(19) CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) CH 711 960 B1

(51) Int. Cl.: G04B 17/06 (2006.01)
B81C 1/00 (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: 01869/15

(22) Date de dépôt: 18.12.2015

(43) Demande publiée: 30.06.2017

(24) Brevet délivré: 31.10.2017

(45) Fascicule du brevet publié: 31.10.2017

(73) Titulaire(s):
CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA – Recherche et développement, Rue Jaquet Droz 1
2002 Neuchâtel (CH)

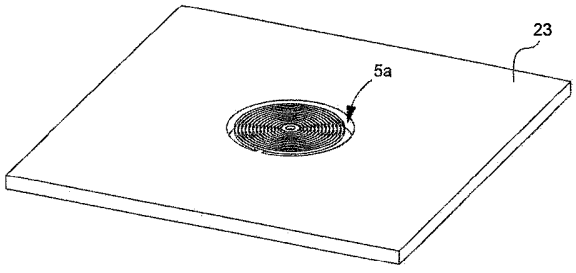
(72) Inventeur(s):
Philipp Niedermann, 2034 Peseux (CH)
Olivier Dubochet, 2562 Port (CH)

(74) Mandataire:
ICB Ingénieurs Conseils en Brevets SA,
Faubourg de l'Hôpital 3
2001 Neuchâtel (CH)

(54) Procédé de fabrication d'un spiral d'une raideur prédéterminée avec retrait de matière.

(57) L'invention se rapporte à un procédé de fabrication d'un spiral d'une raideur prédéterminée comportant les étapes de fabrication d'un spiral selon des dimensions surépaissies, de détermination de la raideur du spiral (5a) formé afin de retirer le volume de matériau pour obtenir le spiral aux dimensions nécessaires à ladite raideur prédéterminée.

Cette invention concerne le domaine de l'horlogerie.



Description

Domaine de l'invention

[0001] L'invention se rapporte à un procédé de fabrication d'un spiral d'une raideur prédéterminée et, plus précisément, un tel spiral utilisé comme spiral compensateur coopérant avec un balancier d'inertie prédéterminée pour former un résonateur comportant une fréquence prédéterminée.

Arrière-plan de l'invention

[0002] Il est expliqué dans le document EP 1 422 436, incorporé par référence à la présente demande, comment former un spiral compensateur comportant une âme en silicium revêtue de dioxyde de silicium et coopérant avec un balancier d'inertie prédéterminée pour compenser thermiquement l'ensemble dudit résonateur.

[0003] Fabriquer un tel spiral compensateur apporte de nombreux avantages mais possède également des inconvénients. En effet, l'étape de gravage de plusieurs spiraux dans une plaquette de silicium offre une dispersion géométrique non négligeable entre les spiraux d'une même plaquette et une dispersion plus grande entre des spiraux de deux plaquettes gravées à des moments différents. Incidemment, la raideur de chaque spiral gravé avec le même motif de gravage est variable en créant des dispersions de fabrication non négligeables.

Résumé de l'invention

[0004] Le but de la présente invention est de pallier tout ou partie les inconvénients cités précédemment en proposant un procédé de fabrication d'un spiral dont les dimensions sont suffisamment précises pour ne pas nécessiter de retouche.

[0005] A cet effet, l'invention se rapporte à un procédé de fabrication d'un spiral d'une raideur prédéterminée comportant les étapes suivantes:

a) former un spiral selon des dimensions supérieures aux dimensions nécessaires pour obtenir ledit spiral d'une raideur prédéterminée;

b) déterminer la raideur du spiral formé lors de l'étape a);

c) calculer l'épaisseur de matériau à retirer pour obtenir les dimensions nécessaires pour obtenir ledit spiral d'une raideur prédéterminée;

d) retirer du spiral formé lors de l'étape a), ladite épaisseur de matériau permettant d'obtenir le spiral aux dimensions nécessaires à ladite raideur prédéterminée.

[0006] On comprend donc que le procédé permet de garantir une très haute précision dimensionnelle du spiral et, incidemment, de garantir une raideur plus précise dudit spiral. Chaque paramètre de fabrication, pouvant induire des variations géométriques lors de l'étape a), peut ainsi être totalement rectifié pour chaque spiral fabriqué ou rectifié en moyenne pour l'ensemble des spiraux formés en même temps permettant de diminuer drastiquement le taux de rebut.

