



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
26.04.2017 Bulletin 2017/17

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

(21) Numéro de dépôt: **15190441.4**

(22) Date de dépôt: **19.10.2015**

(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 MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Etats d'extension désignés:
BA ME
Etats de validation désignés:
MA

• **HUNZIKER, Olivier**
1800 Vevey (CH)

(74) Mandataire: **Moinas & Savoye SARL**
19A, rue de la Croix-d'Or
1204 Genève (CH)

Remarques:

Une requête en rectification de la revendication 2 a été présentée conformément à la règle 139 CBE. Il sera statué sur cette requête au cours de la procédure engagée devant la division d'examen (Directives relatives à l'examen pratiqué à l'OEB, A-V, 3.).

(71) Demandeur: **ROLEX SA**
1211 Genève 26 (CH)

(72) Inventeurs:
• **BOSSART, Richard**
1616 Attalens (CH)

(54) **SPIRAL EN SILICIUM FORTEMENT DOPÉ POUR PIÈCE D'HORLOGERIE**

(57) Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie, caractérisé en ce qu'il comprend une partie, notamment au moins une spire ou une portion de spire, dotée

de silicium fortement dopé à une densité ionique supérieure ou égale à 10^{18} at/cm³ afin de permettre la thermo-compensation de l'oscillateur.

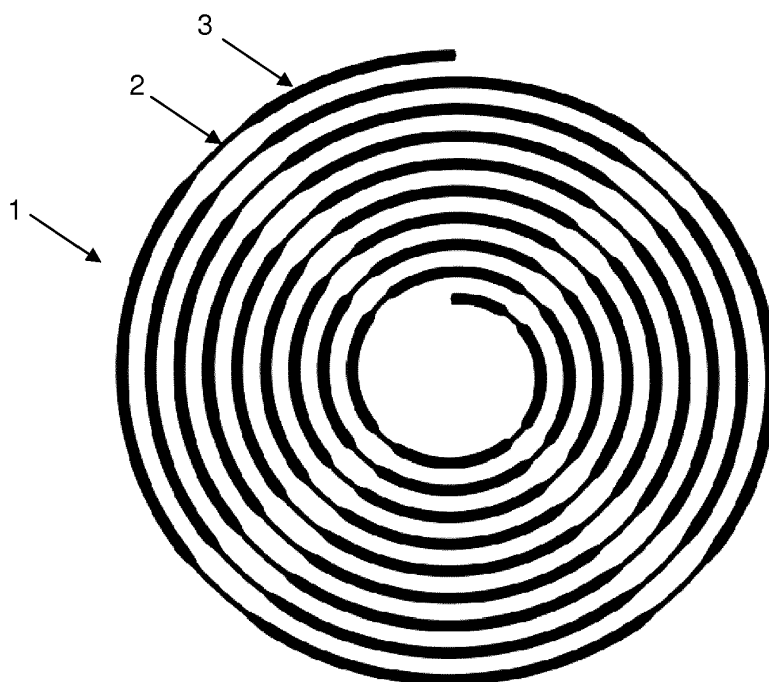


Figure 1

Description

[0001] L'invention concerne un ressort spiral 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 spiral. Enfin, elle concerne aussi un procédé de fabrication d'un tel ressort spiral.

[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 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 des montres mécaniques dépend de la stabilité de la fréquence propre de l'oscillateur formé par le balancier et le spiral. Lorsque la température varie, les dilatations thermiques du spiral et du balancier, ainsi que la variation du module de Young du spiral, modifient la fréquence propre de cet ensemble oscillant, 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 fréquence d'un oscillateur avec la température. Une approche considère que la fréquence propre F d'un oscillateur dépend du rapport entre la constante du couple de rappel C exercé par le spiral sur le balancier et le moment d'inertie I de ce dernier, par la relation suivante :

$$F = \sqrt{C/I} / 2\pi$$

[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 :

$$(1/F)dF/dT = [(1/E)dE/dT + 3\alpha_s - 2\alpha_b] / 2$$

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

$(1/F)dF/dT$ est le coefficient thermique de l'oscillateur, aussi dénommé simplement par l'acronyme CT,

$(1/E)dE/dT$ 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.

[0006] 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. 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. 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, est ainsi considéré pour le spiral formé en un matériau anisotrope et/ou hétérogène. Des solutions de l'état de la technique cherchent à annuler la valeur du coefficient thermique CT de l'oscillateur en choisissant un CTE équivalent ou apparent du spiral adapté à cet effet.

[0007] Dans la description à suivre, par « CTE », nous entendons notamment « CTE équivalent ou apparent ».

