

CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH** **709 628 B1**

(51) Int. Cl.: **G04B** 17/06 (2006.01)
G04B 17/22 (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: 01231/15

(22) Date de dépôt: 27.08.2015

(43) Demande publiée: 30.10.2015

(24) Brevet délivré: 15.06.2016

(45) Fascicule du brevet publié: 15.06.2016

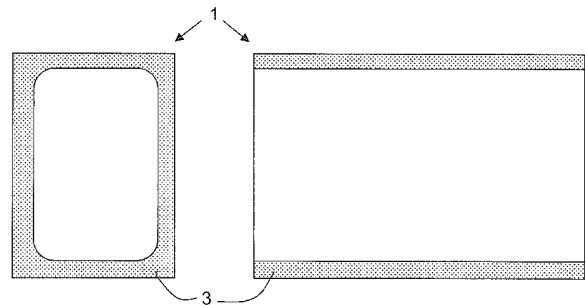
(73) Titulaire(s):
CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique
S.A. - Recherche et Développement, Rue Jaquet-Droz 1
2002 Neuchâtel (CH)

(72) Inventeur(s):
Marc-Alexandre Dubois, 1143 Apples (CH)
Pierre-Nicolas Volpe, 2000 Neuchâtel (CH)
Mohammad Mehdi Dadras, 2000 Neuchâtel (CH)
Olivier Dubochet, 2562 Port (CH)
Michel Despont, 1400 Cheseaux-Noréaz (CH)
Philippe Niedermann, 2034 Peseux (CH)

(74) Mandataire:
GLN S.A., Avenue Edouard-Dubois 20
2000 Neuchâtel (CH)

(54) **Ressort spiral thermocompensé pour mouvement d'horlogerie.**

(57) L'invention a pour objet un ressort spiral pour organe régulateur balancier-spiral d'un mouvement d'horlogerie, ledit ressort comportant un barreau (1) en silicium comprenant au moins une zone dopée (3) présentant une concentration de dopant de type P ou N. La concentration de dopant est telle que ladite zone dopée (3) présente un coefficient thermoélastique, ou, CTE, positif dans au moins une partie de ladite zone dopée (3).



Description

Domaine technique

[0001] La présente invention se rapporte au domaine de l'horlogerie. Elle concerne, plus particulièrement, un ressort spiral pour un organe régulateur d'un mouvement d'horlogerie.

Etat de la technique

[0002] La stabilité de la marche d'une montre mécanique, c'est-à-dire son isochronisme, est une question primordiale dans l'horlogerie. Parmi d'autres influences sur l'isochronisme, la température ambiante exerce un effet sur les composants de l'organe régulateur qui se compose typiquement d'un oscillateur balancier-spiral. Un changement de température engendre une dilatation ou une contraction du balancier et du ressort spiral qui modifient l'inertie du balancier et les propriétés mécaniques du ressort spiral respectivement. Les équations gouvernant le comportement de l'organe régulateur ainsi que l'influence thermique sont décrites dans le document CH 708 067, entre autres.

[0003] Afin de remédier à ce problème et d'améliorer la réponse thermique de l'isochronisme de l'organe régulateur, l'horloger peut choisir une construction particulière du balancier et/ou du ressort spiral. Dans le cas du balancier, en choisissant le matériau du balancier ainsi que sa forme, sa dilatation et sa contraction peuvent être modérées. Par exemple, des balanciers bimétalliques à serge fendue sont bien connus à cette fin.

[0004] Au niveau du spiral, historiquement la thermocompensation se fait en choisissant un alliage à faible coefficient thermoélastique (CTE), afin d'améliorer les propriétés thermoélastiques du spiral. Ce paramètre représente la variation relative du module de Young E en fonction de la température T , c'est-à-dire la première dérivée du module de Young en fonction de la température (dE/dT). Des exemples de tels alliages sont l'élinvar, le mételinvar, le durinvar, l'isoval, le nivarox avec addition de béryllium, etc.

[0005] Plus récemment, après l'introduction du spiral non-métallique en silicium, afin de donner au spiral un CTE faible ou quasi-nul, la demanderesse a développé le ressort en Silinvar[®]. Le barreau formant ce ressort est construit d'une âme en silicium monocristallin autour duquel est déposée une couche externe en oxyde de silicium (SiO_x) amorphe. Le SiO_x présente un CTE fortement positif, ce qui est l'inverse de celui du silicium (CTE fortement négatif), et par conséquent en choisissant l'épaisseur de la couche externe ainsi que les dimensions de l'âme du barreau, un ressort ayant des propriétés élastiques désirées et présentant un CTE du matériau composite quasi-nul peut être construit. Un ressort de ce genre est décrit dans le document EP 1 422 436.

[0006] Puisque l'on peut varier le CTE d'un ressort spiral en Silinvar[®] en choisissant l'épaisseur de la couche de SiO_x , il est également possible de construire un ressort spiral présentant une réponse thermique non nulle qui compense celle du balancier y associé. Par conséquent, on peut construire un organe régulateur balancier-spiral thermocompensé dans lequel le balancier est classique et non thermocompensé en soi. Néanmoins, cette couche étant relativement épaisse (environ 6% de la largeur du barreau), sa surface est peu esthétique.

[0007] D'autres solutions ont été développées afin de modifier le CTE d'un ressort spiral sans recours à une couche extérieure épaisse. Par exemple, le document CH 708 067 propose, entre autres, de doper un ressort en silicium afin de compenser au moins partiellement le coefficient thermoélastique (CTE). Ce dopage peut se faire sur l'entièreté du barreau formant le ressort, dans des couches intérieures du barreau, ou sur au moins une partie de la surface extérieure du ressort spiral.

[0008] Néanmoins, bien qu'il soit connu que les propriétés élastiques (et thermoélastiques) du silicium varient selon le dopage, ce document reste entièrement spéculatif, et ne donne aucun exemple concret de la concentration du dopage, ni explicitement, ni implicitement au moyen d'une paramétrisation. Par conséquent, l'homme du métier aurait une grande difficulté à mettre en œuvre ce spiral sur la base des informations fournies dans le document CH 708 067.