[0007] Conformément à d'autres variantes avantageuses de l'invention:

- lors de l'étape a), les dimensions du spiral formé lors de l'étape a) sont entre 1% et 20% supérieures à celles nécessaires pour obtenir ledit spiral à ladite raideur prédéterminée;
- l'étape a) est réalisée à l'aide d'un gravage ionique réactif profond ou d'un gravage chimique;
- lors de l'étape a), plusieurs spiraux sont formés dans une même plaquette selon des dimensions supérieures aux dimensions nécessaires pour obtenir plusieurs spiraux d'une raideur prédéterminée ou plusieurs spiraux de plusieurs raideurs prédéterminées;
- le spiral formé lors de l'étape a) est à base de silicium, de verre, de céramique, de métal ou d'alliage métallique;
- l'étape b) comporte les phases b1): mesurer la fréquence d'un ensemble comportant le spiral formé lors de l'étape a) couplé avec un balancier doté d'une inertie prédéterminée et b2): déduire de la fréquence mesurée, la raideur du spiral formé lors de l'étape a);
- selon une première variante, l'étape d) comporte les phases d1): oxyder le spiral formé lors de l'étape a) afin de transformer ladite épaisseur de matériau à base de silicium à retirer en dioxyde de silicium et ainsi former un spiral oxydé, et d2): retirer l'oxyde du spiral oxydé permettant d'obtenir le spiral aux dimensions nécessaires à ladite raideur prédéterminée;
- selon une deuxième variante, l'étape d) comporte la phase d3): graver chimiquement le spiral formé lors de l'étape a) afin d'obtenir le spiral aux dimensions nécessaires à ladite raideur prédéterminée.
- après l'étape d), le procédé effectue au moins une nouvelle fois les étapes b), c) et d) pour affiner la qualité dimensionnelle;
- après l'étape d), le procédé comporte, en outre, l'étape e): former, sur au moins une partie dudit spiral d'une raideur prédéterminée, une portion permettant de corriger la raideur du spiral et de former un spiral moins sensible aux variations thermiques;

- selon une première variante, l'étape e) comporte la phase e1): déposer une couche sur une partie de la surface externe dudit spiral d'une raideur prédéterminée;
- selon une deuxième variante, l'étape e) comporte la phase e2): modifier la structure selon une profondeur prédéterminée d'une partie de la surface externe dudit spiral d'une raideur prédéterminée;
- selon une troisième variante, l'étape e) comporte la phase e3): modifier la composition selon une profondeur prédéterminée d'une partie de la surface externe dudit spiral d'une raideur prédéterminée.

Description sommaire des dessins

[0008] D'autres particularités et avantages ressortiront clairement de la description qui en est faite ci-après, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux dessins annexés, dans lesquels:

la fig. 1	est une vue en perspective d'un résonateur assemblé selon l'invention;
la fig. 2	est un exemple de géométrie de spiral selon l'invention;
les fig. 3 à 6	sont des sections de spiral à différentes étapes du procédé selon l'invention;
la fig. 7	est une représentation en perspective d'une étape du procédé selon l'invention;
la fig. 8	est un diagramme du procédé selon l'invention.

Description détaillée des modes de réalisation préférés

[0009] Comme illustré à la fig. 1, l'invention se rapporte à un résonateur 1 du type balancier 3 – spiral 5. Le balancier 3 et le spiral 5 sont préférentiellement montés sur le même axe 7. Dans un tel résonateur 1, le moment d'inertie I du balancier 3 répond à la formule:

$$I = mr^2 \qquad (1)$$

dans laquelle m représente sa masse et r son rayon de giration qui dépend également de la température par l'intermédiaire du coefficient de dilatation α_b du balancier.

[0010] De plus, la raideur C du spiral 5 à section constante répond à la formule:

$$C = \frac{Ehe^3}{12L} \qquad (2)$$

dans laquelle E est le module d'Young du matériau utilisé, h sa hauteur, e son épaisseur et L sa longueur développée.

[0011] De plus, la raideur C d'un spiral 5 à section variable répond à la formule:

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

dans laquelle E est le module d'Young du matériau utilisé, h sa hauteur, e son épaisseur, L sa longueur développée et l l'abscisse curviligne le long de la spire.

[0012] De plus, la raideur C d'un spiral 5 à épaisseur variable mais à hauteur constante répond à la formule:

$$C = \frac{Eh}{12}\frac{1}{\int_0^L \frac{1}{e^3(l)}dl} \qquad (4)$$

dans laquelle E est le module d'Young du matériau utilisé, h sa hauteur, e son épaisseur, L sa longueur développée et l l'abscisse curviligne le long de la spire.

[0013] Enfin, la fréquence f du résonateur 1 balancier-spiral répond à la formule:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C}{I}} \qquad (5)$$

[0014] Selon l'invention, il est souhaité que la variation de la fréquence en fonction de la température d'un résonateur soit sensiblement nulle. La variation de la fréquence f en fonction de la température T dans le cas d'un résonateur balancier-spiral suit sensiblement la formule suivante:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{2}\left\{\frac{\partial E}{\partial T}\frac{1}{E} + 3\cdot\alpha_s - 2\cdot\alpha_b\right\}\cdot\Delta T \qquad (6)$$

où:
– $\frac{\partial f}{f}$ est la variation relative de fréquence;
– ΔT est la variation de la température;
– $\frac{\partial E}{\partial T}\frac{1}{E}$ est la variation relative du module d'Young en fonction de la température, c'est-à-dire le coefficient thermoélastique (CTE) du spiral;
– α_s est le coefficient de dilatation du spiral, exprimé en ppm. $°C^{-1}$;
– α_b est le coefficient de dilatation du balancier, exprimé en ppm. $°C^{-1}$.