[0008] A titre d'exemple, le document EP1258786 propose d'utiliser un spiral formé dans un alliage paramagnétique Nb-Hf particulier comprenant un taux avantageux de Hf. L'alliage choisi est relativement complexe à fabriquer.

[0009] Le document EP1422436 décrit une autre 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.

[0010] Le but de l'invention est de fournir une autre solution de ressort spiral qui permet la thermo-compensation de l'oscillateur, afin d'obtenir un oscillateur dont la fréquence est indépendante ou quasi-indépendante de la température, qui ne présente pas tout ou partie des inconvénients de l'état de la technique.

[0011] A cet effet, l'invention porte sur un spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie, caractérisé en ce qu'il comprend une partie, notamment au moins une spire ou une portion de spire, dotée de silicium fortement dopé de

dopage supérieur ou égal à 10^{18} at/cm³ afin de permettre la thermo-compensation de l'oscillateur.

[0012] Ladite partie, notamment ladite spire ou la dite portion de spire, peut comporter une section variant localement sur sa longueur, notamment sur la longueur de ladite spire ou de ladite portion de spire. Cette variation peut être une variation d'épaisseur et/ou de hauteur.

[0013] En variante ou complément, ladite partie peut comprendre une couche externe oxydée, notamment en dioxyde de silicium SiO₂.

[0014] L'invention est plus précisément définie par les revendications.

[0015] 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 spiral d'une pièce d'horlogerie selon un mode de réalisation de l'invention.

La figure 2 représente l'évolution de l'épaisseur relative du spiral en fonction de son angle défini à partir de son point d'attache selon le mode de réalisation de l'invention.

La figure 3 représente l'évolution de l'épaisseur relative du spiral en fonction de son angle défini à partir de son point d'attache selon une variante du mode de réalisation de l'invention.

La figure 4 représente l'épaisseur de la couche d'oxyde d'un spiral dont les variations de section sont conformes à celles du spiral de la figure 3 pour différents rapports de l'épaisseur minimale sur l'épaisseur maximale en fonction de la densité de son dopage afin de former des variantes du mode de réalisation de l'invention.

[0016] Selon un mode de réalisation de l'invention, un oscillateur pour pièce d'horlogerie comprend un ensemble balancier-spiral, le spiral se présentant sous la forme d'une lame élastique de section rectangulaire, enroulée sur elle-même en spirale d'Archimède. Le balancier est réalisé en un alliage cuivre-béryllium, de manière connue. En variante, d'autres matières peuvent être utilisées pour le balancier. De même, le spiral pourrait présenter une autre géométrie de base, comme une section non rectangulaire.

[0017] L'objectif de l'invention est de proposer une solution approchant au maximum une valeur du coefficient thermique (CT) nulle pour le balancier-spiral, dont les oscillations deviennent ainsi indépendantes ou quasi-indépendantes de la température. Pour cela, il est nécessaire de coupler la matière du spiral avec celle du balancier pour obtenir un bon résultat. A titre d'exemple, avec un balancier en CuBe₂, le spiral doit avoir un coefficient thermique du module de Young (CTE) de l'ordre de 26 ppm/°C pour thermo-compenser l'oscillateur.

[0018] Selon un élément essentiel de l'invention, le spiral des modes de réalisation est réalisé en silicium et comprend au moins une spire ou portion de spire en silicium fortement dopé. Par fortement dopé, il est entendu que le silicium présente un dopage d'une densité ionique supérieure ou égale à 10^{18} at/cm³, voire supérieure ou égale à 10^{19} at/cm³, voire supérieure ou égale à 10^{20} at/cm³. Ce dopage du silicium est obtenu au moyen d'éléments apportant un électron supplémentaire (dopage de type p ou « p-doped silicon ») ou un électron en moins (dopage de type n ou « n-doped silicon »). Il est constaté qu'en fonction du matériau utilisé pour le balancier, par exemple du titane ou un alliage du titane, ce seul silicium fortement dopé peut suffire à obtenir une thermo-compensation de l'oscillateur. A titre d'exemple, le dopage de type n est par exemple obtenu en utilisant au moins un élément parmi : antimoine Sb, arsenic As, ou phosphore P. Le dopage de type p est obtenu par exemple en utilisant du bore B.

