 706 B1**

(51) Int. Cl.: **G04B 17/06** (2006.01)
G04B 17/22 (2006.01)
G04B 17/04 (2006.01)

Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(12) **FASCICULE DU BREVET**

(21) Numéro de la demande: 00249/18

(22) Date de dépôt: 01.03.2018

(43) Demande publiée: 13.09.2019

(24) Brevet délivré: 28.02.2022

(45) Fascicule du brevet publié: 28.02.2022

(73) Titulaire(s):

CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique
SA Recherche et Développement, 1, rue Jaquet-Droz
2002 Neuchâtel (CH)

(72) Inventeur(s):

Jean-Luc Bucaille, 74160 Présilly (FR)
Frédéric Kohler, 1754 Avry-sur-Matran (CH)
Olivier Hunziker, 1800 Vevey (CH)

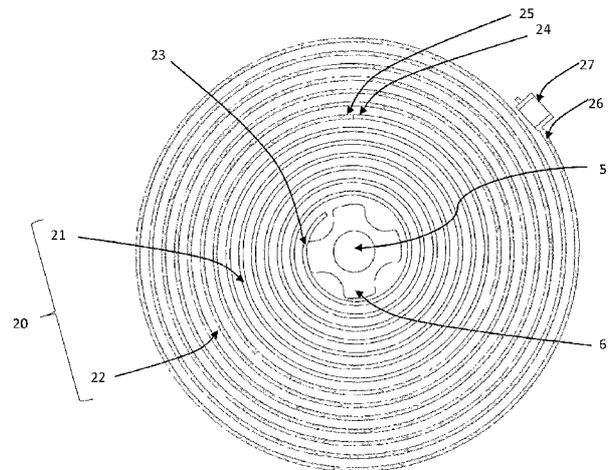
(74) Mandataire:

MOINAS & SAVOYE SARL, 19A, rue de la Croix-d'Or
1204 Genève (CH)

(54) **Ressort de rappel angulaire pour oscillateur thermo-compensé.**

(57) L'invention concerne un ressort de rappel angulaire (20) destiné à un assemblage avec un volant d'inertie pour former un oscillateur d'une pièce d'horlogerie, caractérisé en ce qu'il comprend un agencement d'au moins deux parties distinctes (21, 22), assemblées en série, dont les variations de raideur angulaire Ci en fonction de la température sont différentes, de manière apte à thermo-compenser ledit oscillateur d'une pièce d'horlogerie.

L'invention concerne également un oscillateur et une pièce d'horlogerie comprenant un tel ressort, ainsi que son procédé de fabrication.



Description

[0001] L'invention concerne un ressort de rappel angulaire pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie, ainsi qu'un oscillateur, un mouvement de pièce d'horlogerie et une pièce d'horlogerie en tant que tels qui comprennent un tel ressort de rappel angulaire, notamment un ressort spiral. Enfin, elle concerne aussi un procédé de fabrication d'un tel ressort de rappel.

[0002] La régulation des montres mécaniques repose sur au moins un oscillateur mécanique, qui comprend généralement un volant d'inertie, appelé balancier, et un ressort enroulé en forme de spirale, appelé ressort spiral ou plus simplement spiral. Le spiral peut être fixé par une extrémité sur l'axe du balancier et par l'autre extrémité sur une partie fixe de la pièce d'horlogerie, comme un pont, appelé coq, sur lequel pivote l'axe du balancier. Le ressort spiral équipant les mouvements de montres mécaniques de l'état de la technique se présente sous la forme d'une lame métallique élastique ou d'une lame en silicium préférentiellement de section rectangulaire, dont la majeure partie est enroulée sur elle-même en spirale d'Archimède. Le balancier-spiral oscille autour de sa position d'équilibre (ou point mort). Lorsque le balancier quitte cette position, il arme le spiral. Cela crée un couple de rappel qui agit sur le balancier pour tendre à le faire revenir vers sa position d'équilibre. Comme il a acquis une certaine vitesse, donc une énergie cinétique, le balancier dépasse son point mort jusqu'à ce qu'un couple contraire du spiral l'arrête et l'oblige à tourner dans l'autre sens. De cette manière, le spiral régule la période d'oscillation du balancier.

[0003] La précision d'une montre mécanique dépend de la régularité des oscillations de son oscillateur formé par le balancier et le spiral. Lorsque la température varie, la variation du module de Young E du spiral ainsi que les dilatations thermiques du spiral et du balancier modifient les propriétés de cet oscillateur, perturbant ainsi la précision de la montre.

[0004] Il existe des solutions de l'état de la technique qui essaient de réduire, voire de supprimer, les variations de fonctionnement d'un oscillateur avec la température. Une approche considère que la fréquence propre f d'un tel oscillateur dépend du rapport entre la constante du couple de rappel C, correspondant à la raideur angulaire du spiral, exercée par le spiral sur le balancier, et le moment d'inertie I, plus couramment appelé inertie I, de ce dernier, par la relation suivante :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{I}}$$

[0005] En dérivant l'équation précédente par rapport à la température, nous obtenons la variation thermique relative de la fréquence propre de l'oscillateur, qui s'exprime par :

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{E} \frac{dE}{dT} + 3\alpha_s - 2\alpha_b \right]$$

[0006] Où E est le module de Young du spiral de l'oscillateur,

$\frac{1}{E} \frac{dE}{dT}$ est le coefficient thermique de l'oscillateur, aussi dénommé simplement par l'acronyme CT,

$\frac{1}{E} \frac{dE}{dT}$ est le coefficient thermique du module de Young du spiral de l'oscillateur, aussi appelé par l'acronyme CTE,

α_s et α_b sont respectivement les coefficients de dilatation thermique du spiral et du balancier de l'oscillateur.