[0015] Les oscillations de tout résonateur destiné à une base de temps ou de fréquence devant être entretenues, la dépendance thermique comprend également une contribution éventuelle du système d'entretien comme, par exemple, un échappement à ancre suisse (non représenté) coopérant avec la cheville 9 du plateau 11 également monté sur l'axe 7.

[0016] On comprend donc, à partir des formules (1)–(6), qu'il est possible d'appairer le spiral 5 avec le balancier 3 afin que la fréquence f du résonateur 1 soit quasiment insensible aux variations de température.

[0017] L'invention concerne plus particulièrement un résonateur 1 dans lequel le spiral 5 est utilisé pour compenser l'ensemble du résonateur 1, c'est-à-dire toutes les parties et notamment le balancier 3. Un tel spiral 5 est généralement appelé un spiral compensateur. C'est pourquoi, l'invention se rapporte à un procédé de fabrication permettant de garantir une très haute précision dimensionnelle du spiral et, incidemment, de garantir une raideur plus précise dudit spiral.

[0018] Selon l'invention, le spiral compensateur 5, 15 est formé à base d'un matériau, éventuellement revêtu d'une couche de compensation thermique, et destiné à coopérer avec un balancier 3 d'inertie prédéterminée. Toutefois, rien n'empêche de prévoir un balancier avec des masselottes déplaçables permettant d'offrir un paramètre de réglage avant ou après la vente de la pièce d'horlogerie.

[0019] L'utilisation d'un matériau, par exemple à base de silicium, de verre ou de céramique, pour la fabrication d'un spiral 5, 15 offre l'avantage d'être précis par les méthodes de gravage existantes et de posséder de bonnes propriétés mécaniques et chimiques en étant notamment très peu sensible aux champs magnétiques. Il doit en revanche être revêtu ou modifié superficiellement pour pouvoir former un spiral compensateur.

[0020] Préférentiellement, le matériau à base de silicium utilisé comme spiral compensateur peut être du silicium monocristallin quelle que soit son orientation cristalline, du silicium monocristallin dopé quelle que soit son orientation cristalline, du silicium amorphe, du silicium poreux, du silicium polycristallin, du nitrure de silicium, du carbure de silicium, du quartz quelle que soit son orientation cristalline ou de l'oxyde de silicium. Bien entendu d'autres matériaux peuvent être envisagés comme un verre, une céramique, un cermet, un métal ou un alliage métallique. Par simplification, l'explication ci-dessous sera portée sur un matériau à base de silicium.

[0021] Chaque type de matériau peut être modifié superficiellement ou revêtu d'une couche afin de compenser thermiquement le matériau de base comme expliqué ci-dessus.

[0022] Si l'étape de gravage de spiraux dans une plaquette à base de silicium, au moyen d'un gravage ionique réactif profond (également connu sous l'abréviation «D.R.I.E.»), est la plus précise, des phénomènes qui interviennent pendant le gravage ou entre deux gravages successifs peuvent néanmoins induire des variations géométriques.

[0023] Bien entendu, d'autres types de fabrication peuvent être mis en œuvre, comme le gravage laser, le gravage ionique localisé (connu sous l'abréviation anglaise «F.I.B.»), la croissance galvanique, la croissance par dépôt chimique en phase gazeuse ou le gravage chimique, qui sont moins précis et pour lesquels le procédé aurait encore plus de sens.

[0024] Ainsi, l'invention se rapporte à un procédé 31 de fabrication d'un spiral 5c. Selon l'invention, le procédé 31 comporte, comme illustré à la fig. 8, une première étape 33 destinée à former au moins un spiral 5a, par exemple à base de silicium, selon des dimensions Da supérieures aux dimensions Db nécessaires pour obtenir ledit spiral 5c d'une raideur C prédéterminée. Comme visible à la fig. 3, la section du spiral 5a comporte une hauteur H_1 et une épaisseur E_1.

[0025] Préférentiellement, les dimensions Da du spiral 5a sont sensiblement entre 1% et 20% supérieures à celles Db du spiral 5c nécessaires pour obtenir ledit spiral 5c d'une raideur C prédéterminée.

[0026] Préférentiellement selon l'invention, l'étape 33 est réalisée à l'aide d'un gravage ionique réactif profond dans une plaquette 23 d'un matériau à base de silicium comme illustré à la fig. 7. On s'aperçoit que les faces opposées F_1, F_2 sont ondulées car un gravage ionique réactif profond du type Bosch occasionne une gravure en créneaux structurée par les étapes successives d'attaque et de passivation.

[0027] Bien entendu, le procédé ne saurait se limiter à une étape 33 particulière. A titre d'exemple, l'étape 33 pourrait tout aussi bien être obtenue par un gravage chimique dans une plaquette 23 d'un matériau par exemple à base de silicium. De plus, l'étape 33 signifie que un ou plusieurs spiraux sont formés, c'est-à-dire que l'étape 33 permet de former des spiraux en vrac ou alternativement formés dans une plaquette d'un matériau.