[0019] La partie en silicium fortement dopé occupe avantageusement toute la longueur du spiral. Autrement dit, toutes les spires en silicium d'un spiral peuvent avantageusement être fortement dopées. Selon une réalisation, la spire ou la portion de spire est fortement dopée sur toute sa section. Autrement dit, la partie en silicium fortement dopé occupe toute la section d'une spire ou d'une portion de spire, c'est-à-dire que le dopage est massif. Selon une variante de réalisation, la partie en silicium fortement dopé occupe seulement une couche superficielle de la section d'une spire ou d'une portion de spire, notamment une paroi d'une spire ou d'une portion de spire. De plus, dans les réalisations qui vont être décrites ci-dessous, le dopage est avantageusement uniforme sur toutes les spires du spiral, voire sur tout le spiral et/ou sur toute une section du spiral. En variante, il peut être non uniforme, variable selon les spires ou les portions des spires et/ou sur la section des spires ou des portions des spires du spiral. Toutefois, il est aussi noté que la thermo-compensation dépend de l'orientation cristalline. En d'autres termes, l'effet du dopage du silicium du spiral donne une caractéristique de thermo-compensation anisotrope.

[0020] Ainsi, selon un mode de réalisation avantageux, la géométrie du ressort spiral présente des variations de section sur sa longueur pour prendre en compte cette anisotropie. Autrement dit, le spiral présente une variation de section en fonction de l'orientation cristallographique du silicium fortement dopé.

[0021] Une première réalisation repose ainsi sur une modulation de l'épaisseur des spires du spiral, c'est-à-dire une variation de la dimension du côté des spires situé dans un plan parallèle au plan du spiral, plus particulièrement une variation de la dimension des spires qui est localement perpendiculaire à la fibre neutre du spiral dans un plan parallèle

au plan du spiral. Cette modulation de l'épaisseur est choisie pour favoriser la flexion de premières zones du spiral. Ces premières zones du spiral présentent un CTE local supérieur au CTE local de secondes zones du spiral. La modulation de l'épaisseur des spires, plus particulièrement l'amincissement de l'épaisseur des spires dans ces premières zones du spiral, permet ainsi d'optimiser la thermo-compensation de l'oscillateur. En remarque, cette modulation de l'épaisseur impacte la régularité de la rigidité de la lame, et donc le comportement mécanique à température constante. Toutefois, cet effet est considéré comme limité par rapport à l'effet des variations du CTE du spiral avec la température. Par ailleurs, il est possible de compenser cet effet par des variations connexes de la section des spires du spiral.

[0022] La figure 1 représente ainsi un spiral 1 à pas constant à l'équilibre ou au repos selon un mode de réalisation de l'invention, constitué de neuf tours, et comprenant une évolution de l'épaisseur des spires présentée par la courbe de la figure 2. Cette figure 2 montre l'évolution de l'épaisseur relative (e/e_0) des spires en fonction de l'angle (α), dans un repère en coordonnées polaires et centré sur le centre du spiral. Il apparaît que chaque spire présente des amincissements 2 sur des zones s'étendant une plage angulaire donnée, cette plage angulaire variant selon le dopage du silicium du spiral et une éventuelle oxydation du spiral fortement dopé. Cette plage angulaire peut être comprise entre 2 et 80 degrés, notamment entre 5 et 40 degrés, notamment entre 5 et 20 degrés. Dans notre mode de réalisation particulier, le plan du spiral coïncide sensiblement avec un plan {001} du monocristal de silicium. Dans ce mode de réalisation particulier, les premières zones du spiral, notamment les amincissements 2, coïncident sensiblement avec les lieux où la tangente à la fibre neutre est alignée avec une direction $\langle 100 \rangle$ du monocristal de silicium. Dans ce mode de réalisation particulier, les amincissements 2 sont disposés périodiquement le long des spires du spiral selon une période de 90°. Dans un mode de réalisation alternatif dans lequel le plan du spiral ne coïncide sensiblement pas avec un plan {001} du monocristal de silicium, les amincissements peuvent être disposés périodiquement le long des spires du spiral selon une période de 180 degrés. En dehors des amincissements, l'épaisseur peut rester sensiblement constante ou non. Il est à noter que les amincissements, à savoir les variations locales de la dimension des spires, peuvent être égaux ou non. Les géométries des amincissements peuvent différer ou non. Ainsi, des amincissements sont disposés périodiquement selon une période donnée quand bien même les variations locales de la dimension des spires ou les géométries des amincissements diffèrent. Il est à noter qu'avec une telle géométrie, le spiral peut présenter toute épaisseur et tout pas, tout en conservant un bon comportement thermique, ce qui permet de déterminer ces paramètres en fonction des critères fixés par la recherche de la meilleure performance chronométrique de l'oscillateur.

[0023] La figure 3 représente en variante une évolution périodique de l'épaisseur relative (e/e_0) des spires qui présentent un profil linéaire, sur 45 degrés. Ainsi, dans cette variante particulière, chaque spire présente une épaisseur minimale 2 pour les angles 45, 135, 225 et 315 degrés, et des épaisseurs maximales 3 pour les angles 0, 90, 180, et 270 degrés. L'angle 0 degré correspond à l'extrémité intérieure du spiral. Entre ces épaisseurs extrêmes 2, 3, le spiral présente une épaisseur variant linéairement avec l'angle. Dans ce mode de réalisation, l'évolution de l'épaisseur est donc périodique et similaire sur chaque spire.