[0007] Différentes solutions de l'état de la technique cherchent à annuler la valeur du coefficient thermique CT de l'oscillateur en choisissant un CTE du spiral adapté à cet effet, pour thermo-compenser l'oscillateur.

[0008] Ainsi, des solutions de l'état de la technique reposent sur l'utilisation de plusieurs matériaux aux propriétés différentes répartis dans un même spiral de sorte à obtenir un oscillateur thermo-compensé de l'oscillateur comprenant ce spiral.

[0009] A titre d'exemple, le document EP1422436 décrit une solution reposant sur un spiral en silicium comprenant une couche d'oxyde. Cette solution nécessite une couche d'oxyde d'épaisseur importante. Sa fabrication nécessite de traiter le spiral durant un temps important à très haute température, ce qui représente un inconvénient. De manière générale, les spiraux thermo-compensés existants sont complexes à fabriquer.

[0010] Le but de l'invention est de fournir une autre solution de ressort de rappel pour pièce d'horlogerie qui permet la thermo-compensation d'un oscillateur de manière simple et fiable.

[0011] A cet effet, l'invention repose sur un ressort de rappel angulaire destiné à un assemblage avec un volant d'inertie pour former un oscillateur d'une pièce d'horlogerie, caractérisé en ce qu'il comprend un agencement d'au moins deux parties distinctes, assemblées en série, dont les variations de raideur angulaire en fonction de la température sont différentes, de sorte que ledit oscillateur d'une pièce d'horlogerie puisse être thermo-compensé.

[0012] L'invention est plus précisément définie par les revendications.

[0013] Ces objets, caractéristiques et avantages de la présente invention seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faits à titre non-limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

La figure 1 représente schématiquement un ressort de rappel angulaire sous forme d'un agencement en parallèle de deux spiraux pour constituer un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon un premier mode de réalisation de l'invention.

La figure 2 représente schématiquement un ressort de rappel angulaire sous forme d'un agencement en série de deux parties de spiral pour constituer un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon un deuxième mode de réalisation de l'invention.

La figure 3 représente schématiquement un ressort de rappel angulaire sous forme d'une variante d'un agencement en parallèle de deux spiraux pour constituer un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon le premier mode de réalisation de l'invention.

[0014] L'objectif de l'invention est de proposer un oscillateur thermo-compensé. Pour cela, il est recherché une solution approchant au maximum une valeur du coefficient thermique (CT) nulle pour l'oscillateur, dont les oscillations deviennent ainsi indépendantes ou quasi-indépendantes de la température.

[0015] Le mode de réalisation de l'invention repose sur une construction d'un ressort de rappel angulaire particulier, obtenu par un agencement d'au moins deux parties distinctes, choisies pour former un ressort de rappel angulaire qui peut être couplé avec un volant d'inertie prédéfini pour obtenir un oscillateur thermo-compensé.

[0016] L'invention va être illustrée plus en détail avec deux modes de réalisation dans lesquels un oscillateur pour pièce d'horlogerie se présente sous la forme d'un ensemble balancier-spiral. Chaque ressort de rappel angulaire de l'oscillateur comprend un agencement de deux parties distinctes en série, pouvant optionnellement comprendre de plus au moins deux parties distinctes en parallèle. Dans ces réalisations, chaque partie distincte forme un spiral ou une portion de spiral, comprenant une ou plusieurs spires ou portions de spire. On définit par spire une portion du spiral s'étendant selon un arc angulaire de l'ordre de 360° , et par portion de spire une portion s'étendant selon un arc angulaire inférieur à 360° . De plus, chaque spiral, spire ou portion de spire de ces modes de réalisation de l'invention se présente sous la forme d'une lame élastique préférentiellement de section rectangulaire, enroulée sur elle-même en spirale d'Archimède. Nous dénommerons e l'épaisseur et h la hauteur de cette section rectangulaire. De plus, nous dénommerons L la longueur curviligne d'un spiral, spire ou portion de spire. Cette longueur curviligne est définie comme l'écart entre deux 2 abscisses curvilignes, sur la fibre neutre de la spire. Enfin, nous appellerons I l'inertie du balancier, égale au produit de sa masse m par le carré du rayon de giration du balancier r .

[0017] Le premier mode de réalisation repose sur un ressort de rappel angulaire 10 d'un oscillateur, représenté par la figure 1, formé par l'agencement en parallèle d'au moins deux spiraux 11, 12, formant au moins deux parties distinctes dudit ressort de rappel. Nous entendons par l'expression „en parallèle“ un accrochage de chacun des au moins deux spiraux d'une part à l'arbre 5 de balancier, par exemple au moyen d'une ou de plusieurs viroles 6 reliées à leurs extrémités centrales, et d'autre part au pont de balancier, non représenté, par exemple au moyen d'un ou de deux pitons reliés à leurs extrémités périphériques 15, 16 respectives. Ce ressort de rappel angulaire agit sur un volant d'inertie ou balancier 1, relié à l'arbre 5 par des bras 2. L'ensemble forme un oscillateur mécanique. Dans cette réalisation représentée par la figure 1, les deux spiraux 11, 12 forment deux parties distinctes qui s'étendent globalement dans deux plans parallèles. Ces plans parallèles sont par ailleurs parallèles au plan du balancier 1 et perpendiculaires à l'arbre 5 de balancier. De plus, les deux spiraux 11, 12 sont parfaitement superposés. Leurs deux extrémités respectives sont superposées selon une direction parallèle à l'arbre 5 de balancier. En variante, ces extrémités pourraient être décalées. Selon une autre variante, les deux spiraux parallèles pourraient n'être que partiellement superposés. Ils peuvent comprendre chacun un nombre de spires égales ou différentes. Au moins un de ces deux spiraux en parallèle comprend de plus au moins deux parties, non représentées, assemblées en série.