[0028] Par conséquent, lors de l'étape 33, plusieurs spiraux 5a peuvent être formés dans la même plaquette 23 selon des dimensions Da, H_1, E_1 supérieures aux dimensions Db, H_3, E_3 nécessaires pour obtenir plusieurs spiraux 5c d'une raideur C prédéterminée ou plusieurs spiraux 5c de plusieurs raideurs C prédéterminées.

[0029] L'étape 33 ne se limite pas non plus à la formation d'un spiral 5a selon des dimensions Da, H_1, E_1 supérieures aux dimensions Db, H_3, E_3 nécessaires pour obtenir un spiral 5c d'une raideur C prédéterminée, formé à l'aide d'un unique matériau. Ainsi, l'étape 33 pourrait tout aussi bien former un spiral 5a selon des dimensions Da, H_1, E_1 supérieures aux dimensions Db, H_3, E_3 nécessaires pour obtenir un spiral 5c d'une raideur C prédéterminée en un matériau composite, c'est-à-dire comportant plusieurs matériaux distincts.

[0030] Le procédé 31 comporte une deuxième étape 35 destinée à déterminer la raideur du spiral 5a. Une telle étape 35 peut être réalisée directement sur le spiral 5a encore attaché à la plaquette 23 ou sur le spiral 5a préalablement détaché de la plaquette 23, sur l'ensemble ou sur un échantillon des spiraux encore attachés à une plaquette 23 ou sur un échantillon de spiraux préalablement détachés d'une plaquette 23.

[0031] Préférentiellement selon l'invention, le spiral 5a étant ou non détaché de la plaquette 23, l'étape 35 comporte une première phase destinée à mesurer la fréquence f d'un ensemble comportant le spiral 5a couplé avec un balancier doté d'une inertie I prédéterminée puis, à l'aide de la relation (5), en déduire, dans une deuxième phase, la raideur C du spiral 5a.

[0032] Une telle phase de mesure peut notamment être dynamique et réalisée selon les enseignements du document EP 2 423 764, incorporé par référence à la présente demande. Toutefois, alternativement, une méthode statique, réalisée selon les enseignements du document EP 2 423 764, peut également être mise en œuvre pour déterminer la raideur C du spiral 5a.

[0033] Bien entendu, comme expliqué ci-dessus, le procédé ne se limitant pas au gravage d'un unique spiral par plaquette, l'étape 35 peut également consister en une détermination de la raideur moyenne d'un échantillon représentatif ou de l'ensemble des spiraux formés sur une même plaquette.

[0034] Avantageusement selon l'invention, à partir de la détermination de la raideur C du spiral 5a, le procédé 31 comporte une étape 37 destinée à calculer, à l'aide de la relation (2), l'épaisseur de matériau à retirer sur l'ensemble du spiral pour obtenir les dimensions globales Db nécessaires pour obtenir ledit spiral 5c d'une raideur C prédéterminée, c'est-à-dire le volume de matériau à retirer de manière homogène ou non sur la surface du spiral 5a.

[0035] Le procédé se poursuit avec une étape 39 destinée à retirer la matière excédentaire du spiral 5a jusqu'aux dimensions Db nécessaires pour obtenir ledit spiral 5c d'une raideur C prédéterminée. On comprend donc qu'il importe peu que les variations géométriques soient intervenues sur l'épaisseur et/ou la hauteur et/ou la longueur du spiral 5a dans la mesure où, selon l'équation (2), c'est le produit $h \cdot e^3$ qui détermine la rigidité de la spire.

[0036] Ainsi, une épaisseur homogène sur toute la surface externe peut être retirée, une épaisseur non homogène sur toute la surface externe peut être retirée, une épaisseur homogène seulement sur une partie de la surface externe peut être retirée ou une épaisseur non homogène seulement sur une partie de la surface externe peut être retirée. A titre d'exemple, l'étape 37 pourrait consister à ne retirer de la matière que selon l'épaisseur E_1 ou selon la hauteur H_1 du spiral 5a.

[0037] Dans une première variante se rapportant à un matériau à base de silicium, l'étape 39 comporte une première phase d1 destinée à oxyder le spiral 5a afin de transformer ladite épaisseur de matériau à base de silicium à retirer en dioxyde de silicium et ainsi former un spiral 5b oxydé. Une telle phase d1 peut, par exemple, être obtenue par oxydation thermique. Une telle oxydation thermique peut, par exemple, être réalisée entre 800 et 1200 °C sous atmosphère oxydante à l'aide de vapeur d'eau ou de gaz de dioxygène permettant de former de l'oxyde de silicium sur le spiral 5a.

[0038] Comme visible à la fig. 4, la section du spiral 5b comporte une hauteur H_2 et une épaisseur E_2. On s'aperçoit que le spiral 5b est formé d'une partie centrale 22 à base de silicium selon les dimensions globales Db nécessaires pour le spiral 5c à ladite raideur C prédéterminée et une partie périphérique 24 en dioxyde de silicium. De plus, il est visible que la forme en créneaux est toujours reproduite sur une portion de la partie périphérique 24 mais n'est plus ou peu présente à la partie centrale 22.

