



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
02.11.2016 Bulletin 2016/44

(51) Int Cl.:
G04B 17/06 (2006.01) **F16F 1/02** (2006.01)
F16F 1/04 (2006.01) **F16F 1/10** (2006.01)
G04B 17/22 (2006.01) **B81C 1/00** (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **16161007.6**

(22) Date de dépôt: **17.03.2016**

(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 MD

(71) Demandeur: **Sigatec SA**
1950 Sion (CH)

(72) Inventeur: **Glassey, Marc-André**
1967 Bramois (CH)

(74) Mandataire: **BOVARD AG**
Optingenstrasse 16
3000 Bern 25 (CH)

(54) **RESSORT SPIRAL THERMOCOMPENSÉ ET SON PROCÉDÉ DE FABRICATION**

(57) Un ressort spiral thermocompensé pour oscillateur mécanique de pièce d'horlogerie comprend un brin élastiquement flexible (2) s'étendant selon une ligne en spirale (ℓ). Ce brin élastiquement flexible (2) comprend une portion (3) en silicium monocristallin (A) et une portion (5) en silicium polycristallin (C) qu'une couche de

séparation (4) en oxyde de silicium (B) sépare l'une de l'autre. La portion (4) en silicium monocristallin (A) et la portion (5) en silicium polycristallin (C) sont mécaniquement liées à la couche de séparation.

L'invention concerne le ressort spiral susmentionné, ainsi qu'un procédé de fabrication de ce ressort spiral.

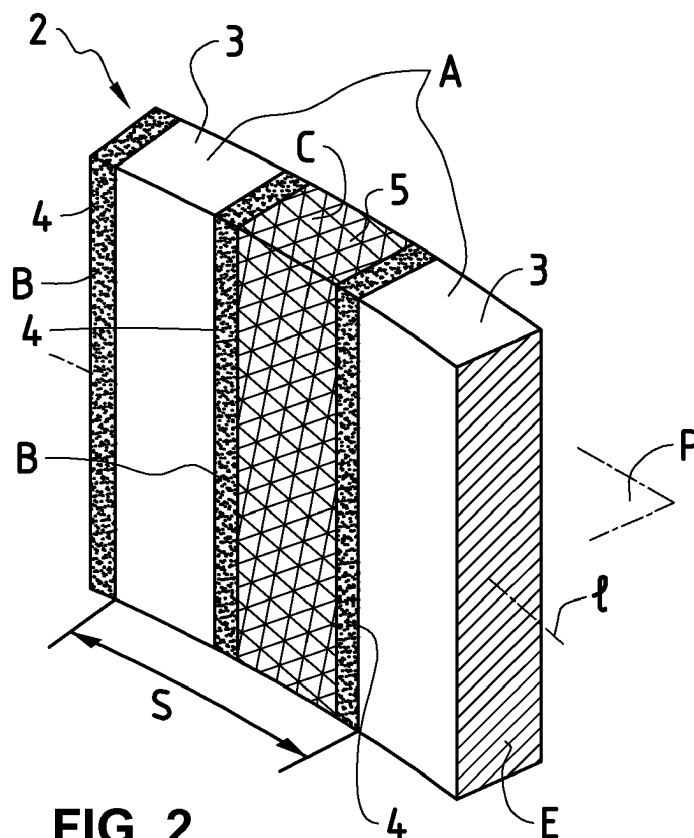


FIG. 2

Description

Domaine technique de l'invention

[0001] La présente invention se rapporte au domaine de l'horlogerie. Plus précisément, elle concerne un ressort spiral thermocompensé et son procédé de fabrication.

Description de l'état de la technique

[0002] Un oscillateur est présent dans tout mouvement d'horlogerie. C'est ce qu'on appelle couramment l'organe réglant du mouvement d'horlogerie. La fonction de cet oscillateur est de diviser le temps en unités égales et de fournir ainsi la cadence sur laquelle est basée la mesure du temps.

[0003] Un oscillateur mécanique classiquement utilisé en horlogerie résulte de l'accouplement d'un ressort spiral et d'un balancier jouant le rôle d'un volant d'inertie. Le ressort spiral est un ressort en spirale qui produit un couple de rappel sur le balancier dès que celui-ci est hors d'une position spécifique dite position de point mort. En fonctionnement, le balancier effectue un mouvement de va-et-vient répétitif lors duquel il est alternativement rap-

pelé vers la position de point mort puis emporté au-delà de celle-ci du fait de son élan. Ce mouvement de va-et-vient est régulier et on l'utilise pour diviser le temps en unités égales.

[0004] La précision de la marche d'une montre mécanique dépend de la stabilité de la fréquence de l'oscillateur mécanique. La stabilité de cette fréquence dépend à son tour largement de la stabilité des caractéristiques élastiques du ressort spiral de l'oscillateur mécanique. Ces caractéristiques élastiques peuvent notamment varier avec la température. A cet égard, il est connu qu'une variation de la température peut résulter en une accélération ou en un ralentissement de la marche d'une montre. Le « coefficient thermique du module d'Young » décrit la variation du module d'élasticité d'un matériau en fonction de la température. Le coefficient thermique du module d'Young du ressort spiral est une grandeur pertinente pour les questions de précision de mesure du temps.

[0005] Traditionnellement, les ressorts spiraux utilisés dans les montres mécaniques sont fabriqués en métal. Historiquement, ils ont été réalisés tout d'abord en acier, puis en des alliages particuliers développés de manière spécifique pour obtenir des ressorts spiraux pratiquement insensibles aux variations de température. Cependant, ces dernières années ont vu apparaître des ressorts spiraux fabriqués en silicium ou en d'autres matériaux non-métalliques pour lesquels se posent des problèmes de variation du module d'Young en fonction de la température.

[0006] Des solutions pour réduire la sensibilité des ressorts spiraux en silicium aux variations de température ont été imaginées. Elles utilisent le principe d'une com-

pensation thermique réalisée par une couche en oxyde de silicium. Cette couche en oxyde de silicium peut être une couche extérieure, ce que proposent les brevets ou demandes de brevet EP 1 422 436, WO 2009/068091 et EP 2 284 629.

[0007] Toutefois, il peut être préférable que la couche réalisant la compensation thermique se trouve à l'intérieur du ressort spiral. La demande de brevet suisse CH 699 780 propose une solution grâce à laquelle un ressort spiral est pourvu d'une couche en oxyde de silicium non superficielle.

Exposé sommaire de l'invention

[0008] L'invention a au moins pour but de proposer une alternative à la solution connue de la demande de brevet suisse CH 699 780 susmentionnée et grâce à laquelle un ressort spiral est pourvu d'une couche en oxyde de silicium non superficielle.

[0009] Selon l'invention, ce but est atteint grâce à un ressort spiral thermocompensé pour oscillateur mécanique de pièce d'horlogerie. Ce ressort spiral comprend un brin élastiquement flexible s'étendant selon une ligne en spirale. Ce brin élastiquement flexible comprend au moins une portion en un premier matériau, à savoir en silicium monocristallin, au moins une couche de séparation en un deuxième matériau, à savoir en oxyde de silicium et au moins une portion en un troisième matériau différent du silicium monocristallin et de l'oxyde de silicium. La portion en silicium monocristallin est mécaniquement liée à la couche de séparation en oxyde de silicium. La couche de séparation en oxyde de silicium sépare la portion en silicium monocristallin de la portion en le troisième matériau. La portion en le troisième matériau est mécaniquement liée à la couche de séparation en oxyde de silicium.