[0024] Dans ces deux modes de réalisation, la réduction d'épaisseur peut aller de 5 à 90% par rapport à l'épaisseur maximale, notamment de 10 à 40% par rapport à l'épaisseur maximale.

[0025] Selon une variante de réalisation, la variation de la section des spires du spiral peut être réalisée par une modification de la hauteur de spires, c'est-à-dire de la dimension perpendiculaire au plan du spiral. Cette modification peut par exemple être obtenue par photolithographie grise, dans le même but de favoriser de cette manière la flexion des premières zones du spiral.

[0026] Naturellement, d'autres modes de réalisation sont envisageables, basés sur la variation de la forme et/ou de dimensions de la section des spires. Par exemple, il est possible de varier l'épaisseur et la hauteur des spires, en combinant les deux réalisations décrites précédemment. La modification de géométrie a pour objectif de favoriser la flexion du spiral dans les zones favorables, notamment de coefficient thermique positif. Avantagusement, cette variation de la section du spiral en fonction de l'angle, dans un repère en coordonnées polaires, est périodique. Notamment, cette période peut être de 90 ou 180 degrés. De plus, cette variation de section dans le but d'optimiser le comportement thermique du spiral peut être combinée à une variation de section complémentaire, en général non périodique, adaptée à l'optimisation du comportement chronométrique du spiral.

[0027] En remarque, les zones du spiral à favoriser peuvent être déterminées par un calcul théorique et/ou de manière empirique.

[0028] Par ailleurs, on constate qu'un dopage plus fort apporte un effet renforcé de thermo-compensation. Il peut être aussi possible de prévoir un dopage plus fort dans certaines zones du spiral, notamment les zones favorables mentionnées précédemment. Il est aussi possible, en variante ou complément, de prévoir un dopage plus fort dans les zones plus proches de la surface du spiral.

[0029] Cette variation du dopage peut être faite a posteriori par diffusion ou implantation ionique, pour obtenir un ajustement « fin » du CTE du spiral après sa fabrication. Naturellement, les différentes variations décrites dans les modes de réalisation précédents peuvent être combinées.

[0030] Il a été constaté que la variation seule de la section d'un spiral permet d'obtenir de bons résultats en utilisant un silicium très fortement dopé. On constate qu'une légère oxydation du silicium, en complément des caractéristiques

décrites dans les modes de réalisation précédents, permet d'obtenir un résultat équivalent avec un silicium un peu moins fortement dopé. Autrement dit, une oxydation du silicium fortement dopé permet d'améliorer la performance en termes de thermo-compensation à dopage de silicium équivalent, ou de réduire l'importance de la modulation de l'épaisseur des spires.

[0031] La figure 4 illustre cet effet. Les quatre droites 11, 12, 13, 14 représentent respectivement quatre spiraux présentant chacun une variation de section différente, obtenue par la modulation périodique de la section du spiral, dont le rapport R entre l'épaisseur minimale et l'épaisseur maximale des spires vaut respectivement 1, 0.55, 0.33, 0.10. Ces quatre spiraux sont associés à un même balancier en CuBe2 pour former des oscillateurs. Pour chacun de ces spiraux, l'épaisseur d'oxyde (c) nécessaire pour atteindre un coefficient thermique nul est représentée en fonction du logarithme de la densité ionique (Log di). On constate dans tous les cas qu'un dopage de densité ionique jusqu'à 10^{18} at.cm⁻³ nécessite une couche d'oxyde tendant vers 3 µm. On constate dans tous les cas qu'un dopage très fort de densité ionique supérieure à 10^{18} at.cm⁻³ nécessite une couche d'oxyde moindre, voire nulle. En outre, la couche d'oxyde peut être avantageusement annulée pour un balancier formé d'un matériau dont le coefficient de dilatation thermique est sensiblement plus faible. En remarque, des modes de réalisation avec des couches d'oxyde d'épaisseur inférieure, voire nulle, restent intéressants et sont couverts par la présente invention, même si le coefficient thermique est légèrement moins bon, ce qui est compensé par la plus grande simplicité de fabrication. De plus, on constate que moins la modulation de l'épaisseur du spiral est prononcée (rapport R plus grand), plus il faut fortement doper le silicium pour obtenir un coefficient thermique nul sans oxydation. En remarque, il est aussi noté que ces courbes restent sensiblement inchangées si on modifie uniquement le type de modulation d'épaisseur, par exemple selon les figures 2 et 3, tout en conservant un rapport R identique.