[0039] L'étape 39 se termine, comme illustré à la fig. 5, avec une deuxième phase d2 destinée à retirer l'oxyde du spiral 5b permettant d'obtenir un spiral 5c avec la partie 22 unique à base de silicium aux dimensions globales Db nécessaires pour obtenir ladite raideur C prédéterminée, la section comportant notamment une hauteur H_3 et une épaisseur E_3. Une telle phase d2 peut, par exemple, être obtenue par gravage chimique. Un tel bain chimique peut comporter, par exemple, un acide fluorhydrique permettant de retirer l'oxyde de silicium du spiral 5b.

[0040] Dans une deuxième variante, l'étape 39 comporte une unique phase d3 destinée à graver chimiquement le spiral 5a afin d'obtenir le spiral 5c à base de silicium aux dimensions Db, H_3, E_3 nécessaires à ladite raideur C prédéterminée. Bien entendu, suivant le matériau utilisé, d'autres variantes comme le gravage laser ou le gravage ionique localisé, permettant de retirer la matière excédentaire du spiral 5a jusqu'aux dimensions Db nécessaires pour obtenir ledit spiral 5c d'une raideur C prédéterminée, peuvent être envisagées.

[0041] L'étape 39 peut finir le procédé 31. Toutefois, après l'étape 39, le procédé 31 peut également effectuer, au moins une nouvelle fois, les étapes 35, 37 et 39 dans le but d'encore affiner la qualité dimensionnelle du spiral. Ces itérations des étapes 35, 37 et 39 peuvent, par exemple, trouver un intérêt particulier quand l'exécution de la première itération des étapes 35, 37 et 39 est réalisée sur l'ensemble, ou sur un échantillon, des spiraux encore attachés à une plaquette 23, puis dans une deuxième itération, sur l'ensemble, ou un échantillon, des spiraux préalablement détachés de la plaquette 23 ayant subi la première itération.

[0042] Le procédé 31 peut également se poursuivre avec tout ou partie du processus 40 illustré à la fig. 8 comportant des étapes optionnelles 41, 43 et 45. Avantageusement selon l'invention, le procédé 31 peut ainsi se poursuivre avec l'étape 41 destinée à former, sur au moins une partie du spiral 5c, une portion 28 permettant de former un spiral 5, 15 moins sensible aux variations thermiques.

[0043] Dans une première variante, l'étape 41 peut consister en une phase e1 destinée à déposer une couche sur une partie de la surface externe dudit spiral 5c d'une raideur C prédéterminée.

[0044] Dans le cas où la partie 22 est un matériau à base de silicium, la phase e1 peut consister à oxyder le spiral 5c pour le revêtir de dioxyde de silicium afin de former un spiral qui est thermocompensé. Une telle phase e1 peut, par exemple, être obtenue par oxydation thermique. Une telle oxydation thermique peut, par exemple, être réalisée entre 800 et 1200 °C sous atmosphère oxydante à l'aide de vapeur d'eau ou de gaz de dioxygène permettant de former de l'oxyde de silicium sur le spiral 5c.

[0045] On obtient ainsi le spiral 5, 15 compensateur comme illustré à la fig. 6 qui, avantageusement selon l'invention, comporte une âme 26 à base de silicium et un revêtement 28 à base d'oxyde de silicium. Avantageusement selon l'invention, le spiral 5, 15 compensateur possède donc une très haute précision dimensionnelle notamment quant à la hauteur H_4 et de l'épaisseur E_4, et, incidemment, une compensation thermique de l'ensemble du résonateur 1 très fine.

[0046] Dans le cas d'un spiral à base de silicium, les dimensions globales Db peuvent être trouvées en utilisant les enseignements du document EP 1 422 436 pour l'appliquer au résonateur 1 qui est destiné à être fabriqué, c'est-à-dire pour compenser l'ensemble des parties constituantes du résonateur 1 comme expliqué ci-dessus.

[0047] Dans une deuxième variante, l'étape 41 peut consister en une phase e2 destinée à modifier la structure selon une profondeur prédéterminée d'une partie de la surface externe dudit spiral 5c d'une raideur C prédéterminée. A titre d'exemple, si un silicium amorphe est utilisé, il peut être prévu de le cristalliser selon une profondeur prédéterminée.

[0048] Dans une troisième variante, l'étape 41 peut consister en une phase e3 destinée à modifier la composition selon une profondeur prédéterminée d'une partie de la surface externe dudit spiral 5c d'une raideur C prédéterminée. A titre d'exemple, si un silicium monocristallin ou polycristallin est utilisé, il peut être prévu de le doper ou d'y diffuser des atomes interstitiels ou de substitution selon une profondeur prédéterminée.