[0009] Le but de l'invention est, par conséquent, de proposer un ressort spiral pour organe régulateur d'un mouvement d'horlogerie modulaire dans lequel les défauts susmentionnés sont au moins partiellement surmontés, et qui est susceptible d'être mis en œuvre.

Divulguation de l'invention

[0010] De façon plus précise, l'invention concerne un ressort spiral pour organe régulateur balancier-spiral d'un mouvement d'horlogerie, ledit ressort comportant un barreau en silicium comprenant au moins une zone dopée présentant une concentration de dopant de type P ou N, caractérisé en ce que ladite concentration de dopant est telle que ladite zone dopée présente un coefficient thermoélastique (CTE) positif dans au moins une partie de ladite zone dopée.

[0011] En agencant cette au moins une zone ayant un coefficient thermoélastique (CTE) positif (pour au moins une direction cristallographique), le CTE du ressort en entier peut aisément être choisi par l'horloger pour répondre à ses besoins, qu'il soit nul ou non, et adapté à un balancier thermocompensé ou non thermocompensé. Le ressort est donc thermocompensé, au moins partiellement.

[0012] Avantageusement, ladite concentration de dopant est au moins 1.5×10^{19} atomes.cm⁻³. Plus précisément, le dopant peut être de type P et ladite concentration est d'au moins 1.7×10^{20} atomes.cm⁻³, ou le dopant est de type N et ladite concentration est d'au moins 1.9×10^{19} atomes.cm⁻³.

[0013] Avantageusement, la résistivité électrique de ladite zone est inférieure à 3.5×10^{-3} Ohm.cm. Plus précisément, le dopant est de type P et la résistivité électrique de ladite zone est inférieure à 3×10^{-4} Ohm.cm, ou le dopant est de type N et la résistivité électrique de ladite zone est inférieure à 3×10^{-3} Ohm.cm. Ces résistivités correspondent globalement aux concentrations de dopage susmentionnées, et permettent également aux zones d'être suffisamment conductrices d'électricité pour qu'aucune accumulation de charge statique ne puisse s'engendrer sur la surface du ressort lors des oscillations du ressort.

[0014] Avantageusement, le ressort peut comprendre, en outre, une couche extérieure en oxyde de silicium prévue sur au moins une surface extérieure dudit barreau. Une thermocompensation partagée entre la couche de SiO_x et les zones dopées est donc atteinte, ce qui réduit la concentration de dopage et ainsi les contraintes mécaniques y liées, et réduit l'épaisseur de la couche SiO_x par rapport à un ressort Silinvar®. Plus particulièrement, ladite couche de SiO_x peut présenter une épaisseur entre 0.05 µm et 1.54 µm, ce qui permet de fournir un ressort thermocompensé coloré au moyen d'un effet d'interférence, et donc sans apport de matière supplémentaire colorée.

[0015] Avantageusement, le barreau est en silicium monocristallin et présente une largeur (qui est la dimension définie dans le plan du ressort) qui varie en fonction de l'orientation du barreau par rapport à l'orientation cristallographique du silicium monocristallin. Plus particulièrement, la largeur du barreau est la plus petite lorsque le barreau est orienté parallèle ou perpendiculaire à l'orientation cristallographique pour laquelle le coefficient thermoélastique (CTE) est le plus positif, et la largeur du barreau est la plus grande lorsque le barreau est orienté selon une direction à +/- 45° de ladite orientation cristallographique. Ainsi, les parties du spiral pour lesquelles le CTE est le plus positif peuvent influencer de manière prépondérante le comportement thermoélastique du spiral. Plus concrètement, si le dopant est le phosphore, la largeur du barreau est plus petite lorsque le barreau s'oriente selon l'orientation cristallographique <100>, et la largeur du barreau est la plus grande lorsque la spire s'oriente selon l'orientation cristallographique <110>.

[0016] Avantageusement, le barreau présente une forme multicouche formée d'un empilement de couches de silicium. La distribution d'une ou plusieurs zones dopées peut donc aisément être gérée, par exemple en dopant une sélection desdites couches afin de former lesdites zones.

[0017] Par ailleurs, l'invention concerne également un procédé de fabrication d'un ressort spiral tel que décrit ci-dessus, comprenant les étapes de:

- prédéterminer des propriétés élastiques et des propriétés thermoélastiques dudit barreau dudit ressort;
- déterminer des dimensions dudit barreau, une concentration de dopage et une distribution de ladite au moins une zone dopée afin d'obtenir lesdites propriétés élastiques et thermoélastiques voulues, ledit dopage étant choisi de telle sorte que ladite zone dopée présente un coefficient thermoélastique (CTE) positif.

[0018] Finalement, l'invention concerne par ailleurs un procédé de fabrication d'un ressort spiral présentant une couche extérieure en SiO_x ayant une épaisseur entre 0.05 µm et 1.54 µm, comprenant les étapes de:

- prédéterminer des propriétés élastiques et des propriétés thermoélastiques dudit barreau dudit ressort;
- prédéterminer une couleur pour ledit ressort spiral;
- déterminer l'épaisseur de ladite couche extérieure de SiO_x correspondant à la couleur prédéterminée;
- déterminer l'effet de thermocompensation donné par ladite couche;
- déterminer des dimensions, une concentration de dopage et une distribution de ladite au moins une zone dopée afin d'obtenir lesdites propriétés élastiques et thermoélastiques voulues, ledit dopage étant choisi de telle sorte que ladite zone dopée présente un coefficient thermoélastique (CTE) positif;
- former une âme en silicium dudit barreau, ladite âme étant dopée selon ledit dopage et ladite distribution de ladite au moins une zone;
- former ladite couche extérieure de SiO_x, ladite couche ayant ladite épaisseur.

[0019] Ces procédés résultent en la fabrication de ressorts ayant les mêmes avantages susmentionnés.

Brève description des dessins

[0020] D'autres détails de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit, faite en référence aux dessins annexés dans lesquels:

- Fig. 1 à 5 représentent des vues en sections transversales et longitudinales de barreaux d'un ressort spiral selon divers modes de réalisation de l'invention;
- Fig. 6a, 6b, 7a, 7b, 9a et 9b sont des graphiques représentant des résultats de modélisations de ressorts selon l'invention, et
- Fig. 8 représente une vue en plan d'un mode de réalisation particulier d'un ressort selon l'invention.