[0032] Il apparaît donc que l'invention porte aussi sur un spiral comprenant une partie en silicium fortement dopé et comprenant une couche externe d'oxydation. Notamment, des modes de réalisation sont obtenus en ajoutant une couche d'oxyde aux modes de réalisation décrits précédemment. Dans tous les cas, en considérant plus généralement tout spiral d'une pièce d'horlogerie selon tout mode de réalisation, la couche d'oxyde présente une faible épaisseur, son épaisseur maximale étant inférieure ou égale à 5 µm, voire inférieure ou égale à 3 µm, voire inférieure ou égale à 2,5 µm, voire inférieure ou égale à 2 µm, voire inférieure ou égale à 1,5 µm.

[0033] L'invention porte aussi sur un procédé de fabrication d'un spiral tel que décrit précédemment. Ce procédé comprend notamment une étape de découpe du spiral dans une plaquette (wafer) en silicium fortement dopé, par exemple par la méthode de gravure ionique réactive profonde (Deep Reactive Ion Etching, DRIE, en anglais), cette découpe étant telle qu'elle permet de former une section variable des spires du spiral. Plus précisément, selon un mode de réalisation, cette découpe permet de former des spires d'épaisseur variable par le choix de la forme sur le masque. Un autre mode de réalisation consiste à former des spires d'une hauteur variable, par exemple à l'aide d'une photolithographie grise, de gravure multiples utilisant différents masques, ou d'autres procédés connus de l'homme du métier.

[0034] En remarque, la plaquette peut être fabriquée à partir d'un lingot en silicium fortement dopé obtenu lui-même par une étape de fort dopage du silicium lors de sa croissance.

[0035] En variante, le procédé de fabrication comprend une étape de découpe du spiral dans une plaquette en silicium, puis une étape de dopage du silicium après la découpe, notamment par diffusion ou implantation ionique, pour obtenir un spiral comprenant du silicium très fortement dopé. Dans ce mode de réalisation, une étape de dopage (additionnel) est donc ajoutée après la découpe. La plaquette de silicium peut être initialement fortement dopée ou pas. Ce mode de réalisation permet de doper plus fortement les zones proches de la surface et plus sollicitées lors des déformations en oscillation. En remarque, le fait de procéder à un dopage a posteriori présente l'avantage de permettre d'obtenir un taux de dopage plus important et ainsi d'éviter le recours à une oxydation du silicium ou de diminuer la couche d'oxyde nécessaire.

[0036] Ce procédé de fabrication présente aussi l'avantage de profiter de la souplesse du découpage dans une plaquette en silicium, qui permet d'atteindre des géométries très diverses, et notamment de faire varier avec très peu de limitation l'épaisseur de la lame formant une spire du spiral.

[0037] La plaquette peut être préférentiellement réalisée en monocristal de silicium orienté dans la direction <100>.

[0038] Selon une variante de réalisation, le procédé de fabrication comprend une étape complémentaire d'oxydation. Comme explicité précédemment, la couche d'oxydation utilisée présente une faible épaisseur, dans tous les modes de réalisation, ce qui présente l'avantage de permettre sa réalisation à une température d'oxydation peu élevée, et d'éviter ainsi l'usure prématurée du four utilisé. De plus, cette faible épaisseur de la couche d'oxydation permet aussi sa réalisation en utilisant l'oxygène comme précurseur, à la place de la vapeur d'eau utilisée pour des couches d'oxydation plus épaisses, permettant ainsi de former une couche d'oxydation d'une grande qualité tout en minimisant son temps de croissance.

[0039] 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 spiral tel que décrit précédemment.