[0010] Le ressort spiral selon l'invention a été imaginé conjointement à un procédé de fabrication permettant de le réaliser. Ce procédé de fabrication est exposé plus loin et constitue un autre aspect de l'invention. En d'autres termes, le ressort spiral selon l'invention est tel qu'il existe un procédé permettant de le réaliser.

[0011] Le ressort spiral selon l'invention a pour avantage de permettre sa fabrication d'une manière telle qu'il peut être obtenu une très grande précision sur l'épaisseur de sa couche de séparation ou de ses couches de séparation. En particulier, cette très grande précision peut être obtenue avec le procédé de fabrication selon l'invention.

[0012] La couche de séparation du ressort spiral selon l'invention peut s'étendre selon une ligne simplement en spirale. Elle peut également posséder une autre forme et, dans de multiples cas où il en est ainsi, le ressort spiral conforme à l'invention peut encore être fabriqué, par exemple au moyen du procédé de fabrication selon l'invention. La couche de séparation du ressort spiral selon l'invention peut être parallèle à la fibre moyenne du brin élastiquement flexible. Localement ou partout, elle

peut également posséder une autre orientation et, dans de multiples cas où il en est ainsi, le ressort spiral selon l'invention peut encore être fabriqué, par exemple au moyen du procédé de fabrication selon l'invention.

[0013] En d'autres termes, le ressort spiral selon l'invention a pour autre avantage de pouvoir être fabriqué, par exemple au moyen du procédé de fabrication conforme à l'invention, y compris dans certains cas où sa ou ses couches de séparation ne s'étendent pas selon une ligne simplement en spirale, mais possèdent une autre forme, et/ou dans certains cas où sa ou ses couches de séparation ne sont pas parallèles à la fibre moyenne du brin élastiquement flexible, mais possèdent une autre orientation, localement ou partout.

[0014] En résumé, l'invention a pour avantage de procurer un plus grand choix quant à l'orientation et la forme de la couche de séparation.

[0015] Une manière de tirer parti de ce plus grand choix est que la couche de séparation ou plusieurs couches de séparation soient utilisées pour modifier une fois ou plusieurs fois la raideur en flexion du brin élastiquement flexible, le long de celui-ci, en plus de produire une thermocompensation.

[0016] Le ressort spiral défini ci-dessus peut incorporer une ou plusieurs autres caractéristiques avantageuses, isolément ou en combinaison, en particulier parmi celles définies ci-après.

[0017] Avantageusement, le troisième matériau est du silicium polycristallin.

[0018] Avantageusement, la couche de séparation en oxyde de silicium ou plusieurs couches de séparation en oxyde de silicium chacune séparant une portion en silicium monocristallin et une portion en le troisième matériau l'une de l'autre en étant mécaniquement liée à ces portions comportent plusieurs segments non parallèles à la ligne en spirale, ces segments étant décalés entre eux le long du brin élastiquement flexible.

[0019] Avantageusement, le nombre desdits segments par millimètre de brin élastiquement flexible est modifié au moins une fois le long du brin élastiquement flexible.

[0020] Avantageusement, le brin élastiquement flexible possède une raideur en flexion que la couche de séparation en oxyde de silicium ou plusieurs couches de séparation en oxyde de silicium chacune séparant une portion en silicium monocristallin et une portion en le troisième matériau l'une de l'autre en étant mécaniquement liée à ces portions modifient au moins une fois le long du brin élastiquement flexible.

[0021] Avantageusement, le brin élastiquement flexible possède une raideur en flexion et une section droite qui est modifiée au moins une fois le long du brin élastiquement flexible de manière à modifier au moins une fois la raideur en flexion le long du brin élastiquement flexible.

[0022] Avantageusement, le brin élastiquement flexible comporte une répétition d'une séquence qui se succède à elle-même le long du brin élastiquement flexible, cette séquence étant une succession selon un ordre qui,

le long du brin élastiquement flexible, est : portion en silicium monocristallin, puis couche de séparation en oxyde de silicium, puis portion en le troisième matériau, puis couche de séparation en oxyde de silicium.

[0023] Avantageusement, la séquence s'étend sur une distance le long du brin élastiquement flexible, cette distance étant modifiée au moins une fois le long du brin élastiquement flexible.

[0024] Avantageusement, la couche de séparation en oxyde de silicium s'étend selon une surface qui est cannelée sur au moins une partie de la longueur du brin élastiquement flexible.

[0025] Avantageusement, la couche de séparation en oxyde de silicium s'étend selon une ligne directrice et parallèlement à une génératrice qui coupe un plan dans lequel s'étend le brin élastiquement flexible.

[0026] L'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'un ressort spiral thermocompensé tel que défini précédemment, comprenant des étapes dans lesquelles :

a) on creuse au moins un trou dans une plaquette faite de silicium monocristallin,

b) on crée la couche de séparation en oxyde de silicium au moins au niveau de la paroi du trou,

c) on remplit le trou avec le troisième matériau,

d) dans la plaquette telle qu'elle a été modifiée par les étapes a) à c), on découpe le ressort spiral.

[0027] Le procédé de fabrication défini ci-dessus peut incorporer une ou plusieurs autres caractéristiques avantageuses, isolément ou en combinaison, en particulier parmi celles précisées ci-après.

[0028] Avantageusement, le troisième matériau est du silicium polycristallin dans l'étape c).

[0029] Avantageusement, le procédé de fabrication comporte une étape qui a lieu après l'étape c) et dans laquelle on soumet la plaquette pourvue de la couche de séparation et du troisième matériau ou le ressort spiral à des conditions qui sont identiques à des conditions utilisées pour effectuer une oxydation thermique de silicium.

[0030] Avantageusement, au moins lors des étapes a) à c), la plaquette fait partie d'un wafer dans lequel la plaquette comprend une première face principale unie à un support et une deuxième face principale opposée à la première face principale, le procédé de fabrication comprenant une étape qui a lieu après l'étape c) et dans laquelle on polit la deuxième face principale de la plaquette.

[0031] Avantageusement, on réalise au moins l'une des étapes a) et d) par gravure.

[0032] Avantageusement, on crée la couche de séparation en oxyde de silicium par oxydation thermique, dans l'étape b).

[0033] Avantageusement, au moins lors des étapes a) à c), la plaquette fait partie d'un wafer dans lequel une face principale de la plaquette est unie à un support, le procédé de fabrication comprenant une étape qui a lieu après l'étape c) et dans laquelle le ressort spiral est débarrassé du support.

[0034] Avantageusement, le procédé de fabrication comprend au moins un post-traitement qui a lieu après l'étape d) et qui est choisi parmi un post-traitement augmentant la résistance au choc du ressort spiral, un post-traitement augmentant la conductivité du ressort spiral et un post-traitement changeant une raideur en flexion du brin élastiquement flexible.