Modes de réalisation de l'invention

[0021] Les fig. 1 à 4 illustrent des vues en section transversale (à gauche) et longitudinale (à droite) d'un barreau 1 formant un ressort spiral selon l'invention, et selon divers modes de réalisation non limitatifs. La forme en plan du spiral et ses variantes sont généralement connus, et ne doivent pas être décrits plus en détails ici.

[0022] Le barreau 1 est typiquement de section rectangulaire, plus étroit dans le plan du spiral que perpendiculaire à ce plan, mais une section carrée est également possible.

[0023] Le barreau 1 peut être formé par découpage d'une plaque (un «wafer») de silicium polycristallin, monocristallin ou amorphe, par un procédé tel qu'un usinage par plasma ou par gravure ionique réactive profonde (Deep Reactive Ion Etching DRIE), ou bien une gravure par voie humide. Dans le cas du silicium monocristallin, la relation entre le plan du wafer et les axes cristallographiques du silicium peut être choisie afin de définir certaines propriétés mécaniques, car certaines propriétés varient en fonction de l'orientation cristallographique: par exemple le module de Young, le module de cisaillement, etc. Alternativement, le silicium peut être déposé en une seule couche ou en plusieurs couches (une «multicouche») par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur (CVD).

[0024] Le barreau 1 comprend une ou plusieurs zones dopées 3, dont plusieurs variantes de distributions des zones sont illustrées dans les fig. 1 à 4.

[0025] Dans la fig. 1, toute la surface périphérique du barreau a été dopée jusqu'à une profondeur appropriée.

[0026] Dans la fig. 2, deux zones dopées 3 sont prévues sur les surfaces supérieure et inférieure du barreau 1, le dopant ayant été diffusé dans la surface à travers un masque de telle sorte que les coins desdites surfaces n'aient pas été dopés.

[0027] Dans la fig. 3, le barreau 1 est formé en tant que multicouche, et deux zones 3 intérieures ont été dopées pendant la formation du barreau en dopant des sous-couches intermédiaires lors de leur formation dans un appareil CVD, ou par diffusion de dopant après leur formation et avant formation de la sous-couche subséquente.

[0028] Dans la fig. 4, qui illustre également un mode de réalisation à multicouche, une zone 3 dopée intérieure qui ne s'étend pas sur toute la largeur du barreau, ainsi que toute la largeur des surfaces supérieure et inférieure ont été dopées.

[0029] Il va sans dire que toutes les caractéristiques individuelles de ces modes de réalisation peuvent être combinées de n'importe quelle manière. L'une ou plusieurs des zones 3 peuvent également être interrompues le long du barreau 1.

[0030] Par ailleurs, le dopage de chaque zone 3 ne doit pas nécessairement être identique à une autre, et le dopage dans une zone 3 peut être inhomogène.

[0031] Le silicium présente un CTE de l'ordre de $-60 \times 10^{-6}/K$ (-60 ppm/K), et celui du silicium dopé varie selon le dopant et selon sa concentration, à partir de substantiellement la même valeur pour un dopage infinitésimal, et peut atteindre une valeur de $+25 \times 10^{-6}/K$ ($+25$ ppm/K) pour un dopage de phosphore à 7.5×10^{19} atomes. cm^{-3} .

[0032] Afin de compenser le CTE du barreau 1 entier, au moins l'une des zones 3 est dopée de telle sorte que le CTE d'au moins une partie de ladite zone est positif, et est donc supérieur à zéro, afin de compenser le CTE négatif du silicium brut. Comme décrit en préambule, il est possible soit de rendre le CTE du barreau quasi-nul afin que le ressort spiral soit thermocompensé en soi, mais il est également possible que le CTE du barreau soit choisi afin de thermocompenser l'organe régulateur en entier, et donc de compenser l'effet sur l'isochronisme d'une réponse thermique non nulle du balancier. A cet effet, le CTE du barreau peut être légèrement positif ou négatif, selon la réponse thermique du balancier. Un balancier simple et économique peut donc être utilisé dans un mouvement présentant un isochronisme exceptionnel, convenant à l'intégration dans une montre haut de gamme.

[0033] Le dopage peut être de type P (typiquement du bore), ou de type N (typiquement du phosphore, de l'antimoine ou de l'arsenic). Un dopage de type N est préféré.

[0034] La concentration de dopant nécessaire varie selon l'élément choisi, et selon l'orientation cristallographique du barreau dans le cas du silicium monocristallin. La thermocompensation se fait principalement dans la direction $\langle 110 \rangle$ avec un dopage de type P à partir d'une concentration supérieure à environ 1.7×10^{20} atomes. cm^{-3} , ce qui correspond à une résistivité électrique maximum de 3×10^{-4} Ohm.cm. Pour un dopage de type N, c'est principalement dans la direction $\langle 100 \rangle$ à partir d'une concentration supérieure à environ 1.9×10^{19} atomes. cm^{-3} , ce qui correspond à une résistivité électrique maximum de 3×10^{-3} Ohm.cm. Une telle résistivité rend les zones suffisamment conductrices d'électricité pour dissiper des éventuelles charges statiques qui peuvent s'accumuler sur la surface de ressorts spiraux non métalliques, sans nécessiter une couche métallique superficielle telle que décrite dans le document EP 1 837 722.

[0035] Le dopage ayant également un effet sur les modules de Young et de cisaillement du matériau du barreau, le calcul des dimensions du barreau afin d'obtenir l'élasticité voulue doit en tenir compte.

[0036] La fig. 5 illustre le ressort de la fig. 3 muni d'une couche extérieure de SiO_x sur au moins une surface extérieure, de façon similaire au ressort Silinvar[®] susmentionné, mais moins épaisse. Il va sans dire que n'importe quel agencement de zones 3 dopées peut également être utilisé.

[0037] Une combinaison du principe de l'invention avec le principe de la couche extérieure de SiO_x présente plusieurs avantages. En effet, la thermocompensation se fait par la somme de celle du dopage et de celle de la couche SiO_x , ce

qui permet d'utiliser une concentration de dopant moins importante que dans le cas où on n'applique que du dopage. Un dopage du silicium engendre des contraintes mécaniques à cause de la présence des atomes du dopant dans la structure cristalline du matériau de base. En réduisant cette concentration, ces contraintes sont ainsi réduites.