Revendications

1. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie, **caractérisé en ce qu'il** comprend une partie, notamment au moins une spire ou une portion de spire, dotée de silicium fortement dopé à une densité ionique supérieure ou égale à 10^{18} at/cm³ afin de permettre la thermo-compensation de l'oscillateur.
2. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** ladite partie, notamment ladite spire ou la dite portion de spire, comprend du silicium fortement dopé à une densité ionique supérieure ou égale à 10^{19} at/cm³, voire supérieure ou égale à 10^{19} at/cm³.
3. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** ladite partie, notamment ladite spire ou la dite portion de spire, comporte une section variant localement sur la longueur de ladite partie.
4. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** la variation de section est périodique, notamment selon une période de 90 ou 180 degrés.
5. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon la revendication 3 ou 4, **caractérisé en ce que** la variation de section est mise en oeuvre par un amincissement, notamment un amincissement local, de l'épaisseur et/ou de la hauteur de la spire ou de la portion de spire du spiral.
6. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** les minima d'épaisseur et/ou de hauteur de la spire ou de la portion de spire du spiral coïncident avec les lieux où la tangente à la fibre neutre est sensiblement alignée avec une direction <100> du mono-cristal constituant le ressort-spiral.
7. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** ladite partie, notamment ladite spire ou ladite portion de spire, comporte le silicium fortement dopé sur toute son épaisseur et/ou toute sa hauteur, ou sur une couche de surface uniquement
8. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** comprend une couche externe oxydée, notamment en dioxyde de silicium SiO₂.
9. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** la couche externe oxydée recouvre ladite partie, notamment ladite spire ou ladite portion de spire, et **en ce que** ladite partie comporte une section variant localement sur sa longueur.
10. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon la revendication 8 ou 9, **caractérisé en ce qu'il** comprend une couche externe oxydée d'épaisseur inférieure ou égale à 5 μm, voire inférieure ou égale à 3 μm, voire inférieure ou égale à 2,5 μm, voire inférieure ou égale à 2 μm, voire inférieure ou égale à 1,5 μm.
11. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon l'une des revendications 8 à 10, **caractérisé en ce qu'il** comprend sur toute sa longueur une section variable, en silicium fortement dopé de dopage supérieur ou égal à 10^{18} at/cm³ et comprenant une couche externe oxydée.
12. Spiral pour un oscillateur d'une pièce d'horlogerie selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la partie en silicium fortement dopé est telle qu'elle permet d'annuler ou sensiblement annuler l'expression :

$$CTE + 3 \alpha_s - 2 \alpha_b$$

Où CTE est le coefficient thermique du module de Young (CTE)

α_s le coefficient de dilation thermique du spiral

α_b le coefficient de dilation thermique du balancier destiné à une coopération avec le spiral.

13. Oscillateur pour pièce d'horlogerie, notamment de type balancier-spiral, **caractérisé en ce qu'il** comprend un spiral selon l'une des revendications précédentes.

EP 3 159 746 A1

14. Pièce d'horlogerie, notamment montre, **caractérisée en ce qu'**elle comprend un spiral selon l'une des revendications 1 à 12.

5 15. Procédé de fabrication d'un spiral selon l'une des revendications 1 à 12, **caractérisé en ce qu'**il comprend une étape de fort dopage du silicium et une étape de réalisation d'une plaquette en silicium fortement dopé, puis une étape de découpe de cette plaquette pour obtenir un spiral comprenant du silicium fortement dopé.

10 16. Procédé de fabrication d'un spiral selon l'une des revendications 1 à 12, **caractérisé en ce qu'**il comprend une étape de découpe d'une plaquette en silicium pour former un spiral puis une étape de fort dopage du silicium après la découpe, notamment par diffusion ou implantation ionique, pour obtenir un spiral comprenant du silicium fortement dopé.

15 17. Procédé de fabrication d'un spiral selon l'une des revendications 15 ou 16, **caractérisé en ce qu'**il comprend tout ou partie des étapes suivantes :

- découpe du spiral de sorte à former une modulation de l'épaisseur du spiral ; et/ou
- seconde découpe du spiral pour former une variation de la hauteur d'au moins une spire du spiral.

20 18. Procédé de fabrication d'un spiral selon l'une des revendications 15 à 17, **caractérisé en ce qu'**il comprend une étape d'oxydation d'au moins une partie du silicium du spiral.