Brève description des dessins

[0035] D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de modes particuliers de réalisation de l'invention donnés à titre d'exemples non limitatifs et représentés aux dessins annexés, parmi lesquels :

- la figure 1 est une vue en perspective d'un ressort spiral thermocompensé selon un premier mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 2 est une vue partielle, en perspective, et représente un tronçon de spire du ressort spiral de la figure 1 ;
- la figure 3 est une vue analogue à la figure 2 et représente un tronçon de spire d'un ressort spiral thermocompensé selon un deuxième mode de réalisation de l'invention ;
- les figures 4A à 4F sont des sections droites selon le plan IV de la figure 3 à différents instants au cours de l'exécution d'un procédé de fabrication conforme à l'invention et illustrent chacune un état intermédiaire entre deux étapes successives de ce procédé, lors de la fabrication du ressort spiral partiellement représenté à la figure 3 ;
- les figures 5 et 6 sont des vues en plan et représentent chacune l'un de deux tronçons de spire d'un ressort spiral thermocompensé selon un troisième mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 7 est une vue en plan d'un tronçon de spire d'un ressort spiral thermocompensé selon un quatrième mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 8 est une vue en plan d'un tronçon de spire du ressort spiral de la figure 3 ;
- la figure 9 est une vue en plan d'un tronçon de spire d'un ressort spiral thermocompensé selon un cinquième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 10 est une vue en plan d'un tronçon de spire d'un ressort spiral thermocompensé selon un sixième mode de réalisation de l'invention

5 - la figure 11 est une vue en plan d'un tronçon de spire d'un ressort spiral thermocompensé et représente une variante du sixième mode de réalisation de l'invention, c'est-à-dire une variante du mode de réalisation de la figure 10 ;

10 - la figure 12 est une vue en plan d'un tronçon de spire d'un ressort spiral thermocompensé selon un septième mode de réalisation de l'invention ;

15 - la figure 13 est une vue en plan d'un tronçon de spire d'un ressort spiral thermocompensé et représente une variante du deuxième mode de réalisation de l'invention, c'est-à-dire une variante du mode de réalisation des figures 3 et 8.

[0036] Sur ces figures 1 à 3, 4A à 4F et 5 à 13, les proportions ne sont pas toujours respectées, dans un souci de clarté.

25 Description de modes préférentiels de l'invention

[0037] La figure 1 représente un ressort spiral thermocompensé pouvant faire partie d'un mouvement d'horlogerie d'une montre mécanique. Ce ressort spiral est selon un premier mode de réalisation de l'invention. Il comporte un moyeu de montage 1 prévu pour être enfilé et fixé sur un arbre de support d'un balancier. Le ressort spiral de la figure 1 comporte en outre un brin élastiquement flexible 2, qui s'étend selon une ligne en spirale ℓ (voir figure 2), dans un plan P, autour du moyeu de montage 1, et qui présente la forme d'une lame dans l'exemple représenté. L'une des deux extrémités du brin élastiquement flexible 2 est solidaire du moyeu de montage 1. L'autre extrémité du brin élastiquement flexible 2 est une extrémité libre, destinée à être fixée à un pont généralement appelé coq.

[0038] La figure 2 représente un tronçon du brin élastiquement flexible 2 qui, sur tout ou partie de sa longueur, est constitué d'une succession de tranches en matériaux différents. Plus précisément, ces tranches sont soit des portions 3 en silicium monocristallin A, soit des couches de séparation 4 en oxyde de silicium B, soit des portions 5 en silicium polycristallin C. L'oxyde de silicium B constituant les couches de séparation 4 est plus précisément de l'oxyde de silicium amorphe (SiO_2). A moins d'être à une extrémité du brin élastiquement flexible 2, chaque portion 5 en silicium polycristallin C se trouve entre deux couches de séparation 4, dont chacune la sépare d'une portion 3 en silicium monocristallin A.

55 **[0039]** Le coefficient thermique du module de Young du silicium monocristallin A et celui du silicium polycristallin C sont l'un et l'autre un négatif, tandis que le coefficient thermique du module de Young de l'oxyde de si-

licium est quant à lui positif. De ce fait, la présence de l'oxyde de silicium au sein du silicium produit une compensation thermique concernant la raideur en flexion du brin élastiquement flexible. Cette compensation thermique peut être ajustée de manière que la raideur en flexion du brin élastiquement flexible soit très peu dépendante, voire indépendante, des variations de température.

[0040] Dans le brin élastiquement flexible 2, on peut identifier une séquence S qui se répète en se succédant à elle-même le long de ce brin élastiquement flexible 2. Cette séquence S est une succession selon un ordre qui, le long du brin élastiquement flexible 2, est : portion 3 en silicium monocristallin, puis couche de séparation 4 en oxyde de silicium, puis portion 5 en silicium polycristallin, puis couche de séparation 4 en oxyde de silicium.

[0041] Bien qu'il puisse en être autrement ainsi qu'on le verra plus loin, le pas entre les couches de séparation 4, c'est-à-dire l'espacement de deux couches de séparation 4 consécutives est le même sur toute la longueur du brin élastiquement flexible 2.

[0042] L'aire de la section droite E du brin élastiquement flexible 2 intervient sur la raideur en flexion de ce brin élastiquement flexible 2, mais pas sur la thermocompensation. On peut donc modifier localement l'aire de la section droite E du brin élastiquement flexible 2 afin de modifier localement la raideur en flexion de ce brin élastiquement flexible 2 sans que cela n'influe sur la thermocompensation locale s'appliquant sur cette raideur en flexion, ce qui est avantageux.

[0043] La figure 3 représente un tronçon d'un brin élastiquement flexible 102, faisant partie d'un ressort spiral thermocompensé qui est selon un deuxième mode de réalisation de l'invention et qui peut posséder la forme générale du ressort spiral représenté à la figure 1. Ce brin élastiquement flexible 102 comporte une portion 3 en silicium monocristallin A et une portion 5 en silicium polycristallin C, entre lesquelles se trouve une couche de séparation 4 en oxyde de silicium B.

[0044] La couche de séparation 4 s'étend sur sensiblement toute la longueur du brin élastiquement flexible 2, mais pourrait également s'étendre sur seulement une partie de cette longueur. Elle s'étend selon une surface cannelée et sa section longitudinale est constituée d'une succession de créneaux. En cela, la couche de séparation 4 forme un motif périodique qui se répète le long du brin élastiquement flexible 102. Ce motif peut se répéter en restant identique à lui-même partout où la couche de séparation 4 est présente dans le brin élastiquement flexible 102. Le motif que forme la couche de séparation 4 peut également être modifié une ou plusieurs fois le long du brin élastiquement flexible 102, de manière à modifier une ou plusieurs fois la raideur en flexion du brin élastiquement flexible 102 le long de celui-ci. En particulier, ce motif peut être dilaté longitudinalement au niveau d'un tronçon du brin élastiquement flexible 102, par rapport à un autre tronçon de ce brin élastiquement flexible.

[0045] La couche de séparation 4 visible à la figure 3 comporte plusieurs segments 7 non parallèles à la ligne

en spirale ℓ selon laquelle s'étend le brin élastiquement flexible 102. Le nombre de segments 7 par millimètre de brin élastiquement flexible peut être modifié une ou plusieurs fois le long du brin élastiquement flexible 102 de manière à modifier une ou plusieurs fois la raideur en flexion de ce brin élastiquement flexible 102 le long de celui-ci.

[0046] La section droite E du brin élastiquement flexible 102 également intervient sur la raideur en flexion de ce brin élastiquement flexible 102, ainsi que sur la thermocompensation s'appliquant sur cette raideur en flexion. On peut donc jouer à la fois sur la section droite E du brin élastiquement flexible 102 et sur le nombre de segments 7 par millimètre de brin élastiquement flexible afin de modifier localement la raideur en flexion du brin élastiquement flexible 102 en ne modifiant pas ou que faiblement la thermocompensation locale s'appliquant sur cette raideur, ce qui est avantageux.

[0047] Il est également possible de prévoir que, localement, la couche de séparation 4 en oxyde de silicium B modifie la raideur en flexion du brin élastiquement flexible 102 et la thermocompensation s'appliquant sur cette raideur et que, sans l'être localement, le brin élastiquement flexible 102 soit thermocompensé globalement au niveau voulu, compte tenu du cumul des thermocompensations locales.