[0038] Par ailleurs, grâce à l'effet (partiel) de thermocompensation du dopant, l'épaisseur de la couche SiO_x peut être réduite par rapport à un ressort qui n'est thermocompensé que par cette couche. L'épaisseur peut donc être choisie à volonté entre environ 0.05 μm et 1.54 μm , afin d'obtenir un effet de couleur par interférence. La couleur obtenue en fonction de l'épaisseur de la couche est décrite dans des chartes de couleurs standards dans la littérature.

[0039] Par conséquent, un ressort spiral thermocompensé ayant une couleur désirée et sans apport de colorant peut être obtenu en prédéterminant les propriétés élastiques (principalement sa raideur), thermoélastiques (c'est-à-dire le CTE du spiral), et la couleur désirée. Puis, l'épaisseur de la couche SiO_x 5 correspondant à la couleur voulue est déterminée, et l'effet de thermocompensation (c'est-à-dire l'influence sur les propriétés thermoélastiques) obtenu par cette couche est calculé. La différence entre l'effet de thermocompensation dû à la couche et les propriétés thermoélastiques voulues du spiral peut par la suite être utilisée afin de calculer les dimensions de l'âme 1a du barreau 1 du ressort, le dopage et la distribution des zones dopées 3 afin d'obtenir les propriétés élastiques et thermoélastiques désirées pour le ressort 1. Puisque le dopage influence également les propriétés élastiques du ressort (notamment le module de Young), ce calcul se fait typiquement de manière itérative.

[0040] Des modélisations ont été effectuées afin de concrétiser des exemples de ce principe, avec les hypothèses/paramètres suivants:

- couche 5 de SiO_x uniforme sur tout le pourtour du barreau 3;
- ressort formé en tant que spirale d'Archimède, les dimensions du barreau étant de $120 \times 30 \mu\text{m}$, la longueur des spires étant 100 mm, et la fréquence d'oscillation de l'oscillateur étant 4 Hz;
- balancier avec un coefficient d'expansion thermique de $\alpha = 15 \times 10^{-6}/\text{K}$ (15 ppm/K);
- dopage dans le volume du barreau;
- épaisseur t_{ox} de SiO_x entre 0 μm et 3 μm .

[0041] Un modèle mathématique standard MathCAD a été utilisé pour les calculs.

[0042] La fig. 6a illustre le coefficient thermique (CT, exprimé en secondes par jour par Kelvin) de fréquence pour le spiral seul, en fonction de l'épaisseur de la couche de SiO_x , pour un dopage type N (phosphore) ayant une concentration de 4.1×10^{19} atomes. cm^{-3} . Ce dopage produit un CTE de $15.92 \times 10^{-6}/\text{K}$ (15.92 ppm/K) selon la direction cristallographique $\langle 100 \rangle$. La fig. 6b illustre l'effet lorsque ce spiral est associé au balancier susmentionné afin de former un oscillateur. Pour que le CT de l'oscillateur entier (c'est-à-dire la combinaison du ressort avec son balancier) soit égal à zéro, il découle de ce graphique que l'épaisseur d'oxyde est environ 1.2 μm , ce qui correspond à une couleur à peu près violet-rouge selon le tableau de couleur suivant:

http://www.htelabs.com/appnotes/sio2_color_chart_thermal_silicon_dioxide.htm

[0043] La fig. 7a illustre de manière analogue à la fig. 6a, le coefficient thermique (CT) de fréquence pour le spiral seul, pour un dopage type N (phosphore) plus fort, à une concentration de 7.47×10^{19} atomes. cm^{-3} . Ce dopage produit un CTE de $25.2 \times 10^{-6}/\text{K}$ (25.2 ppm/K) selon la direction cristallographique $\langle 100 \rangle$. La fig. 7b illustre l'effet lorsque ce spiral est associé au balancier susmentionné afin de former un oscillateur. Pour que le CT de l'oscillateur soit égal à zéro, il découle de ce graphique que l'épaisseur d'oxyde est environ 1.0 μm , ce qui correspond à une couleur à peu près rose oeillet selon le même tableau de couleur.

[0044] La fig. 8 illustre une variante particulière d'un spiral 10 selon l'invention. Ce spiral 10 est fabriqué à partir d'un wafer en silicium monocristallin, et dont le barreau 1 formant les spires présente une largeur qui varie dans le plan du spiral, sa largeur variant selon les orientations cristallographiques du silicium. Lorsque la ligne médiane de la spire (et donc le barreau 1) est orienté parallèle ou perpendiculaire à la direction cristallographique où le CTE est le plus positif (par exemple la direction $\langle 100 \rangle$ dans le cas d'un dopage de type N au moyen du phosphore), la largeur du barreau est plus petite (partie 10a), et lorsque la spire est orientée à 45° à cette direction (par exemple parallèle ou perpendiculaire à la direction $\langle 110 \rangle$ dans le cas d'un dopage de type N au moyen du phosphore), la largeur du barreau est plus grande. En effet, la largeur du barreau 1 varie donc avec une périodicité de 4 cycles par tour du spiral. Ce faisant, le CT du spiral est influencé principalement par les régions à CTE positif, et la variation de la largeur peut créer un effet optique attractif lorsque le spiral oscille.

[0045] Les fig. 9a et 9b, de manière analogue aux fig. 6a, 6b et 7a, 7b respectivement, illustrent le coefficient thermique (CT) de fréquence pour le spiral de la fig. 8 seul, pour un dopage type N (phosphore) plus fort, ayant une concentration de 7.47×10^{19} atomes. cm^{-3} . La largeur L du barreau 1 formant les spires du ressort 10 varie entre 23 μm (partie 10a) et 34 μm (partie 10b). Ce dopage produit un CTE de $25.2 \times 10^{-6}/\text{K}$ (25.2 ppm/K) selon la direction cristallographique $\langle 100 \rangle$. La fig. 9b illustre l'effet lorsque ce spiral est associé au balancier susmentionné afin de former un oscillateur. Pour que le CT de l'oscillateur soit égal à zéro, il découle de ce graphique que l'épaisseur d'oxyde est environ 0.69 μm , ce qui correspond à une couleur allant du bleu au bleu vert selon le même tableau de couleur.