[0018] La figure 3 illustre une variante de réalisation de ce premier mode de réalisation, dans laquelle les deux spiraux 11', 12' sont toujours agencés en parallèle, mais dans un même plan. Leurs deux extrémités centrales 13', 14' respectives sont fixées sur une même section de l'arbre 5' de balancier (dans un même plan perpendiculaire à l'arbre de balancier), en deux zones de liaison diamétralement opposées. Les deux extrémités périphériques 15', 16' se trouvent de même diamétralement opposées relativement à l'arbre 5' de balancier. Les deux spiraux 11', 12' sont ainsi intégralement positionnés dans un même plan perpendiculaire à l'arbre 5 de balancier. Ils sont imbriqués l'un dans l'autre. Leurs spires sont angulairement décalées de 180° . En variante, les points d'attaches à l'arbre 5' de balancier peuvent être décalés d'un autre angle que 180° et/ou les deux extrémités périphériques 15', 16' peuvent être positionnées respectivement avec un angle différent de 180° . Au moins un de ces deux spiraux en parallèle comprend de plus au moins deux parties, non représentées, assemblées en série.

[0019] Dans le cas de deux spiraux (ou spires ou portions de spire) agencés en parallèle, la contribution d'un spiral à la thermo-compensation est pondérée par sa contribution relative au couple de rappel, donc à la raideur angulaire.

[0020] Le couple de rappel du ressort de rappel angulaire est la somme des couples des deux spiraux. La fréquence propre f de l'oscillateur peut alors s'écrire par l'équation suivante :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{I}} \quad (1)$$

où I est l'inertie du balancier et Ci la raideur angulaire d'un spiral i.

[0021] L'inertie I du balancier et la raideur angulaire Ci du spiral i, qui est définie pour de la flexion pure, se calculent comme suit :

$$I = mr^2 \quad \text{et} \quad C_i = \frac{E_i e_i^3 h_i}{12 l_i}$$

où m est la masse du balancier, r le rayon de giration du balancier, Ei le module élastique du matériau du spiral i, ei l'épaisseur de la lame du spiral i, hi la hauteur de la lame du spiral i, et li la longueur curviligne du spiral i.

[0022] En introduisant les termes I et Ci dépendants de la température et en dérivant l'équation (1) par rapport à la température, on obtient - après réarrangement - l'équation suivante :

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sum_i C_i} \sum_i C_i \left(\frac{1}{E_i} \frac{dE_i}{dT} + \frac{3}{e_i} \frac{de_i}{dT} + \frac{1}{h_i} \frac{dh_i}{dT} - \frac{1}{l_i} \frac{dl_i}{dT} \right) - \frac{2}{r} \frac{dr}{dT} \right)$$

[0023] En considérant des matériaux homogènes et isotropes, ou en utilisant pour chaque matériau un coefficient de dilatation apparent adapté, le coefficient de dilatation thermique des matériaux $\alpha = 1/x \cdot dx/dT$ est identique pour les directions x explicitées ci-dessus (r, l, e et h). D'autre part, en définissant le terme CTE comme étant le coefficient thermique du module élastique $1/E_i \cdot dE_i/dT$, l'équation précédente peut être simplifiée comme suit :

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sum_i C_i} \sum_i C_i (CTE_i + 3\alpha_{s,i}) - 2\alpha_{bal} \right)$$

où $\alpha_{s,i}$ et α_{bal} sont respectivement les coefficients de dilatation thermique du spiral i et du balancier de l'oscillateur.

[0024] Dans le cas particulier du premier mode de réalisation comprenant deux spiraux (i=2), l'équation précédente devient :

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \frac{1}{2} \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} (CTE_1 + 3\alpha_{s,1}) + \frac{C_2}{C_1 + C_2} (CTE_2 + 3\alpha_{s,2}) - 2\alpha_{bal} \right) \quad (2)$$

[0025] La dilatation thermique α_{bal} du balancier étant connue et fonction du matériau employé, les matériaux des deux spiraux sont choisis de sorte à annuler cette équation (2).

[0026] En remarque, dans le cas d'un matériau anisotrope, par exemple le silicium, le coefficient thermique varie selon la direction cristalline de la sollicitation du matériau et varie donc sur la longueur du spiral (ou de la spire ou portion de spire). De même, dans le cas d'un matériau hétérogène, comme le silicium oxydé, le coefficient thermique varie à l'intérieur de la section de la lame. Un CTE équivalent ou apparent, connu de l'homme du métier, peut être ainsi considéré pour un spiral, ou une spire ou une portion de spire, formé en un matériau anisotrope et/ou hétérogène.