[0048] Toujours sur la figure 3, la couche de séparation 4 en oxyde de silicium B du brin élastiquement flexible 102 s'étend selon une ligne directrice d et parallèlement à une génératrice g, coupant le plan P dans lequel s'étend le brin élastiquement flexible 102. Les expressions « ligne directrice » et « génératrice » ont ici le sens qu'on leur donne en mathématiques, notamment pour décrire des surfaces cylindriques. La génératrice g est donc une droite. De préférence, elle est perpendiculaire ou sensiblement perpendiculaire au plan P.

[0049] Ce qu'expose le paragraphe précédent au sujet de la couche de séparation 4 du brin élastiquement flexible 102 vaut également pour la ou chaque couche de séparation 4 en oxyde de silicium B des autres modes de réalisation de l'invention proposés dans la présente description. En particulier, chaque couche de séparation 4 en oxyde de silicium B du brin élastiquement flexible 2 s'étend elle aussi selon une ligne directrice et parallèlement à une génératrice coupant le plan P.

[0050] Chacun des ressorts spiraux selon les modes de réalisation de l'invention proposés dans la présente description peuvent être réalisés en mettant en oeuvre un procédé de fabrication conforme à l'invention. Un mode de réalisation de ce procédé de fabrication va maintenant être décrit dans le cas où il est mis en oeuvre pour fabriquer le ressort spiral dont le brin élastiquement flexible 102 est partiellement représenté à la figure 3.

[0051] Le ressort spiral dont le brin élastiquement flexible 102 est partiellement représenté à la figure 3 est fabriqué à partir d'une plaquette 10 faite de silicium monocristallin A. De préférence, cette plaquette 10 fait partie d'un wafer 11 de type silicium-oxyde-silicium, l'acronyme

anglais « SOI » étant aussi communément utilisé pour désigner ce type de wafer.

[0052] Sur la plaquette 10 en silicium monocristallin A, on forme un masque de gravure 12 en déposant une couche de résine photosensible, puis en solubilisant et en retirant ensuite des portions de cette couche en résine photosensible. L'état qui résulte du dépôt du masque de gravure 12 est celui représenté à la figure 4A.

[0053] Pour passer de l'état représenté à la figure 4A à l'état représenté à la figure 4B, on grave la plaquette 10 à l'aide du masque de gravure 12, de manière à former un trou 13 dans cette plaquette 10, sur toute son épaisseur. Pour ce faire, on utilise la gravure ionique réactive profonde, encore appelée gravure DRIE (acronyme de la désignation anglaise « *Deep reactive ion etching* »). Les contours du trou 13 sont ceux de la portion 5 dans la pièce finie, au moins du côté de ce qui est destiné à former la portion 4.

[0054] Pour passer de l'état représenté à la figure 4B à l'état représenté à la figure 4C, on crée la couche de séparation 4 en oxyde de silicium B au niveau de la partie découverte de la surface de la plaquette 10 et, en particulier, au niveau de la paroi du trou 13. La couche de séparation 4 peut notamment être réalisée par oxydation thermique, dans un four où l'oxyde de silicium se forme à partir du silicium. L'oxydation thermique peut être une oxydation humide obtenue en présence de vapeur d'eau dans le four ou bien une oxydation sèche obtenue en présence de dioxygène dans le four. La couche de séparation 4 peut également être déposée, par exemple au moyen d'un dépôt physique en phase vapeur.

[0055] Pour passer de l'état représenté à la figure 4C à l'état représenté à la figure 4D, on remplit le trou 13 avec du silicium polycristallin C. De préférence, cela est réalisé au moyen d'un dépôt directionnel, qui peut être un dépôt physique en phase vapeur encore appelé dépôt PVD (acronyme de la désignation anglaise « *Physical Vapor Deposition* ») ou bien un dépôt chimique en phase vapeur encore appelé dépôt CVD (acronyme de la désignation anglaise « *Chemical Vapor Deposition* »). Ensuite, on procède à un traitement qui, d'après les résultats actuels, renforce la liaison mécanique entre l'oxyde de silicium B de la couche de séparation 4 et le silicium polycristallin C de la portion 5. Ce traitement consiste à soumettre l'ensemble, c'est-à-dire la plaquette 10 avec l'oxyde de silicium B et avec le silicium polycristallin C dans le trou 13, à des conditions qui pourraient être utilisées pour produire une oxydation thermique de silicium. Ces conditions peuvent être identiques à des conditions utilisées pour effectuer une oxydation thermique humide ou bien elles peuvent être identiques à des conditions utilisées pour effectuer une oxydation thermique sèche.

[0056] Pour passer de l'état représenté à la figure 4D à l'état représenté à la figure 4E, on réalise deux opérations, qui sont un polissage de la face apparente de la plaquette 10 et un détournement du ressort spiral. Le polissage peut être une planarisation mécano-chimique encore appelée procédé CMP (acronyme de la désignation

anglaise « *Chemical Mechanical Planarization* »). Ce polissage retire l'excès de silicium polycristallin C, ainsi que l'oxyde de silicium B au niveau de l'une des faces principales de la plaquette 10. Le détournement consiste à découper le ressort spiral et il est réalisé au moyen d'un masque de gravure non représenté et d'une gravure DRIE. De préférence, le ressort spiral est totalement détourné sauf au niveau d'une attache éventuelle qui l'unit à ce qui reste de la plaquette 10. Cette attache sera brisée à la toute fin du procédé de fabrication. Lors du détournement, la partie résiduaire 4' de la couche d'oxyde de silicium B est de préférence retirée au moyen d'une gravure chimique humide. Tel est notamment le cas lorsque, au lieu d'être du silicium polycristallin C, le matériau de remplissage du trou 13 est un matériau ne pouvant pas être gravé au moyen d'une gravure DRIE. Lorsque le matériau de remplissage du trou 13 est du silicium polycristallin C, le détournement du ressort spiral peut se faire selon un contour passant dans ce silicium polycristallin C, par gravure DRIE et sans gravure chimique humide.

[0057] Pour passer de l'état représenté à la figure 4E à l'état représenté à la figure 4F, on libère le ressort spiral. Cela consiste à retirer localement ou à supprimer totalement, par exemple par gravure, la partie 15 du wafer 11, c'est-à-dire la partie qui forme un support pour la plaquette 10.

[0058] Un ou plusieurs post-traitements peuvent être ensuite appliqués. Ce ou ces post-traitements peuvent notamment être choisis parmi :

- un dépôt ou un traitement visant à augmenter la résistance au choc du ressort spiral ;
- un dépôt ou un traitement visant à augmenter la conductivité électrique du ressort spiral ;
- un dépôt ou un retrait de matière visant à ajuster ou changer la raideur en flexion du brin élastiquement flexible.

[0059] Le ou l'un des post-traitements appliqué au ressort spiral peut être une oxydation thermique produisant une couche superficielle d'oxyde de silicium B. Lorsque tel est le cas, cette couche superficielle d'oxyde de silicium B est de préférence prise en compte dans le calcul de la compensation thermique globale s'appliquant sur la raideur en flexion du brin élastiquement flexible.

[0060] Le procédé exposé ci-dessus peut être appliqué pour réaliser simultanément plusieurs ressorts spiraux à partir d'un seul et même wafer 11. Par ailleurs, il peut comporter une ou plusieurs autres étapes en plus de celles qui ont été explicitées ci-dessus.

[0061] Une très grande précision sur l'épaisseur de la couche de séparation 4 en oxyde de silicium B peut être obtenue lorsque le ressort spiral est réalisé en mettant en oeuvre le procédé de fabrication qui vient d'être décrit en se référant aux figures 4A à 4F. La possibilité d'obtenir une telle précision sur l'épaisseur de la couche de sépa-

ration 4 en oxyde de silicium constitue un avantage d'autant plus notable que cette épaisseur influe directement sur la précision de la compensation thermique obtenue et sur la précision de la raideur en flexion du brin élastiquement flexible.