Revendications

1. Ressort spiral pour organe régulateur balancier-spiral d'un mouvement d'horlogerie, ledit ressort comportant un barreau (1) en silicium comprenant au moins une zone dopée (3) présentant une concentration de dopant de type P ou N, caractérisé en ce que ladite concentration de dopant est telle que ladite zone dopée (3) présente un coefficient thermoélastique positif dans au moins une partie de ladite zone dopée (3).
2. Ressort selon la revendication précédente, dans lequel ladite concentration est au moins 1.5×10^{19} atomes.cm⁻³.
3. Ressort selon la revendication précédente, dans lequel le dopant est de type P et ladite concentration est d'au moins 1.7×10^{20} atomes.cm⁻³, ou le dopant est de type N et ladite concentration est d'au moins 1.9×10^{19} atomes.cm⁻³.
4. Ressort selon la revendication 1, dans lequel la résistivité électrique de ladite zone dopée (3) est inférieure à 3.5×10^{-3} Ohm.cm.
5. Ressort selon la revendication 4, dans lequel le dopant est de type P et ladite résistivité électrique est inférieure à 3×10^{-4} Ohm.cm, ou le dopant est de type N et ladite résistivité électrique est inférieure à 3×10^{-3} Ohm.cm.
6. Ressort selon l'une des revendications précédentes, comprenant en outre une couche extérieure (5) en oxyde de silicium prévue sur au moins une surface extérieure dudit barreau (1).
7. Ressort selon la revendication 6, dans lequel ladite couche (5) présente une épaisseur entre 0.05 µm et 1.54 µm.
8. Ressort selon l'une des revendications 6 et 7, dans lequel le barreau (1) est en silicium monocristallin et présente une largeur (L) dans le plan du ressort qui varie en fonction de l'orientation du barreau (1) par rapport à l'orientation cristallographique du silicium monocristallin.
9. Ressort selon la revendication 8, dans lequel la largeur (L) du barreau (1) est la plus petite lorsque le barreau est orienté parallèle ou perpendiculaire à l'orientation cristallographique pour laquelle le coefficient thermoélastique est le plus positif, et la largeur (L) du barreau (1) est la plus grande lorsque le barreau (1) est orienté selon une direction à $\pm 45^\circ$ de ladite orientation cristallographique.
10. Ressort selon la revendication 9, dans lequel le dopant est le phosphore, la largeur (L) du barreau (1) est la plus petite lorsque le barreau (1) est orienté parallèlement ou perpendiculairement à l'orientation cristallographique $\langle 100 \rangle$, et la largeur (L) du barreau (1) est la plus grande lorsque le barreau est orienté parallèle ou perpendiculaire à l'orientation cristallographique $\langle 110 \rangle$.
11. Ressort selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le barreau (1) présente une forme multicouche formée d'un empilement de couches de silicium.
12. Ressort selon la revendication 11, dans lequel une partie desdites couches est dopée afin de former lesdites zones (3).
13. Procédé de fabrication d'un ressort spiral selon la revendication 1, comprenant les étapes de:
 - prédéterminer des propriétés élastiques et des propriétés thermoélastiques dudit barreau (1) dudit ressort;
 - déterminer des dimensions dudit barreau (1), une concentration de dopage et une distribution de ladite au moins une zone dopée (3) afin d'obtenir lesdites propriétés élastiques et thermoélastiques prédéterminées, ledit dopage étant choisi de telle sorte que ladite zone dopée (3) présente un coefficient thermoélastique positif dans au moins une partie de ladite zone dopée (3).
14. Procédé de fabrication d'un ressort spiral selon la revendication 7, comprenant les étapes de:
 - prédéterminer des propriétés élastiques et des propriétés thermoélastiques dudit barreau (1) dudit ressort;
 - prédéterminer une couleur pour ledit ressort spiral;
 - déterminer l'épaisseur de ladite couche extérieure (5) d'oxyde de silicium correspondant à la couleur prédéterminée;
 - déterminer l'effet de thermocompensation donné par ladite couche (5);
 - déterminer des dimensions, une concentration de dopage et une distribution de ladite au moins une zone dopée afin d'obtenir lesdites propriétés élastiques et thermoélastiques prédéterminées, ledit dopage étant choisi de telle sorte que ladite zone dopée (3) présente un coefficient thermoélastique positif dans au moins une partie de ladite zone dopée (3);
 - former une âme (1a) en silicium dudit barreau, ladite âme (1a) étant dopée selon ladite concentration de dopage et ladite distribution de ladite au moins une zone (3);
 - former ladite couche extérieure (5) d'oxyde de silicium, ladite couche (5) ayant ladite épaisseur.