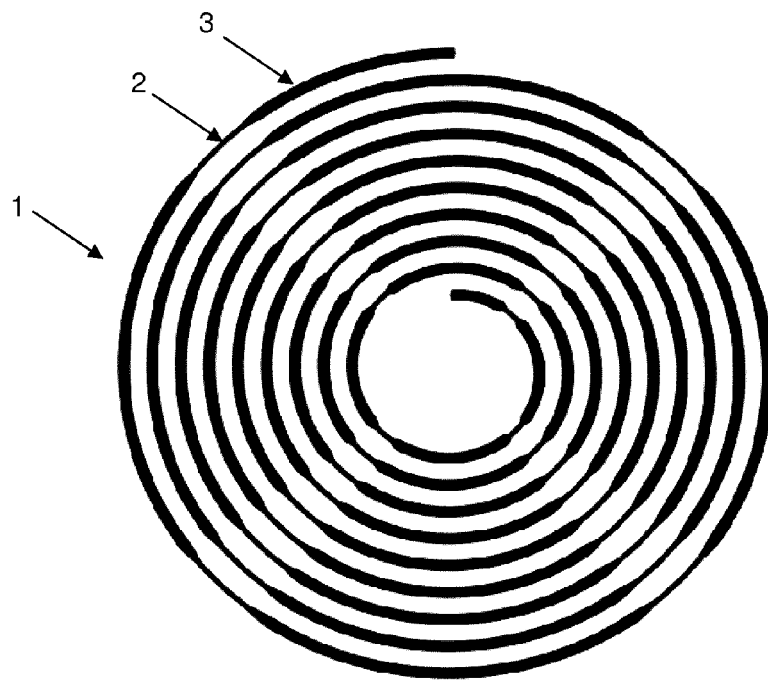


Figure 1

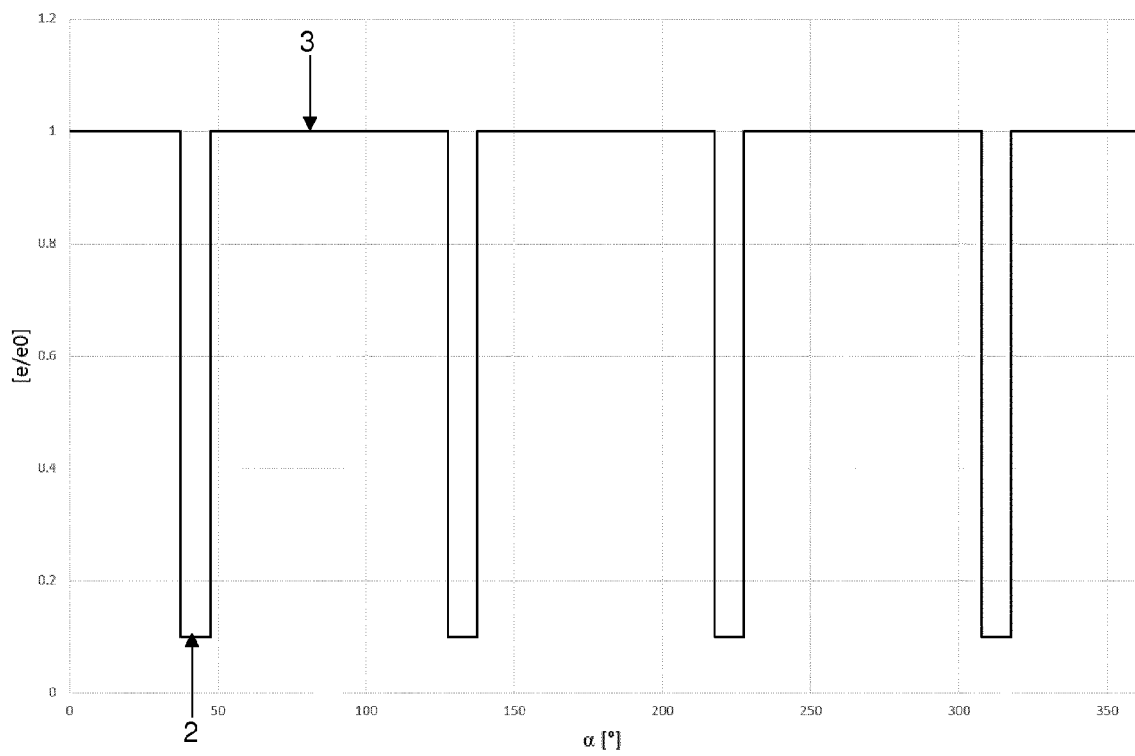


Figure 2

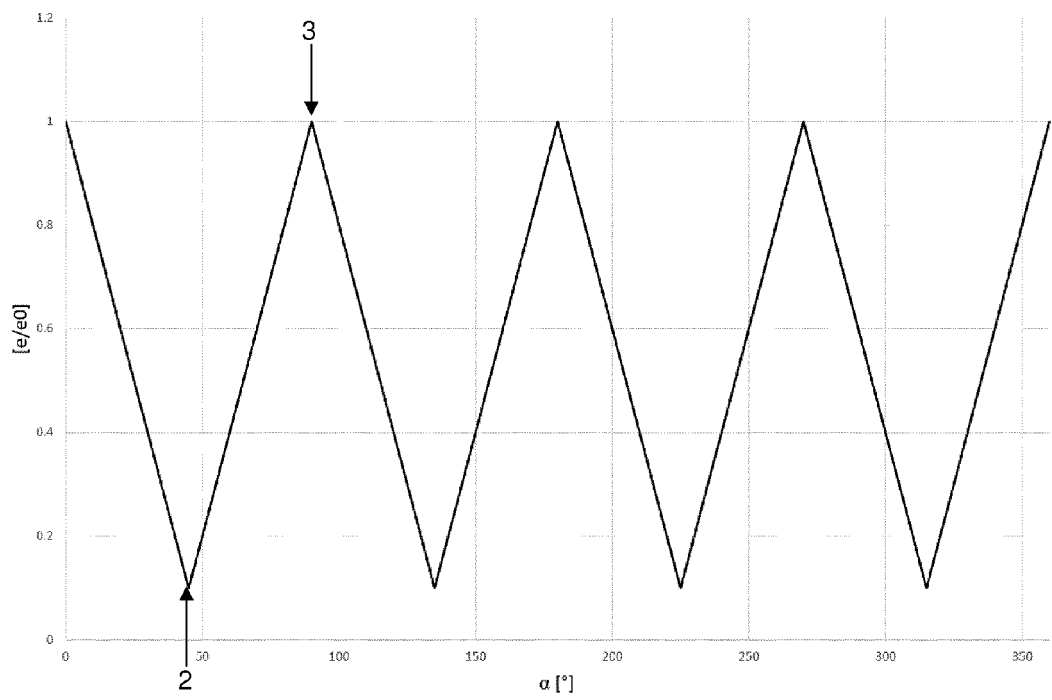


Figure 3

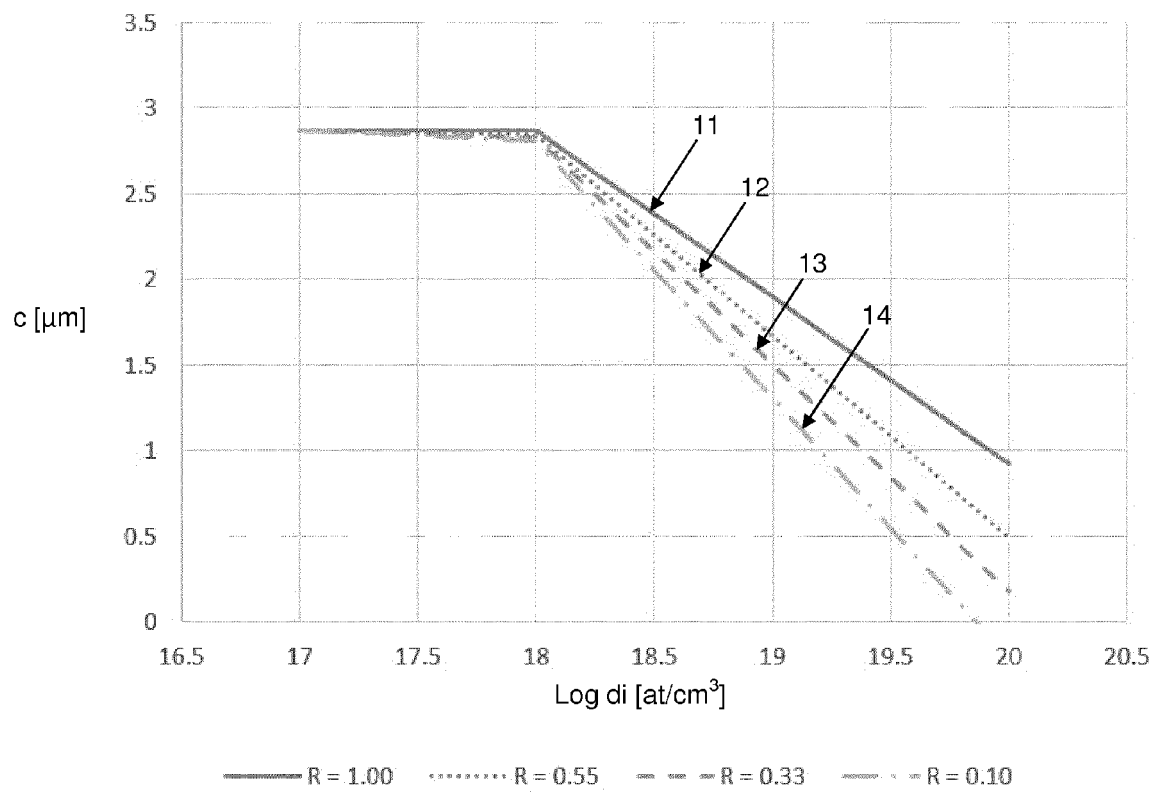


Figure 4



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 15 19 0441

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)
X	CH 699 780 A2 (RICHEMONT INT SA [CH]) 30 avril 2010 (2010-04-30) * figures 1,2a,2b *	1,2,8-23	INV. G04B17/06 G04B17/22
X	CH 709 076 A2 (ETA SA MANUFACTURE HORLOGÈRE SUISSE [CH]) 30 juin 2015 (2015-06-30) * figure 1 *	1-7, 12-23	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			G04B
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
Berlin		31 mars 2016	McGinley, Colm
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 15 19 0441

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.

31-03-2016

10	Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
	CH 699780 A2	30-04-2010	AUCUN	
	-----		-----	
15	CH 709076 A2	30-06-2015	AUCUN	
	-----		-----	
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

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 1258786 A [0008]
- EP 1422436 A [0009]