[0062] On a constaté que, de manière surprenante, la portion 5 en silicium polycristallin est fermement liée à la couche de séparation 4 en oxyde de silicium, ce qui constitue un résultat contraire à un préjugé technique très largement voire unanimement partagé dans le domaine des ressorts spiraux en silicium.

[0063] Les figures 5 et 6 représentent chacune l'un de deux tronçons d'un même brin élastiquement flexible 202 faisant partie d'un ressort spiral selon un troisième mode de réalisation de l'invention.

[0064] Les couches de séparation 4 du brin élastiquement flexible 202 sont non parallèles à la ligne en spirale ℓ selon laquelle s'étend ce brin élastiquement flexible 202. De ce fait, le nombre de couches de séparation 4 par millimètre de brin élastiquement flexible peut être modifié. En jouant sur l'espacement des couches de séparation 4 en oxyde de silicium B, la raideur en flexion du brin élastiquement flexible 202 peut être modifiée une ou plusieurs fois le long de ce brin élastiquement flexible 202. Ainsi qu'on va l'expliquer en détail ci-dessous, le nombre de couches de séparation 4 par millimètre de brin élastiquement flexible est modifié au moins une fois le long du brin élastiquement flexible 202. En cela seulement, le brin élastiquement flexible 202 se distingue du brin élastiquement flexible 2.

[0065] Le tronçon représenté à la figure 5 est décalé du tronçon représenté à la figure 6, le long du brin élastiquement flexible 202. D'une comparaison des figures 5 et 6, il ressort que le nombre de couches de séparation 4 par millimètre de brin élastiquement flexible est modifié entre le tronçon représenté à la figure 5 et celui représenté à la figure 6. De ce fait, la raideur en flexion du brin élastiquement flexible 202 est modifiée entre le tronçon représenté à la figure 5 et le tronçon représenté à la figure 6.

[0066] Pris dans sa totalité, le brin élastiquement flexible 202 est thermocompensé au niveau voulu. Pour obtenir ce résultat, on considère toute la longueur du brin élastiquement flexible 202 et on fait en sorte que les thermocompensations locales insuffisantes et celles en excès se compensent sur cette longueur.

[0067] Le brin élastiquement flexible d'un ressort spiral thermocompensé conforme à l'invention peut être au moins partiellement recouvert d'au moins une couche de revêtement en oxyde de silicium. Tel est le cas du brin élastiquement flexible 302 dont un tronçon est représenté à la figure 7. Plus précisément, ce brin élastiquement flexible 302 se distingue du brin élastiquement flexible 2 en ce qu'il comporte deux couches de revêtement 320 en oxyde de silicium B, dont chacune est présente au niveau de l'une des faces latérales de ce brin élastiquement flexible 302.

[0068] Un avantage de l'invention est qu'un ressort spi-

ral conforme à l'invention peut être thermocompensé au niveau voulu sans être recouvert d'une couche en oxyde de silicium mate, foncée et de ce fait inesthétique, ou que ce ressort spiral peut être thermocompensé au niveau voulu et être recouvert d'une couche en oxyde de silicium suffisamment fine pour ne pratiquement pas affecter l'esthétique du ressort spiral. A cet égard, les deux couches de revêtement 320 en oxyde de silicium B peuvent être ou ne pas être suffisamment fines pour ne pratiquement pas affecter l'esthétique du ressort spiral.

[0069] Afin de faciliter une comparaison entre les différents modes de réalisation de l'invention proposés ici, la figure 8 représente un tronçon du brin élastiquement flexible 102 décrit précédemment.

[0070] Chacune des figures 9 à 12 représente un tronçon d'un brin élastiquement flexible 402, 502 ou 602 faisant partie d'un ressort spiral thermocompensé conforme à l'invention. Dans les brins élastiquement flexibles 402, 502 et 602, la couche de séparation 4 en oxyde de silicium B s'étend selon une surface cannelée, forme un motif périodique et comporte des segments 7 dont la densité linéique peut être modifiée une ou plusieurs fois le long du brin élastiquement flexible.

[0071] Le brin élastiquement flexible 402 partiellement représenté à la figure 9 se distingue du brin élastiquement flexible 102 en ce que sa couche de séparation 4 s'étend selon une ligne directrice qui est sinueuse, avec des coudes courbes entre les segments 7.

[0072] Le brin élastiquement flexible 502 partiellement représenté à la figure 10 se distingue du brin élastiquement flexible 102 en ce que sa couche de séparation 4 s'étend selon une ligne directrice en dent de scie.

[0073] Une possibilité mentionnée précédemment dans le cas du brin élastiquement flexible 102 est illustrée à la figure 11, et ce dans le cas du brin élastiquement flexible 502. Selon cette possibilité, le brin élastiquement flexible a une section droite qui est modifiée au moins une fois. Sur la figure 11, c'est plus précisément l'aire de cette section droite qui est modifiée du fait d'un élargissement du brin élastiquement flexible 502.

[0074] Le brin élastiquement flexible 602 partiellement représenté à la figure 11 se distingue du brin élastiquement flexible 102 en ce que les créneaux successifs que forme sa couche de séparation 4 ont chacun la forme d'un contour de queue d'aronde, ce qui a pour avantage de renforcer l'assujettissement de la portion 3, de la couche 4 et de la portion 5 les unes aux autres, par la présence de zones en contre-dépouille, et d'accroître ainsi la robustesse du brin élastiquement flexible 602.

[0075] Une possibilité mentionnée précédemment est illustrée à la figure 13, et ce dans le cas du brin élastiquement flexible 102. Selon cette possibilité, le motif périodique de la couche de séparation 4 est dilaté longitudinalement au niveau d'un tronçon du brin élastiquement flexible 102, par rapport à un autre tronçon de ce brin élastiquement flexible. En d'autres termes, la période du motif périodique et donc le nombre de segments 7 par millimètre de brin élastiquement flexible sont modifiés au

moins une fois le long du brin élastiquement flexible 102, ce qui est le cas à la figure 13. Il en résulte que, le long du brin élastiquement flexible 102, la raideur en flexion de celui-ci est modifiée au moins une fois.

[0076] L'invention ne se limite pas aux modes de réalisation décrits dans ce qui précède. En particulier, la couche de séparation ou les couches de séparation 4 peuvent présenter d'autres formes que celles qui ont été proposées précédemment.

[0077] En outre, les modes de réalisation proposés précédemment peuvent être combinés au sein d'un même ressort spiral conforme à l'invention. Par exemple, une couche de séparation 4 en oxyde de silicium B peut, sur une partie de sa longueur, former un certain motif périodique, par exemple en étant comme représenté à la figure 8, et, sur une autre partie de sa longueur, former un autre motif périodique, par exemple en étant comme représenté sur l'une des figures 9, 10 et 12.

[0078] De plus, le matériau dont est faite la ou chaque portion 5 peut ne pas être du silicium polycristallin. La ou chaque portion 5 peut être réalisée en tout matériau approprié, notamment en tout matériau approprié déposable en couche épaisse, notamment par PVD ou par CVD. Par exemple, la ou chaque portion 5 peut être réalisée en SiC, Al, Al₂O₃, Ti, TiO₂, Ti₂O₃, Au, W, WO₂, WO₃, silumin (alliage Aluminium-Silicium, par exemple à 1% ou 2% ou 4% de silicium), Si₃N₄, AlN, BeO, ZrO₂, NB, MgO.