[0027] Dans le cas d'un balancier en CuBe2, sachant que la dilatation thermique du CuBe2 est positive (+17 [ppm/°C]), il faut choisir les matériaux des deux spiraux de manière à ce qu'au moins un des deux termes CTE+3 α_s soit positif pour annuler l'équation, notamment qu'au moins un des deux termes CTE+3 α_s soit supérieur à au moins deux fois α_{bal} pour annuler l'équation. Il suffira ensuite d'ajuster les dimensions des deux spiraux, en particulier leur raideur angulaire, pour obtenir le résultat escompté, à savoir une thermo-compensation de l'oscillateur.

[0028] A titre d'exemple, pour un oscillateur à 4Hz, nous prenons d'abord un balancier en CuBe2 d'une inertie de 14 mg·cm². Ensuite, nous considérons un premier spiral en silicium monocristallin, découpé dans un plan {100}, de propriétés et dimensions suivantes : Emoyen=148 MPa, α =2.6 ppm/°C, CTE= -64.3 ppm/°C, hauteur de 150 microns, longueur active de 150 mm. Nous considérons de plus un deuxième spiral agencé en parallèle, en SiO₂ amorphe, et de propriétés et dimensions suivantes : E=72.4 MPa, α =0.382 ppm/°C, CTE=210 ppm/°C, et de même hauteur et de même longueur active que le premier spiral. La fréquence de 4Hz est obtenue en choisissant C1+C2=8.84·10⁻⁷ N·m et la thermocompensation est alors assurée par le choix des épaisseurs de lame à 36.20 microns pour le silicium du premier spiral et à 36.73 microns pour l'oxyde de silicium du deuxième spiral.

[0029] A titre de deuxième exemple, toujours pour un oscillateur à 4Hz, si nous prenons un balancier en CuBe2 d'inertie 4.7 mg.cm2 et une hauteur de 120 microns et une longueur de 110 mm pour chacun des deux spiraux, dans les mêmes matériaux que ci-dessus, l'équation (2) donne des épaisseurs de 24.44 microns pour le premier spiral en silicium et de 24.80 microns pour le deuxième spiral en SiO₂ amorphe.

[0030] Il existe naturellement une multitude de possibilités d'agencement en parallèle de deux spiraux, dont les dimensions sont différentes, de sorte à annuler l'équation (2) ci-dessus et à obtenir un oscillateur thermo-compensé.

[0031] Le deuxième mode de réalisation repose sur un ressort de rappel angulaire 20 d'un oscillateur, représenté par la figure 2, formé par l'agencement en série d'au moins deux spires ou ensemble de spires ou portions de spires, que nous appellerons simplement au moins deux parties distinctes 21, 22. Par „en série“, nous entendons que les au moins deux parties distinctes sont assemblées l'une à l'autre par une de leurs extrémités. Une première partie 21 peut être attachée à l'arbre 5 de balancier, par son extrémité centrale 23, au moyen d'une virole 6, et au moins une deuxième partie 22 peut être attachée au pont par son extrémité périphérique 26, au moyen d'un piton 27. Les deux parties distinctes 21, 22 sont fixées entre elles par leurs extrémités respectives périphérique 25 et centrale 24. Le ressort de rappel angulaire 20 obtenu prend ainsi la forme d'un seul spiral continu, s'étendant dans un plan perpendiculaire à l'arbre 5 de balancier.

[0032] La raideur angulaire en flexion pure d'une lame de rigidité non uniforme sur sa longueur L est décrite par l'équation suivante :

$$C = \frac{1}{12 \int_0^L \frac{1}{E(l) e^3(l) h(l)} dl}$$

[0033] Pour plusieurs parties distinctes i agencées en série, cette équation devient :

$$C = \frac{1}{\sum_i \frac{12 l_i}{E_i e_i^3 h_i}} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{C_i}}$$

[0034] La fréquence f de l'oscillateur répond à l'équation :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{I \sum_i \frac{1}{C_i}}}$$

[0035] Finalement, la dérivée de cette équation par rapport à la température aboutit à :

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sum_i \frac{1}{C_i}} \sum_i \frac{1}{C_i} (CTE_i + 3\alpha_{s,i}) - 2\alpha_{bal} \right)$$

[0036] Comme le mode de réalisation comprend deux parties distinctes, cette équation peut s'écrire :

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \frac{1}{2} \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} (CTE_1 + 3\alpha_{s,1}) + \frac{C_1}{C_1 + C_2} (CTE_2 + 3\alpha_{s,2}) - 2\alpha_{bal} \right) \quad (3)$$

[0037] Dans le cas particulier d'un spiral formé par l'agencement en série de deux spires ou ensemble de spires ou portions de spires, la contribution de chaque partie à la thermo-compensation est pondérée par la raideur relative de l'autre partie.

[0038] La dilatation thermique α_{bal} du balancier étant connue pour un matériau donné, les matériaux des deux parties distinctes sont choisis de sorte à annuler cette équation (3), de manière similaire au premier mode de réalisation.

[0039] Par exemple, si le balancier est en CuBe2, sachant que la dilatation thermique du CuBe2 est positive (+17 [ppm/°C]), il faut choisir les matériaux des deux spiraux de manière à ce qu'au moins un des deux termes de forme CTE+3 α_s soit positif pour annuler l'équation (3), notamment qu'au moins un des deux termes CTE+3 α_s soit supérieur à au moins deux fois α_{bal} pour annuler l'équation (3). Il suffira ensuite d'ajuster les dimensions des deux parties distinctes pour obtenir le résultat escompté, à savoir une thermo-compensation de l'oscillateur.

