



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
19.07.2023 Bulletin 2023/29

(21) Numéro de dépôt: **23151601.4**

(22) Date de dépôt: **13.01.2023**

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
G04B 1/14 (2006.01) **G04B 15/14** (2006.01)
G04B 17/06 (2006.01) **G04B 17/22** (2006.01)
G04D 3/00 (2006.01)

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
G04B 17/066; G04B 1/145; G04B 15/14;
G04B 17/227; G04D 3/00

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

(30) Priorité: **14.01.2022 EP 22151563**

(71) Demandeurs:
• **Richemont International S.A.**
1752 Villars-sur-Glâne (CH)

• **Sigatec SA**
1950 Sion (CH)

(72) Inventeurs:
• **MONTINARO, Enrica**
3012 Bern (CH)
• **TILLE, Nicolas**
1965 Savièse (CH)

(74) Mandataire: **Novagraaf International SA**
Chemin de l'Echo 3
1213 Onex, Geneva (CH)

(54) **PROCEDE DE LIMITATION DE LA DEFORMATION D'UNE PIECE D'HORLOGERIE EN SILICIUM**

(57) L'invention concerne un procédé de limitation de la déformation d'une pièce d'horlogerie en silicium ménagée dans une plaquette, au cours d'une oxydation thermique, caractérisé par le fait que l'oxydation thermique est effectuée sur une pièce d'horlogerie en silicium fortement dopé. L'invention concerne également une uti-

lisation d'un wafer comprenant au moins une couche de silicium fortement dopé, pour limiter la déformation d'une pièce d'horlogerie ménagée dans ladite couche de silicium fortement dopé, au cours d'une oxydation thermique.

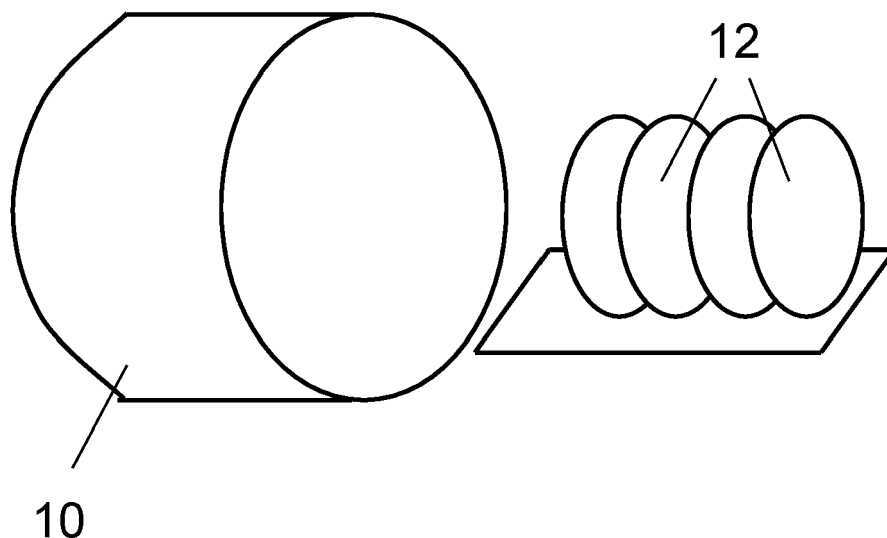


Fig. 1

Description**Domaine technique**

5 **[0001]** La présente invention se rapporte au domaine de la fabrication de pièces pour l'horlogerie. L'invention concerne plus particulièrement un procédé de limitation de la déformation d'une pièce d'horlogerie en silicium, notamment un spiral en silicium.

Etat de la technique

10 **[0002]** Les mouvements de montres mécaniques sont régulés au moyen d'un régulateur mécanique comprenant un résonateur, c'est-à-dire un composant déformable élastiquement et dont les oscillations déterminent la marche de la montre. De nombreuses montres comportent par exemple un régulateur comprenant un spiral comme résonateur, monté sur l'axe d'un balancier et mis en oscillation grâce à un échappement. La fréquence propre du couple balancier-spiral permet de réguler la montre et dépend notamment de la raideur du spiral.

15 **[0003]** En effet, la fréquence f de l'organe régulateur formé par le spiral de raideur R accouplé à un balancier d'inertie I est donnée par la formule :

20 [équation 1]

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

25 **[0004]** La raideur du spiral définit également ses caractéristiques vibratoires intrinsèques, comme la fréquence propre et les fréquences de résonance. Dans la présente demande, la fréquence propre d'un système élastique (un résonateur seul ou un couple résonateur - balancier) est la fréquence à laquelle oscille ce système lorsqu'il est en évolution libre, c'est-à-dire sans force excitatrice. Par ailleurs, une fréquence de résonance d'un système élastique soumis à une force excitatrice est une fréquence à laquelle on peut mesurer un maximum local d'amplitude de déplacement pour un point donné du système élastique. En d'autres termes, si le système élastique est excité avec une source d'excitation de fréquence variable au cours du temps, l'amplitude de déplacement suit une pente ascendante avant cette fréquence de résonance, et suit une pente descendante après, en tout point qui ne correspond pas à un noeud de vibration. Typiquement, lors d'un tel essai, l'enregistrement de l'amplitude de déplacement en fonction de la fréquence d'excitation présente un pic d'amplitude de déplacement ou pic de résonance qui est associé ou qui caractérise la fréquence de résonance.