[0049] Avantageusement selon l'invention, il est ainsi possible de fabriquer, comme illustré à la fig. 2, sans plus de complexité un spiral 5c, 5, 15 comportant notamment:

- une ou plusieurs spires de section(s) plus précise(s) que celle obtenue par un unique gravage;
- des variations d'épaisseur et/ou de pas le long de la spire;
- une virole 17 monobloc;
- une spire interne 19 du type à courbe Grossmann;
- une attache 14 de pitonnage monobloc;
- un élément d'encastrement externe monobloc;
- une portion 13 de la spire externe 12 surépaissie par rapport au reste des spires.

[0050] Enfin, le procédé 31 peut également comporter l'étape 45 destinée à assembler un spiral compensateur 5, 15 obtenu lors de l'étape 41, ou un spiral 5c obtenu lors de l'étape 39, avec un balancier d'inertie prédéterminée obtenu lors de l'étape 43 pour former un résonateur 1 du type balancier-spiral qui est compensé thermiquement ou non, c'est-à-dire dont la fréquence f est sensible ou non aux variations de température.

[0051] Bien entendu, la présente invention ne se limite pas à l'exemple illustré mais est susceptible de diverses variantes et modifications qui apparaîtront à l'homme de l'art. En particulier, comme expliqué ci-dessus, le balancier, même s'il comporte une inertie prédéfinie de construction, peut comporter des masselottes déplaçables permettant d'offrir un paramètre de réglage avant ou après la vente de la pièce d'horlogerie.

[0052] De plus, une étape supplémentaire, entre l'étape 39 et l'étape 41, ou entre l'étape 39 et l'étape 45, pourrait être prévue afin de déposer d'une couche fonctionnelle ou esthétique, comme, par exemple, une couche de durcissement ou une couche luminescente.

[0053] Il est également envisageable dans le cas où le procédé 31 effectue, après l'étape 39, une ou plusieurs itération(s) des étapes 35, 37 et 39 que l'étape 35 ne soit pas systématiquement mise en œuvre.

Revendications

1. Procédé (31) de fabrication d'un spiral (5c) d'une raideur prédéterminée comportant les étapes suivantes:
   a) former (33) un spiral (5a) selon des dimensions (H_1, E_1) supérieures aux dimensions (H_3, E_3) nécessaires pour obtenir ledit spiral (5c) d'une raideur prédéterminée;
   b) déterminer (35) la raideur du spiral (5a) formé lors de l'étape a);
   c) calculer (37) l'épaisseur de matériau à retirer pour obtenir les dimensions (H_3, E_3) nécessaires pour obtenir ledit spiral (5c) d'une raideur prédéterminée;

d) retirer (39) du spiral (5a) formé lors de l'étape a) ladite épaisseur de matériau permettant d'obtenir le spiral (5c) aux dimensions (H_3, E_3) nécessaires à ladite raideur prédéterminée.

2. Procédé (31) de fabrication selon la revendication précédente, caractérisé en ce que, lors de l'étape a), les dimensions (H_1, E_1) du spiral (5a) formé lors de l'étape a) sont entre 1% et 20% supérieures à celles (H_3, E_3) nécessaires pour obtenir ledit spiral (5c) à ladite raideur prédéterminée.
3. Procédé (31) de fabrication selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que l'étape a) est réalisée à l'aide d'un gravage ionique réactif profond.
4. Procédé (31) de fabrication selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que l'étape a) est réalisée à l'aide d'un gravage chimique.
5. Procédé (31) de fabrication selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, lors de l'étape a), plusieurs spiraux (5a) sont formés dans une même plaquette (23) selon des dimensions (H_1, E_1) supérieures aux dimensions (H_3, E_3) nécessaires pour obtenir plusieurs spiraux (5c) d'une raideur prédéterminée ou plusieurs spiraux (5c) de plusieurs raideurs prédéterminées.
6. Procédé (31) de fabrication selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le spiral (5a) formé lors de l'étape a) est à base de silicium.
7. Procédé (31) de fabrication selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le spiral (5a) formé lors de l'étape a) est à base de verre.
8. Procédé (31) de fabrication selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le spiral (5a) formé lors de l'étape a) est à base de céramique.
9. Procédé (31) de fabrication selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le spiral (5a) formé lors de l'étape a) est à base de métal.
10. Procédé (31) de fabrication selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le spiral (5a) formé lors de l'étape a) est à base d'alliage métallique.
11. Procédé (31) de fabrication selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'étape b) comporte les phases suivantes:
b1) mesurer la fréquence d'un ensemble comportant le spiral (5a) formé lors de l'étape a) couplé avec un balancier doté d'une inertie prédéterminée;
b2) déduire de la fréquence mesurée, la raideur du spiral (5a) formé lors de l'étape a).
12. Procédé (31) de fabrication selon la revendication 6, caractérisé en ce que l'étape d) comporte les phases suivantes:
d1) oxyder le spiral (5a) formé lors de l'étape a) afin de transformer ladite épaisseur de matériau à base de silicium à retirer en dioxyde de silicium et ainsi former un spiral (5b) oxydé;
d2) retirer l'oxyde du spiral (5b) oxydé permettant d'obtenir le spiral (5c) aux dimensions (H_3, E_3) nécessaires à ladite raideur prédéterminée.
13. Procédé (31) de fabrication selon l'une des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que l'étape d) comporte la phase suivante:
d3) graver chimiquement le spiral (5a) formé lors de l'étape a) afin d'obtenir le spiral (5c) aux dimensions (H_3, E_3) nécessaires à ladite raideur prédéterminée.
14. Procédé (31) de fabrication selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, après l'étape d), le procédé effectue au moins une nouvelle fois les étapes b), c) et d) pour affiner la qualité dimensionnelle.
15. Procédé (31) de fabrication selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, après l'étape d), le procédé comporte, en outre, l'étape suivante:
e) former, sur au moins une partie dudit spiral (5c) d'une raideur prédéterminée, une portion permettant de corriger la raideur du spiral (5c) et de former un spiral (5, 15) moins sensible aux variations thermiques.
16. Procédé (31) de fabrication selon la revendication 15, caractérisé en ce que l'étape e) comporte la phase suivante:
e1) déposer une couche sur une partie de la surface externe dudit spiral (5c) d'une raideur prédéterminée.
17. Procédé (31) de fabrication selon la revendication 15, caractérisé en ce que l'étape e) comporte la phase suivante:
e2) modifier la structure selon une profondeur prédéterminée d'une partie de la surface externe dudit spiral (5c) d'une raideur prédéterminée.
18. Procédé (31) de fabrication selon la revendication 15, caractérisé en ce que l'étape e) comporte la phase suivante:
e3) modifier la composition selon une profondeur prédéterminée d'une partie de la surface externe dudit spiral (5c) d'une raideur prédéterminée.