[0040] A titre d'exemple, nous reprenons ici un oscillateur à 4Hz doté d'un balancier en CuBe2 d'une inertie de 14 mg·cm², tel que déjà décrit plus haut. Nous considérons de plus deux parties distinctes en série, comprenant une section identique de 150 microns de hauteur et de 40 microns d'épaisseur, l'une en silicium monocristallin découpé dans un plan {100}, de propriétés E_{moyen}=148 MPa, $\alpha=2.6$ ppm/°C et CTE= -64.3 ppm/°C, et l'autre en SiO₂ amorphe, de propriétés E=72.4 MPa, $\alpha=0.382$ ppm/°C et CTE=210 ppm/°C. L'équation (3) donne des longueurs curvilignes de portions de spires de 88.62 mm et 22.15 mm respectivement pour chacune des deux parties distinctes du ressort de rappel angulaire en série.

[0041] Nous considérons un deuxième exemple toujours à une fréquence de 4Hz avec un balancier en CuBe2, dont l'inertie est de 4.7 mg·cm² et par conséquent une raideur angulaire du spiral de 2.9688·10⁻⁷ N·m. Nous imposons comme contrainte que la section (épaisseur et hauteur) des deux spires ou portions de spire soit constante et que la longueur active totale soit de 110 mm. La hauteur des deux portions de spire est de 120 microns. Dans ce cas, afin d'obtenir une thermo-compensation parfaite selon l'équation (3), l'épaisseur doit être de 29.88 microns pour chacune des portions de spire et les longueurs sont de 88.01 mm pour la première portion de spire en silicium et de 21.99 mm pour la deuxième portion de spire en oxyde de silicium.

[0042] Dans un troisième exemple, nous considérons un même balancier mais en imposant une rigidité en flexion constante le long du spiral, ainsi qu'une hauteur également uniforme de 120 microns sur toute la longueur du spiral. La longueur totale du spiral est également définie à 110mm. Pour obtenir la thermocompensation de l'oscillateur 4Hz, la partie en silicium doit avoir une épaisseur de 28.05 microns et une longueur de 72.81 mm, alors que la partie en oxyde amorphe doit avoir une épaisseur de 35.60 microns et une longueur de 37.19 mm.

[0043] Cette variante de dimensionnement présente l'avantage de conférer au spiral un développement au cours de l'oscillation équivalent à celui d'un spiral plat de section constante et composé d'un seul matériau, qui est bien connu. Naturellement, l'invention ne se limite pas aux deux modes de réalisation décrits ci-dessus, ni aux exemples détaillés, ni même aux équations simples mentionnées en amont. Chaque terme de ces équations, notamment le CTE, peut être remplacé par son équivalent prenant en compte des variations spatiales ou structurelles (matériau hétérogène, anisotrope, section non rectangulaire, section non régulière sur la longueur, hauteur de la lame) Il apparaît qu'il existe une multitude de possibilités pour dimensionner un ressort de rappel pour pièce d'horlogerie selon l'invention, permettant de thermo-compenser un oscillateur.

[0044] Notamment, il est bien entendu possible, en variantes de réalisation, de réaliser un oscillateur comportant plus de deux parties distinctes, notamment trois ou quatre parties distinctes, dont au moins deux parties distinctes sont assemblées en série. De plus, ces parties distinctes peuvent être agencées en parallèle et/ou en série, afin de paramétrer au mieux le comportement thermique du ressort de rappel et de l'oscillateur. D'autre part, chaque partie distincte peut prendre différentes formes : un spiral, une ou plusieurs spires ou portions de spire, ces parties pouvant inclure des portions rectilignes. Dans le cas où chaque partie distincte est formée d'une ou plusieurs spires ou portions de spire, le ressort de rappel peut être qualifié de multi-spires.

[0045] D'autre part, les parties distinctes du ressort de rappel peuvent se trouver ou non dans un même plan. Une lame d'au moins une partie distincte du ressort de rappel, par exemple se présentant en forme de spires ou de portions de spire, peut présenter une section de toute forme, non nécessairement rectangulaire comme dans les modes de réalisation précédents. De plus, cette section peut rester constante sur toute sa longueur, ou au contraire varier. Enfin, le ressort de rappel peut se présenter sous la forme d'un spiral, comme envisagé dans les exemples précédents, ou en variante sous toute autre forme.

[0046] Nous entendons finalement par parties distinctes du ressort de rappel deux éléments distincts, qui sont positionnés dans un même agencement pour former ensemble le ressort de rappel. Dans cet agencement, ces parties distinctes participent ainsi de manière complémentaire à la même fonction de ressort de rappel, tout en apportant un effet de thermo-compensation de l'oscillateur. Ces parties distinctes peuvent être assemblées l'une à l'autre par tout moyen de fixation, ou simplement positionnées à proximité. Dans tous les cas, ces parties distinctes sont agencées de sorte à pouvoir coopérer avec un même volant d'inertie, et former un seul oscillateur de pièce d'horlogerie. Ces parties distinctes ne sont donc pas simplement deux zones d'un même ressort qui serait monobloc, indissociable, et/ou monolithique, même si ces deux zones peuvent présenter des matériaux différents.

[0047] Par définition de ces parties distinctes, l'invention permet donc la mise en oeuvre d'un procédé de fabrication d'un ressort de rappel qui peut comprendre une étape de fabrication séparée, indépendante, d'au moins deux parties distinctes, puis une étape d'assemblage de ces au moins deux parties distinctes, éventuellement par une liaison ou fixation entre elles, dans un même agencement, pour former un ressort de rappel, plus particulièrement un ressort de rappel angulaire, destiné à coopérer avec un même volant d'inertie. En alternative, l'invention permet la mise en oeuvre d'un procédé de fabrication d'un ressort de rappel d'un seul tenant résultant, par exemple, du gravage de deux wafers de deux matériaux distincts préalablement solidarisés.