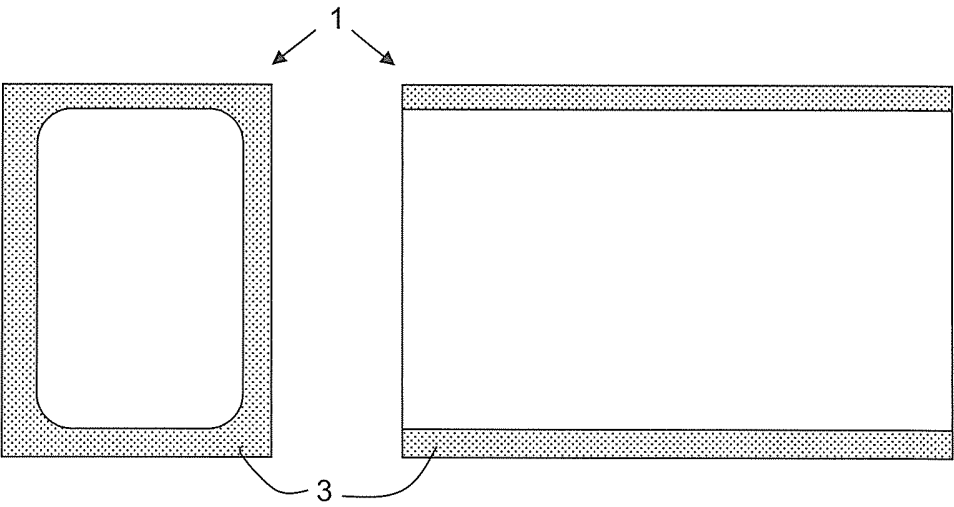


Figure 1

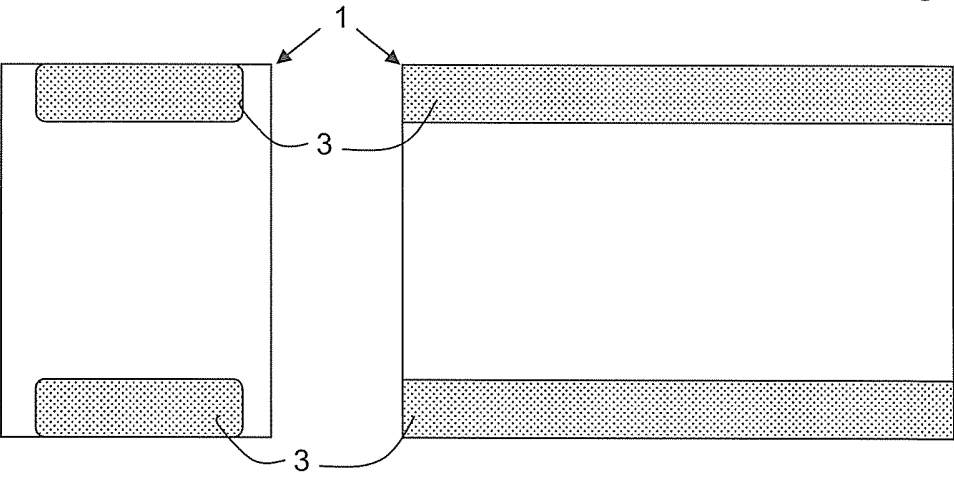


Figure 2

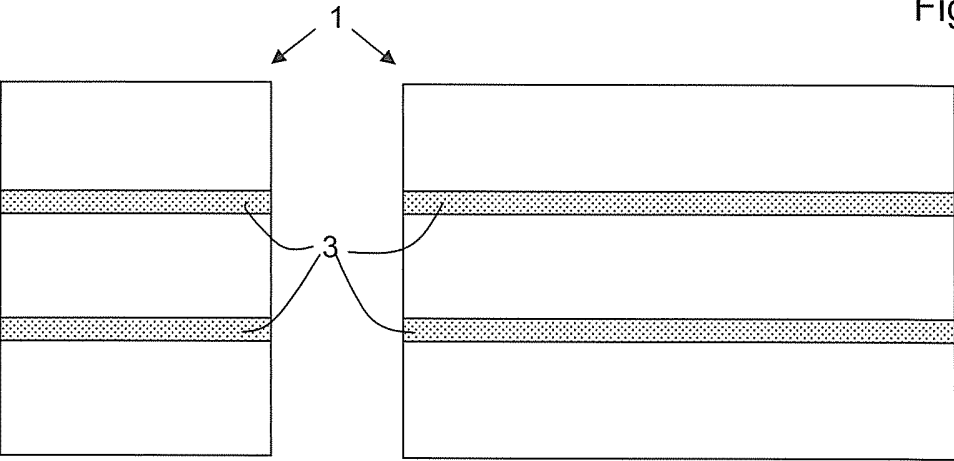


Figure 3

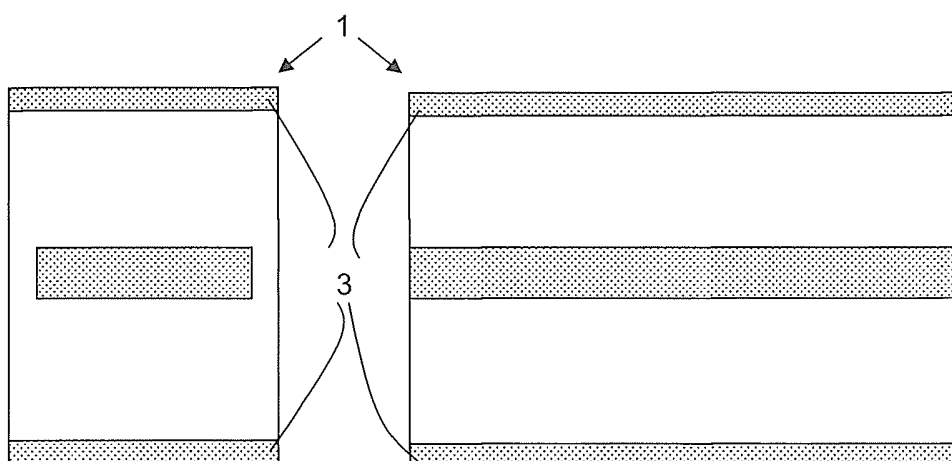


Figure 4