Revendications

1. Ressort spiral thermocompensé pour oscillateur mécanique de pièce d'horlogerie, comprenant un brin élastiquement flexible (2 ; 102 ; 202 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602) s'étendant selon une ligne en spirale (ℓ), ce brin élastiquement flexible (2 ; 102 ; 202 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602) comprenant :

- au moins une portion (3) en un premier matériau, à savoir en silicium monocristallin (A), et
- au moins une couche de séparation (4) en un deuxième matériau, à savoir en oxyde de silicium (B),

la portion (4) en silicium monocristallin (A) étant mécaniquement liée à la couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B),

caractérisé en ce qu'il comporte au moins une portion (5) en un troisième matériau (C) différent du silicium monocristallin (A) et de l'oxyde de silicium (B), et **en ce que** la couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B) sépare la portion (3) en silicium monocristallin (A) de la portion (5) en le troisième matériau (C), cette portion en le troisième matériau (C) étant mécaniquement liée à la couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B).

2. Ressort spiral selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le troisième matériau est du silicium polycristallin (C).

3. Ressort spiral selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B) ou plusieurs couches de séparation (4) en oxyde de silicium (B) chacune séparant une portion (3) en silicium monocristallin (A) et une portion (5) en le troisième matériau (C) l'une de l'autre en étant mécaniquement liée à ces portions (3, 5) comportent plusieurs segments (4 ; 7) non parallèles à la ligne en spirale (ℓ), ces segments (4 ; 7) étant décalés entre eux le long du brin élastiquement flexible (2 ; 102 ; 202 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602).

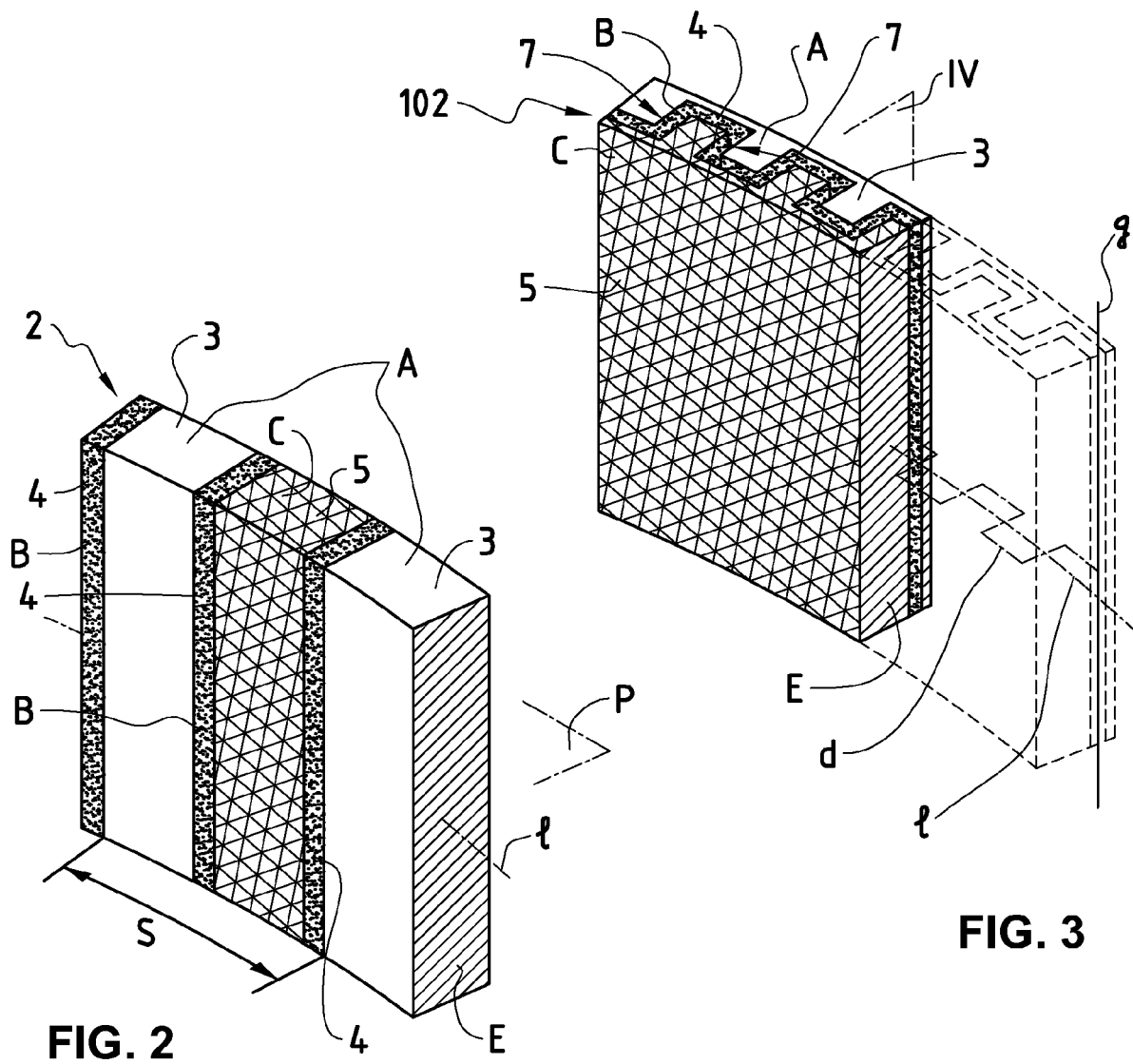
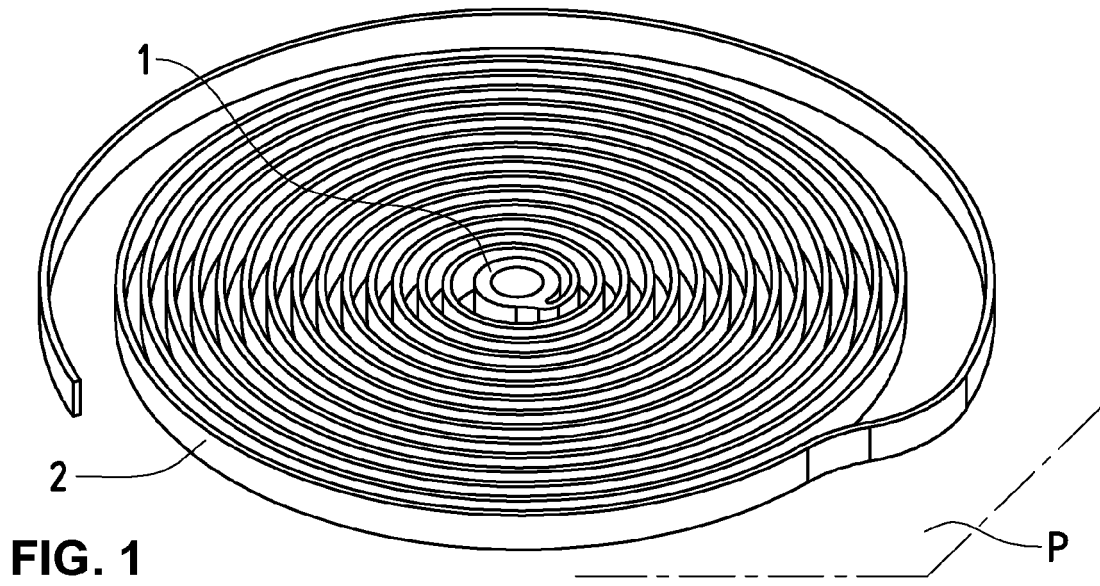
4. Ressort spiral selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** le nombre desdits segments (4 ; 7) par millimètre de brin élastiquement flexible est modifié au moins une fois le long du brin élastiquement flexible (2 ; 102 ; 202 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602).