[0048] Avantagusement, au moins deux parties distinctes du ressort de rappel angulaire se présentent en deux matériaux différents. Une partie distincte peut être monobloc. Elle peut être en un seul matériau, ou comprendre plusieurs matériaux différents, par exemple comprendre des zones en matériaux différents.

[0049] Dans tous les cas, le ressort de rappel de l'invention comprend au moins deux parties distinctes dont les variations de raideur angulaire C_i en fonction de la température, $CTE+3\alpha_s$, sont différentes, de sorte que ledit oscillateur comprenant ce ressort de rappel d'une pièce d'horlogerie est thermo-compensé.

[0050] Naturellement, une partie distincte du ressort de rappel peut se trouver dans tout autre matériau. De préférence, un matériau insensible aux champs magnétiques est privilégié, pour éviter des perturbations de la marche liées à l'aimantation résiduelle des composants soumis à un champ magnétique.

[0051] Au moins une partie distincte du ressort de rappel peut comprendre tout ou partie du silicium monocristallin, du silicium polycristallin, du silicium amorphe, du quartz, de l'oxyde de silicium amorphe, du silicium dopé, du silicium poreux, un alliage à base de Fe-Ni possédant un coefficient thermique du module de Young (ci-après CTE) positif, et/ou un alliage Nb-Zr-O.

[0052] Au moins une partie distincte du ressort de rappel peut comprendre un ou des matériaux isotropes. En variante, elle peut comprendre un matériau anisotrope, par exemple le silicium, dont le coefficient thermique varie selon la direction cristalline de la sollicitation du matériau et varie donc sur la longueur du spiral. Le silicium peut, par exemple, être revêtu d'une couche d'oxyde de silicium. Dans le cas d'un matériau hétérogène comme le silicium oxydé, le coefficient thermique varie à l'intérieur de la section de la lame du ressort de rappel. Un CTE équivalent ou apparent, connu de l'homme du métier, est ainsi considéré pour une partie distincte du ressort de rappel formée en un matériau anisotrope et/ou hétérogène, et les calculs précédents restent applicables sur cette base.

[0053] L'invention porte aussi sur un oscillateur de pièce d'horlogerie, un mouvement de pièce d'horlogerie et une pièce d'horlogerie, comme une montre, par exemple une montre-bracelet, comprenant un ressort de rappel tel que décrit précédemment.

[0054] Le balancier est par exemple réalisé en un alliage cuivre-béryllium, de manière connue (aussi appelé simplement alliage CuBe2), comme cela a été illustré dans les modes de réalisation précédents. En variante, d'autres matériaux peuvent être utilisés pour le balancier.

Revendications

1. Ressort de rappel angulaire (10, 10'; 20) destiné à un assemblage avec un volant d'inertie (1) pour former un oscillateur d'une pièce d'horlogerie, caractérisé en ce qu'il comprend un agencement d'au moins deux parties distinctes (11, 12; 11', 12'; 21, 22), assemblées en série, dont les variations de raideur angulaire C_i en fonction de la température sont différentes, de manière apte à thermo-compenser ledit oscillateur d'une pièce d'horlogerie.
2. Ressort de rappel angulaire (10, 10'; 20) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que les au moins deux parties distinctes (11, 12 ; 11', 12' ; 21, 22) se présentent en deux matériaux différents ou combinaisons différentes de plusieurs matériaux.
3. Ressort de rappel angulaire (10, 10'; 20) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'au moins deux des parties distinctes (11, 12 ; 11', 12' ; 21, 22) présentent des variations de la raideur angulaire C_i en fonction de la température de signes opposés.
4. Ressort de rappel angulaire (10, 10' ; 20) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend au moins deux parties distinctes (11, 12; 11', 12'; 21, 22) en des matériaux choisis parmi du silicium monocristallin, du silicium polycristallin, du silicium amorphe, du quartz, de l'oxyde de silicium amorphe, du silicium dopé, du silicium poreux.
5. Ressort de rappel angulaire (10, 10') selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend de plus au moins deux parties distinctes (11, 12; 11', 12') assemblées en parallèle,
6. Ressort de rappel angulaire (10') selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'il comporte au moins deux parties distinctes (11', 12') agencées en parallèle comprenant des lames situées dans un même plan.
7. Ressort de rappel angulaire (10, 10'; 20) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les au moins deux parties distinctes (11, 12; 11', 12'; 21, 22) se présentent sous la forme de ressorts spiraux, d'une ou plusieurs spires, de lames rectilignes, ou d'une combinaison de ressorts spiraux et de lames rectilignes.
8. Ressort de rappel angulaire (10, 10'; 20) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend au moins une partie distincte qui comporte une section variant sur la longueur de ladite partie distincte.
9. Oscillateur pour pièce d'horlogerie comportant un ressort de rappel angulaire (10, 10'; 20) selon l'une des revendications 1 à 8 assemblé avec un volant d'inertie (1).
10. Oscillateur selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'il comprend un balancier et un ressort de rappel angulaire (10, 10') comprenant au moins deux parties distinctes (11, 12 ; 11', 12') agencées en parallèle et présentant des raideurs angulaires C_i qui respectent sensiblement les deux équations suivantes :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sum C_i}{I}}$$

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sum C_i}{\sum C_i} \sum C_i (CTE_i + 3\alpha_{s,i}) - 2\alpha_{bal} \right)$$

où

f est la fréquence propre de l'oscillateur,

I est l'inertie du balancier,

CTE_i représente le coefficient thermique du module élastique de la partie distincte i,

α_{s,i} représente le coefficient de dilatation thermique de la partie distincte i,

α_{bal} représente le coefficient de dilatation thermique du balancier de l'oscillateur,

les matériaux et/ou les dimensions des parties distinctes i du ressort de rappel angulaire étant choisis pour annuler cette deuxième équation.