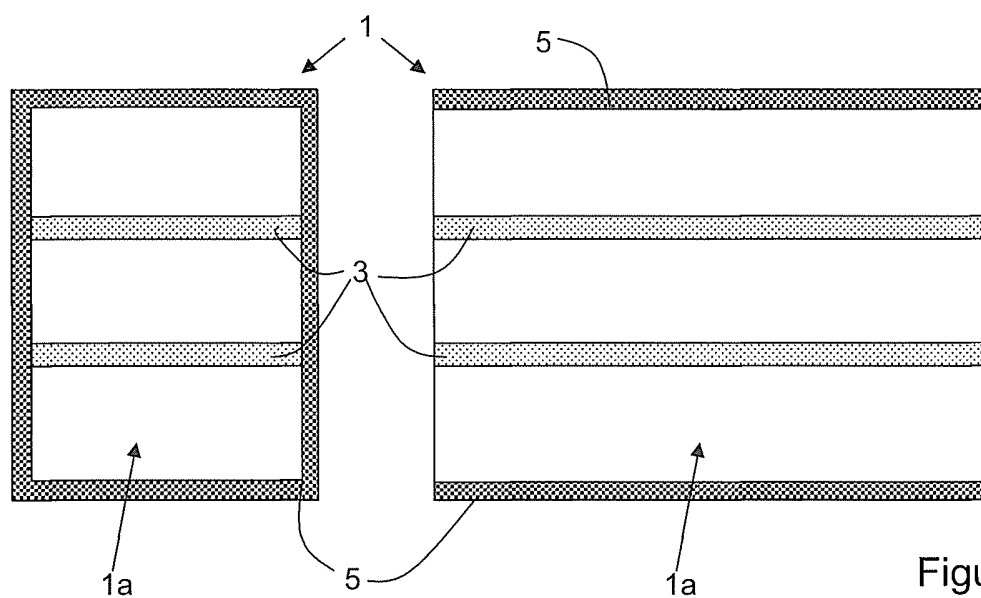


Figure 5

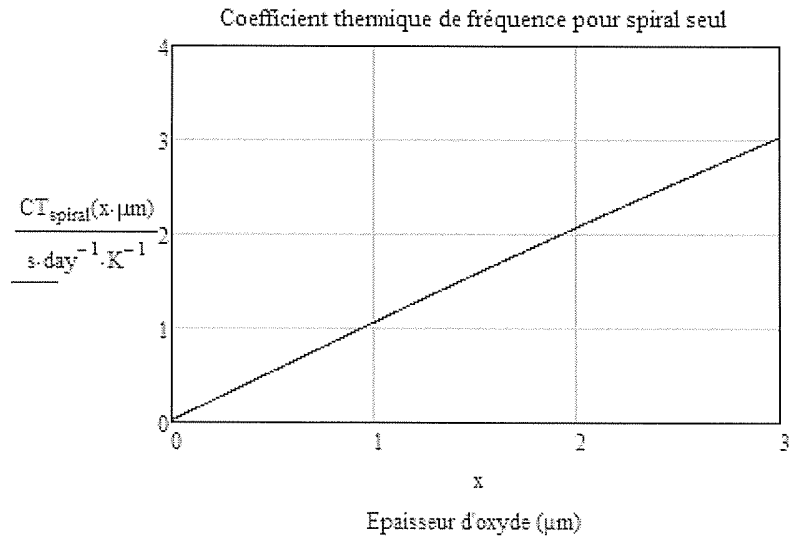


Figure 6a

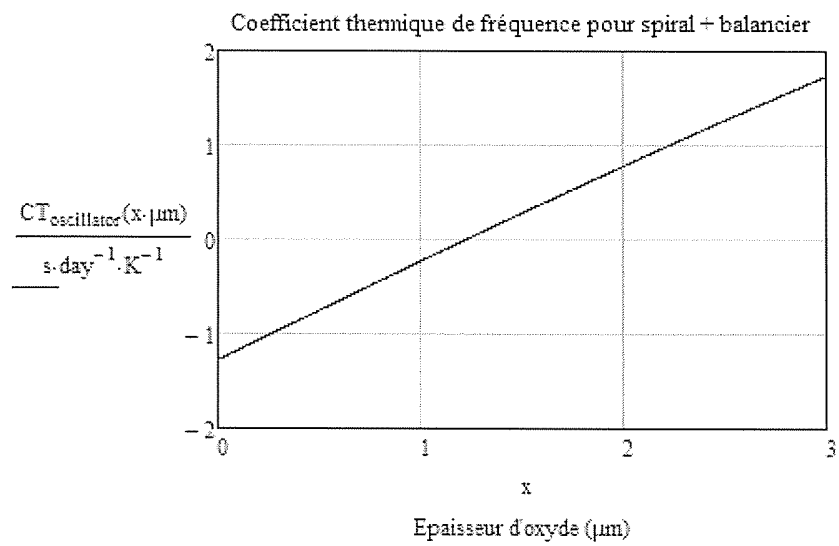


Figure 6b

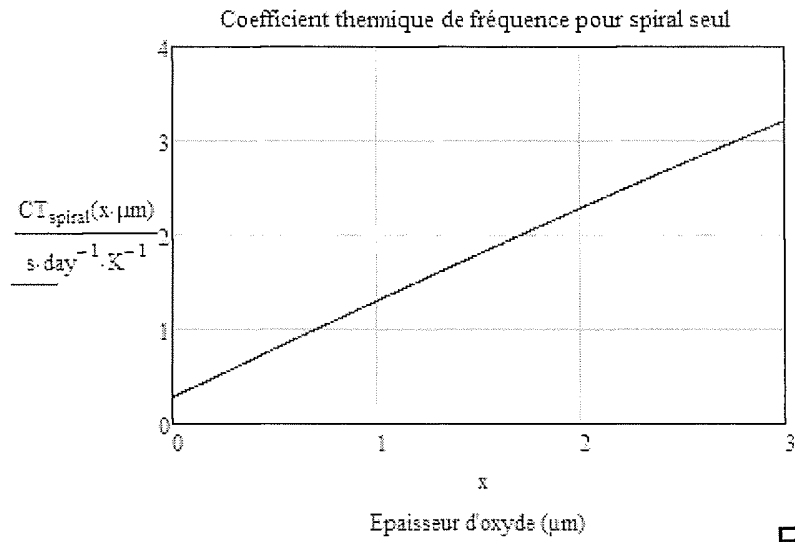


Figure 7a