Fig. 1

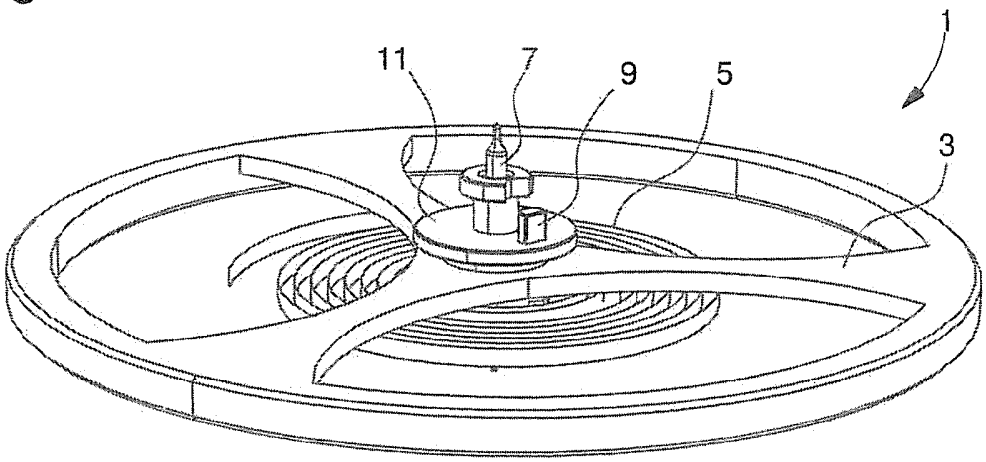


Fig. 2

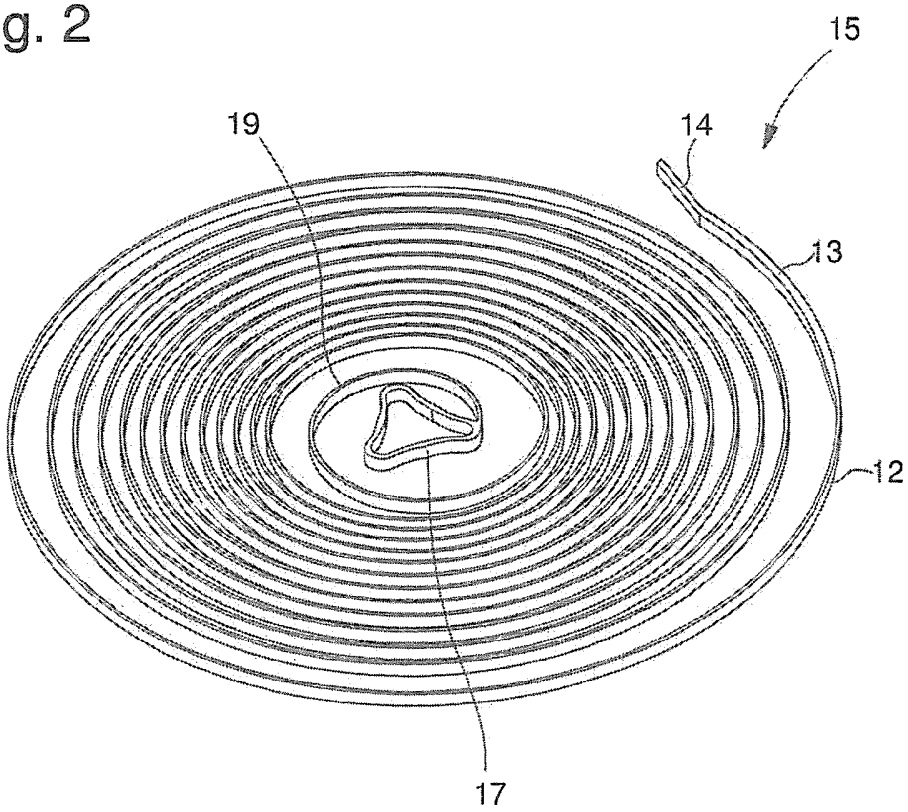


Fig. 3

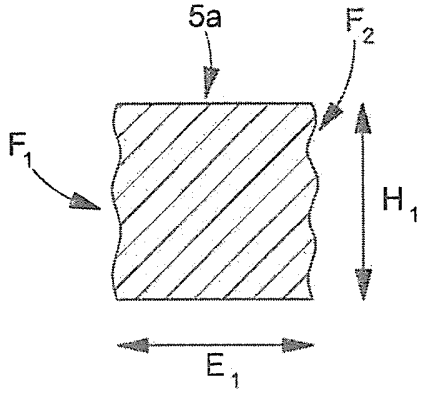


Fig. 4