11. Oscillateur selon la revendication 9 ou 10, caractérisé en ce qu'il comprend un balancier (1) et un ressort de rappel angulaire (10, 10' ; 20) comprenant au moins deux parties distinctes agencées en série (21, 22) et présentant des raideurs angulaires C_i qui respectent sensiblement les deux équations suivantes :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{I \sum_i \frac{1}{C_i}}}$$

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sum_i \frac{1}{C_i}} \sum_i \frac{1}{C_i} (CTE_i + 3\alpha_{s,i}) - 2\alpha_{bal} \right)$$

où

f est la fréquence propre de l'oscillateur,

I est l'inertie du balancier,

CTE_i représente le coefficient thermique du module élastique de la partie distincte i,

α_{s,i} représente le coefficient de dilatation thermique de la partie distincte i,

α_{bal} représente le coefficient de dilatation thermique du balancier de l'oscillateur,

les matériaux et/ou les dimensions des parties distinctes i du ressort de rappel angulaire étant choisis pour annuler cette deuxième équation.

12. Oscillateur selon l'une des revendications 9 à 11, caractérisé en ce qu'il comprend un ressort de rappel angulaire (10, 10' ; 20) comportant au moins deux parties distinctes agencées (21, 22) en série et optionnellement au moins deux parties distinctes (11, 12 ; 11', 12') agencées en parallèle, et en ce que le ressort de rappel angulaire comprend une ou au moins deux attaches à l'axe de balancier et/ou une ou au moins deux attaches au bâti du mouvement d'horlogerie.
13. Pièce d'horlogerie, notamment montre, caractérisée en ce qu'elle comprend un ressort de rappel angulaire (10, 10' ; 20) selon l'une des revendications 1 à 8 ou un oscillateur selon l'une des revendications 9 à 12.
14. Procédé de fabrication d'un ressort de rappel angulaire (10, 10' ; 20) selon l'une des revendications 1 à 8 destiné à un assemblage avec un volant d'inertie (1) pour former un oscillateur d'une pièce d'horlogerie, caractérisé en ce qu'il comprend une étape de fabrication indépendante d'au moins deux parties distinctes (21, 22), puis une étape d'assemblage de ces au moins deux parties distinctes en série, par une liaison ou fixation entre elles, dans un même agencement, pour former un ressort de rappel angulaire destiné à coopérer avec un volant d'inertie pour former un oscillateur thermo-compensé pour pièce d'horlogerie.