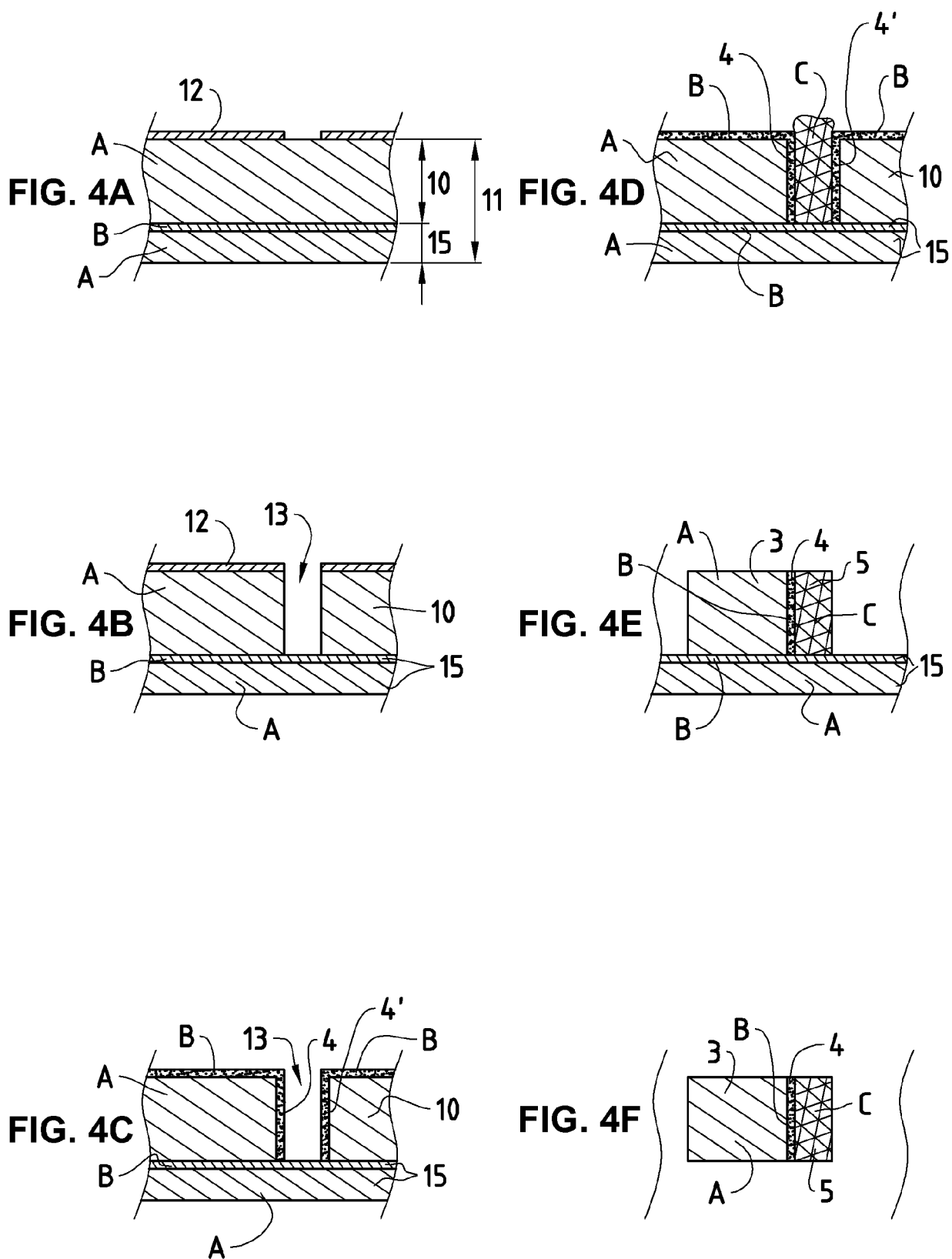
5. Ressort spiral selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le brin élastiquement flexible (2 ; 102 ; 202 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602) possède une raideur en flexion que la couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B) ou plusieurs couches de séparation (4) en oxyde de silicium (B) chacune séparant une portion (3) en silicium monocristallin (A) et une portion (5) en le troisième matériau (C) l'une de l'autre en étant mécaniquement liée à ces portions (3, 5) modifient au moins une fois le long du brin élastiquement flexible (2 ; 102 ; 202 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602).

6. Ressort spiral selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le brin élastiquement flexible (2 ; 102 ; 202 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602) possède une raideur en flexion et une section droite (E) qui est modifiée au moins une fois le long du brin élastiquement flexible (2 ; 102 ; 202 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602) de manière à modifier au moins une fois la raideur en flexion le long du brin élastiquement flexible (2 ; 102 ; 202 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602).

7. Ressort spiral selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le brin élastiquement flexible (2 ; 202) comporte une répétition d'une séquence (S) qui se succède à elle-même le long du brin élastiquement flexible (2 ; 202), cette séquence (S) étant une succession selon un ordre qui, le long du brin élastiquement flexible (2 ; 202), est : portion (3) en silicium monocristallin (A), puis couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B), puis portion (5) en le troisième matériau (C), puis couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B).

8. Ressort spiral selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** la séquence (S) s'étend sur une distance le long du brin élastiquement flexible (2 ; 202), cette distance étant modifiée au moins une fois le long du brin élastiquement flexible (2 ; 202). 5
9. Ressort spiral selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B) s'étend selon une surface qui est cannelée sur au moins une partie de la longueur du brin élastiquement flexible (102 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602). 10
10. Ressort spiral selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B) s'étend selon une ligne directrice (d) et parallèlement à une génératrice (g) qui coupe un plan (P) dans lequel s'étend le brin élastiquement flexible (2 ; 102 ; 202 ; 302 ; 402 ; 502 ; 602). 15
11. Procédé de fabrication d'un ressort spiral thermo-compensé selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant des étapes dans lesquelles : 25
- a) on creuse au moins un trou (13) dans une plaquette (10) faite de silicium monocristallin (A),
 - b) on crée la couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B) au moins au niveau de la paroi du trou (13), 30
 - c) on remplit le trou (13) avec le troisième matériau (C),
 - d) dans la plaquette (10) telle qu'elle a été modifiée par les étapes a) à c), on découpe le ressort spiral. 35
12. Procédé de fabrication selon la revendication 11, comportant une étape qui a lieu après l'étape c) et dans laquelle on soumet la plaquette (10) pourvue de la couche de séparation (4) et du troisième matériau (C) ou le ressort spiral à des conditions qui sont identiques à des conditions utilisées pour effectuer une oxydation thermique de silicium. 40 45
13. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 11 et 12, dans lequel, au moins lors des étapes a) à c), la plaquette (10) fait partie d'un wafer (11) dans lequel la plaquette (10) comprend une première face principale unie à un support (15) et une deuxième face principale opposée à la première face principale, le procédé de fabrication comprenant une étape qui a lieu après l'étape c) et dans laquelle on polit la deuxième face principale de la plaquette (10). 50 55
14. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 11 à 13, dans lequel on réalise au moins l'une des étapes a) et d) par gravure.
15. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 11 à 14, dans l'étape b) duquel on crée la couche de séparation (4) en oxyde de silicium (B) par oxydation thermique.
16. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 11 à 15, dans lequel, au moins lors des étapes a) à c), la plaquette (10) fait partie d'un wafer (11) dans lequel une face principale de la plaquette (10) est unie à un support (15), le procédé de fabrication comprenant une étape qui a lieu après l'étape c) et dans laquelle le ressort spiral est débarassé du support (15).
17. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 11 à 16, comprenant au moins un post-traitement qui a lieu après l'étape d) et qui est choisi parmi un post-traitement augmentant la résistance au choc du ressort spiral, un post-traitement augmentant la conductivité du ressort spiral et un post-traitement changeant une raideur en flexion du brin élastiquement flexible.