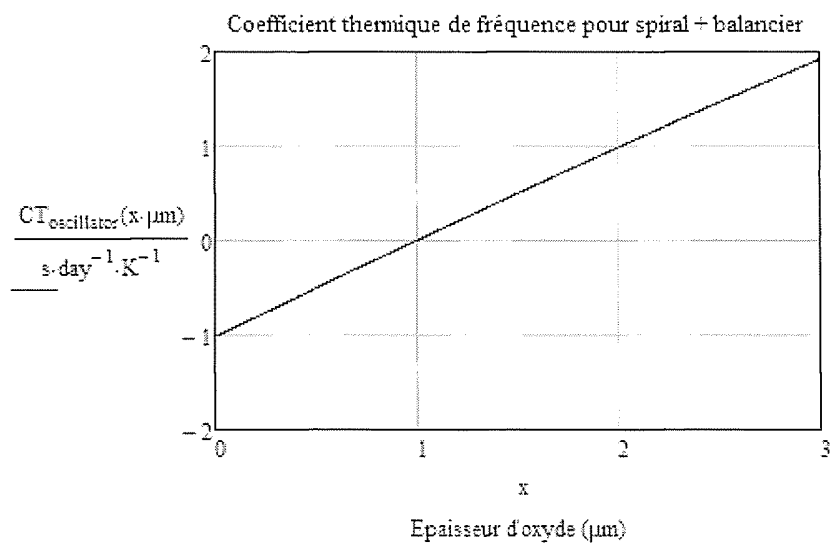


Figure 7b

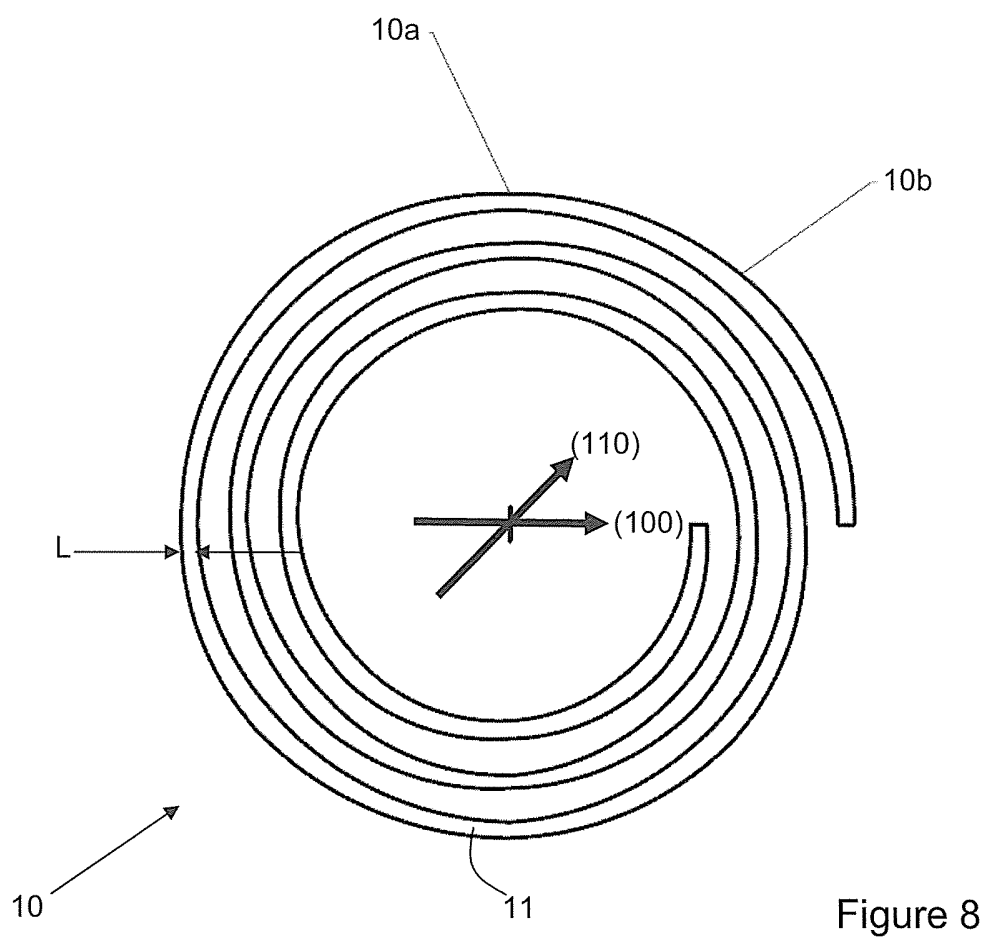


Figure 8

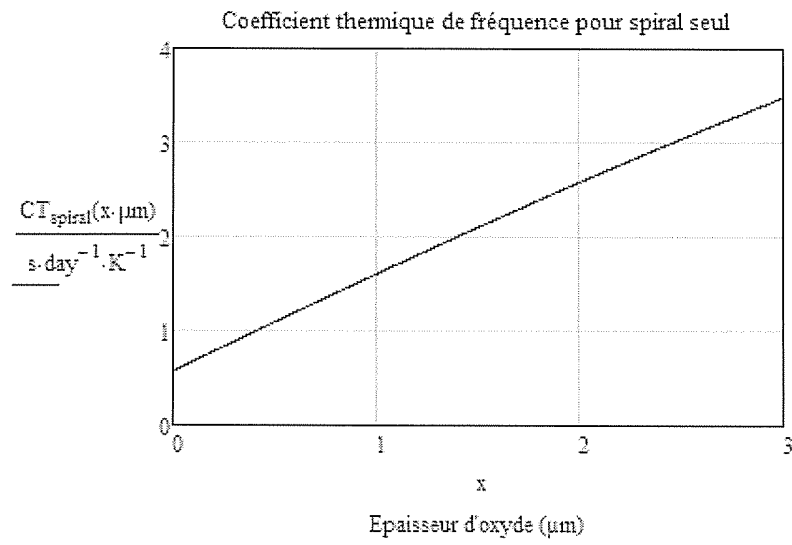


Figure 9a

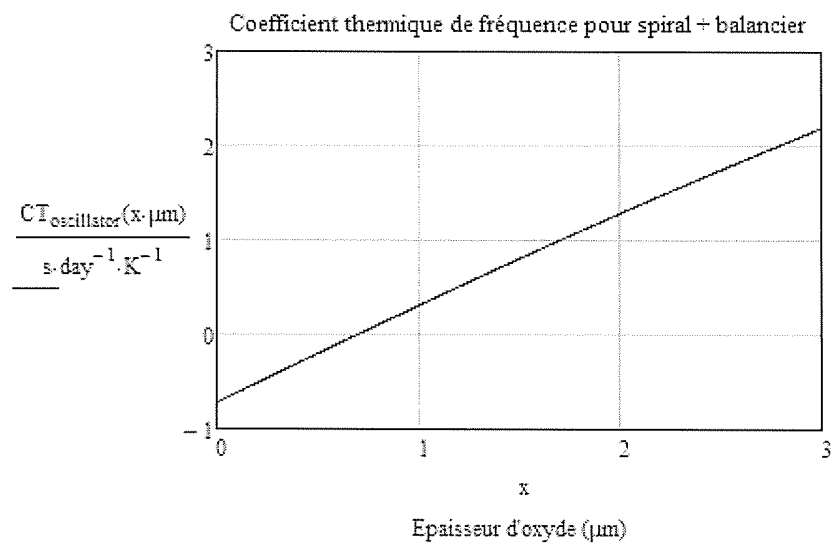


Figure 9b