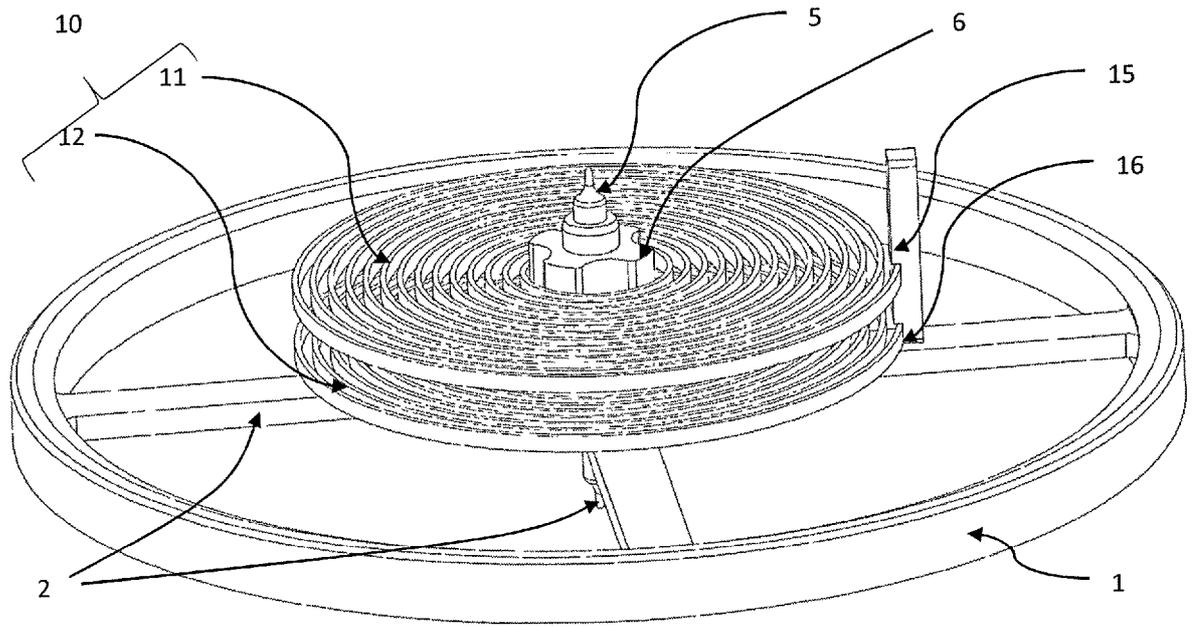


Figure 1

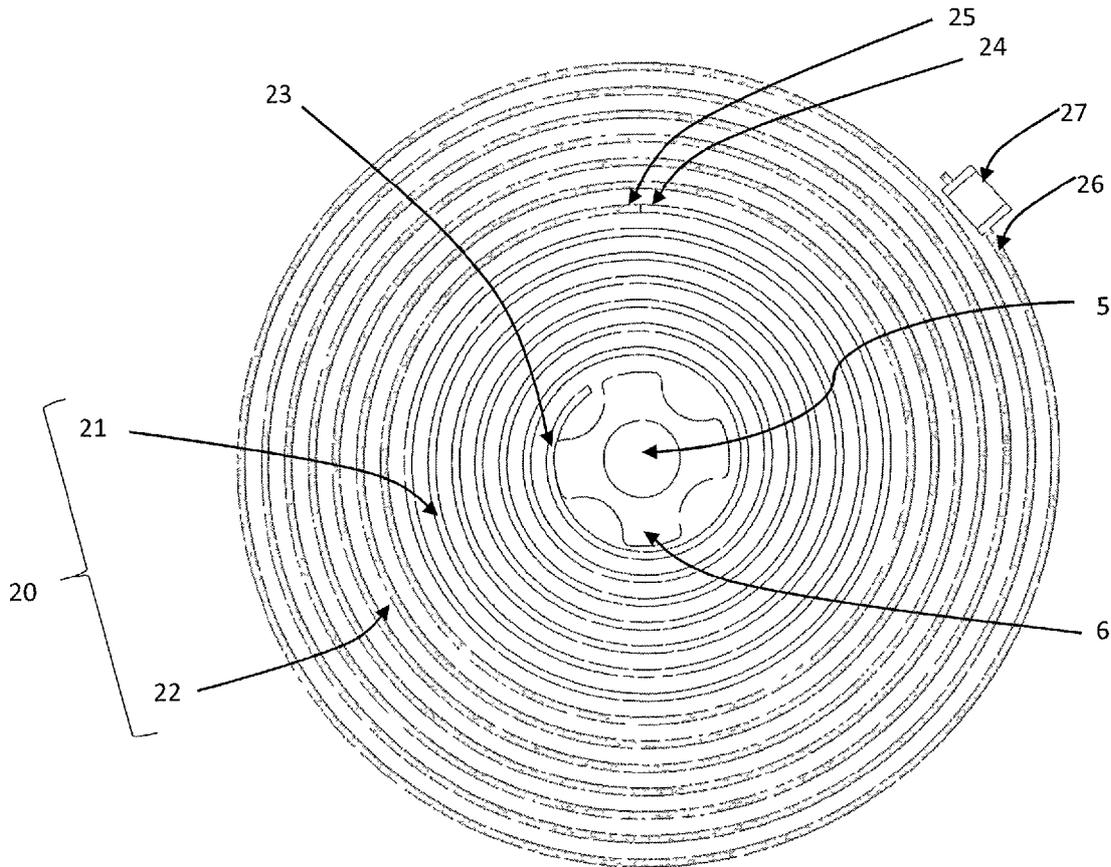


Figure 2

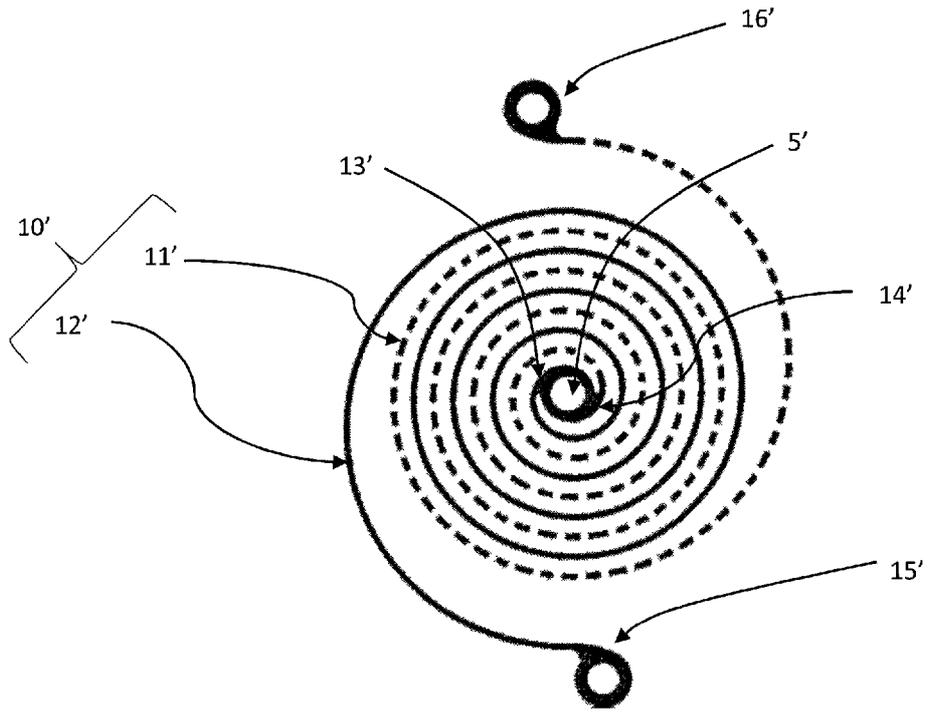


Figure 3