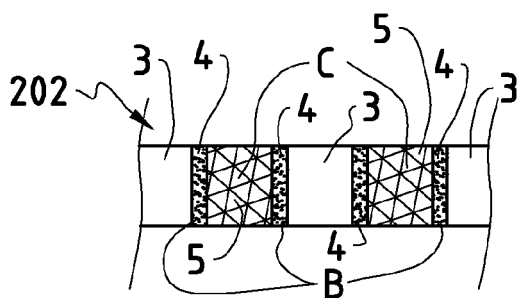


FIG. 5

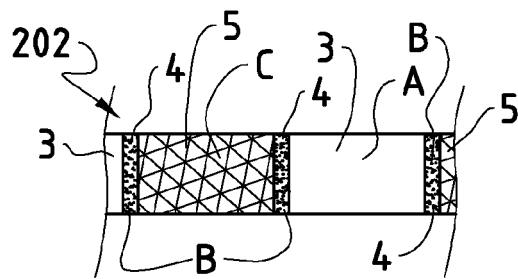


FIG. 6

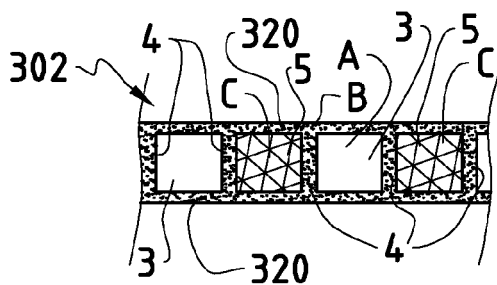


FIG. 7

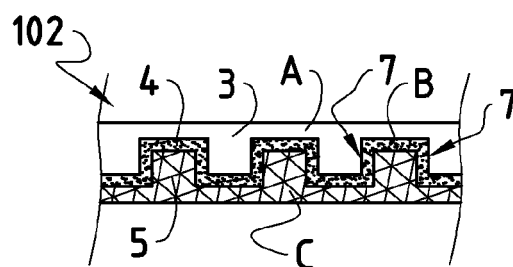


FIG. 8

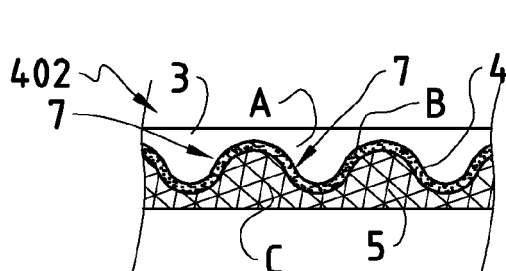


FIG. 9

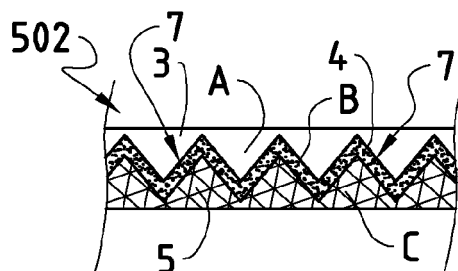


FIG. 10

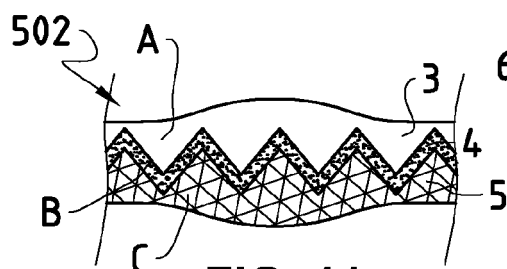


FIG. 11

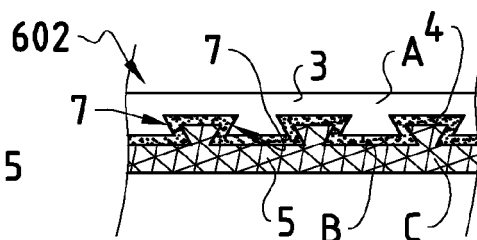


FIG. 12

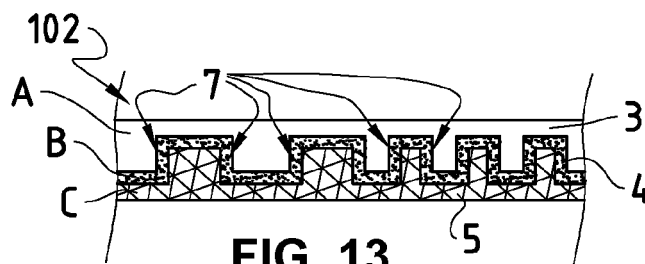


FIG. 13



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 16 16 1007

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)
Y,D	EP 1 422 436 A1 (CSEMCT SUISSE D ELECTRONIQUE E [CH]) 26 mai 2004 (2004-05-26) * alinéas [0010], [0011]; revendications 1,5; figures 1, 1a, 1b *	1-17	INV. G04B17/06 F16F1/02 F16F1/04 F16F1/10 G04B17/22 B81C1/00
Y	JP 2015 179059 A (CITIZEN HOLDINGS CO LTD) 8 octobre 2015 (2015-10-08) * abrégé; figures 1-10 *	1-17	
X	EP 2 543 625 A1 (SUISSE ELECTRONIQUE MICROTECH [CH]) 9 janvier 2013 (2013-01-09) * alinéa [0040]; figures 1a. 1b, 1c *	1,11-17	
X	EP 2 502 877 A1 (PATEK PHILIPPE SA GENEVE [CH]) 26 septembre 2012 (2012-09-26) * alinéas [0021], [0032]; figure 3 *	1,11-17	
A	EP 2 075 222 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 1 juillet 2009 (2009-07-01) * alinéas [0030] - [0037]; figures 1,2 *	1-17	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
A	WO 2015/011637 A2 (DAMASKO GMBH [DE]) 29 janvier 2015 (2015-01-29) * revendication 1; figures 1-3 *	1,2	G04B F16F B81C
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Berlin		Date d'achèvement de la recherche 8 septembre 2016	Examineur Matos Gonçalves, M
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 16 16 1007

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.

08-09-2016

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 1422436 A1	26-05-2004	AT 307990 T	15-11-2005
		AU 2003271504 A1	18-06-2004
		CN 1717552 A	04-01-2006
		DE 60206939 D1	01-12-2005
		DE 60206939 T2	27-07-2006
		EP 1422436 A1	26-05-2004
		HK 1067687 A1	19-05-2006
		JP 4515913 B2	04-08-2010
		JP 2006507454 A	02-03-2006
		US 2005281137 A1	22-12-2005
		WO 2004048800 A1	10-06-2004
JP 2015179059 A	08-10-2015	AUCUN	
EP 2543625 A1	09-01-2013	CH 705228 A1	15-01-2013
		EP 2543625 A1	09-01-2013
EP 2502877 A1	26-09-2012	AUCUN	
EP 2075222 A1	01-07-2009	AT 473199 T	15-07-2010
		EP 2075222 A1	01-07-2009
		FR 2925890 A1	03-07-2009
		JP 2009160728 A	23-07-2009
		US 2009170231 A1	02-07-2009
WO 2015011637 A2	29-01-2015	DE 102013114211 B3	09-10-2014
		EP 3025201 A2	01-06-2016
		WO 2015011637 A2	29-01-2015

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 1422436 A [0006]
- WO 2009068091 A [0006]
- EP 2284629 A [0006]
- CH 699780 [0007] [0008]