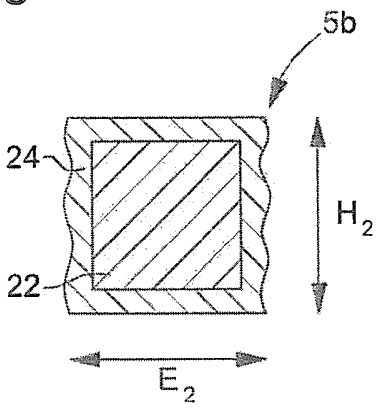


Fig. 5

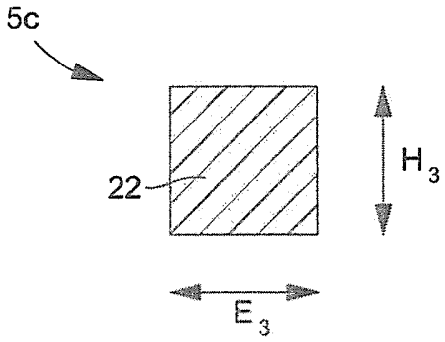


Fig. 6

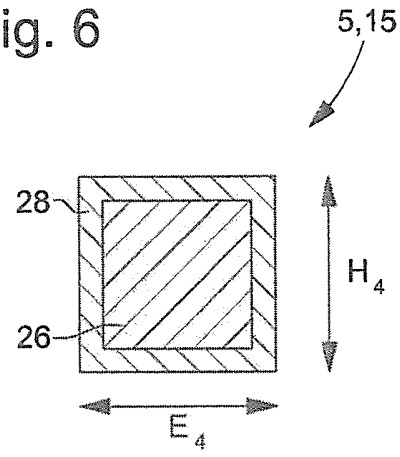


Fig. 7

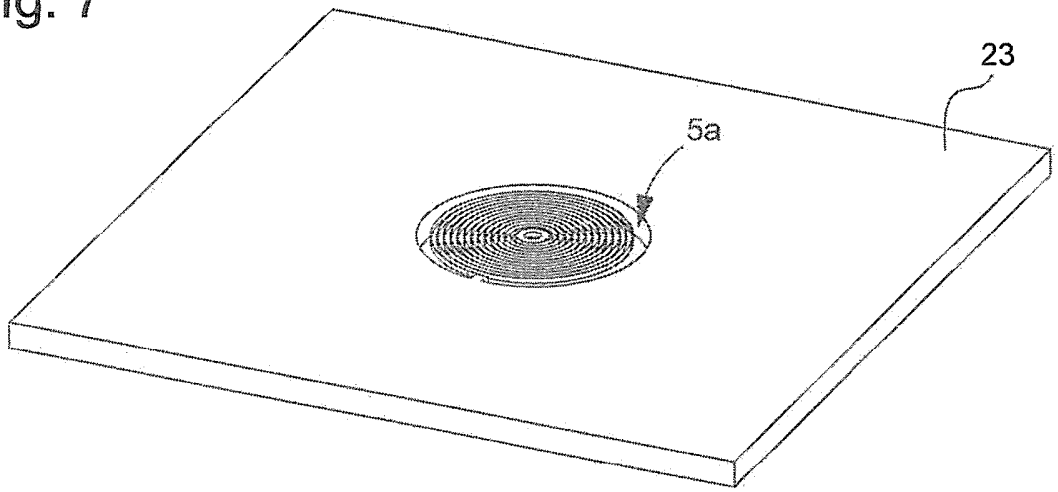


Fig. 8