35 **[0005]** La raideur d'un résonateur de type spiral dépend typiquement des caractéristiques du matériau dans lequel il est réalisé, ainsi que de ses dimensions et en particulier de l'épaisseur (c'est-à-dire de la largeur) de ses spires le long de son barreau. La raideur est donnée plus spécifiquement par :

40 [équation 2]

$$R = \frac{M}{\varphi}$$

45 avec :

φ , l'angle de torsion du ressort, et

50 M , le couple de rappel du ressort spiral,

où M , pour un barreau de section constante constitué d'un matériau spécifique, est donné par :

55

[équation 3]

$$M = \frac{E \left(\frac{e^3 h}{12} \varphi \right)}{L}$$

avec :

E, le module d'Young du matériau employé pour le barreau,*L*, la longueur du barreau,*h*, la hauteur du barreau, et*e*, l'épaisseur ou la largeur du barreau.

[0006] La fréquence propre de l'organe régulateur formé par le spiral de raideur *R* accouplé à un balancier d'inertie *I* est notamment proportionnelle à la racine carrée de la raideur du spiral. La spécification principale d'un ressort spiral est sa raideur, qui doit se trouver dans un intervalle bien défini pour pouvoir être appairé avec un balancier, qui forme l'élément inertiel de l'oscillateur. Cette opération d'appairage est indispensable pour régler précisément la fréquence d'un oscillateur mécanique.

[0007] Il est très important que les caractéristiques de l'oscillateur soient aussi stables que possible, afin d'avoir une marche de la montre qui soit également stable. L'importance des champs magnétiques dans l'environnement moderne, a poussé les horlogers à utiliser depuis quelques années, des spiraux en silicium, moins sensible aux perturbations magnétiques que des spiraux métalliques.

[0008] Très avantageusement, on peut fabriquer plusieurs centaines de spiraux en silicium sur une seule plaquette (en anglais « wafer ») en utilisant les technologies de micro-fabrication. Il est notamment connu de réaliser une pluralité de spiraux en silicium avec une très haute précision en utilisant des procédés de photolithographie et d'usinage / gravure dans une plaquette en silicium. Les procédés de réalisation de ces spiraux mécaniques utilisent généralement des plaquettes de silicium monocristallin, mais des plaquettes en d'autres matériaux sont également utilisables, par exemple en silicium polycristallin ou amorphe, en d'autres matériaux semi-conducteurs, en verre, en céramique, en carbone, en nanotubes de carbone ou en un composite comprenant ces matériaux. Pour sa part, le silicium monocristallin appartient à la classe cristalline cubique *m3m* dont le coefficient d'expansion thermique (*alpha*) est isotrope.

[0009] Le silicium présente une valeur du premier coefficient thermoélastique très négative, et par conséquent, la raideur d'un résonateur en silicium, et donc sa fréquence propre, varie fortement selon la température. Afin de compenser au moins partiellement cet inconvénient, les documents EP1422436, EP2215531 et WO2016128694 décrivent un résonateur mécanique de type spiral réalisé à partir d'une âme (ou de deux âmes dans le cas de WO2016128694) en silicium monocristallin et dont les variations en température du module d'Young sont compensées par une couche en oxyde de silicium (*SiO₂*) amorphe entourant l'âme (ou les âmes), ce dernier étant un des rares matériaux présentant un coefficient thermoélastique positif.

[0010] Il est connu d'ajuster les dimensions des spiraux après gravure, notamment pour réduire la dispersion de raideurs que l'on observe entre les spiraux, selon leur positionnement sur la plaquette dans laquelle ils sont réalisés. Cet ajustement se fait par une succession d'oxydation et de désoxydation, qui permet de modifier avec précision la dimension des spiraux, mais également de lisser les flancs de ces spiraux. L'opération d'oxydation est effectuée thermiquement, par une opération de chauffage typiquement effectuée entre 600 et 1300°C.

[0011] On observe que ces opérations induisent des déformations sur les spiraux, particulièrement les spiraux présentant des orientations cristallographiques isotropes, c'est-à-dire particulièrement les spiraux réalisés dans du silicium *<100>* et *<110>*. Une telle déformation peut notamment se traduire par une elongation du spiral et donc un déplacement de son extrémité extérieure. On observe également une déformation sous l'influence du propre poids du spiral, particulièrement lorsque l'oxydation est effectuée dans un four horizontal, dans lequel les plaquettes sont disposées verticalement. Les spires sont alors déformées par la gravité et ne sont plus enroulées régulièrement. Pour prévenir et/ou limiter de telles déformations, il est connu de retourner les plaquettes en cours de fabrication.

[0012] Le document WO2019/180596 propose de disposer les plaquettes horizontalement et sur un support, permettant de limiter les déformations liées au propre poids du spiral et à la chaleur.

[0013] Pour des wafers disposés verticalement, il est jusqu'alors nécessaire de procéder à *N* étapes d'oxydation, et d'effectuer entre chacune d'elles une rotation du wafer dans son support de 360/N°, afin d'obtenir une compensation entre les différentes déformations. Cela impose des manipulations qui ralentissent le flux de production et qui créent autant d'occasions de casse ou de pollution des wafers.

[0014] Les demandereses ont trouvé une autre solution inattendue permettant de résoudre ce problème. La solution identifiée peut être généralisée à d'autres pièces d'horlogerie en silicium pour lesquelles il est primordial de contrôler les dimensions et tolérances de fabrication.

5 Divulguation de l'invention

[0015] De façon plus précise, l'invention concerne un procédé de limitation de la déformation d'une pièce d'horlogerie en silicium ménagée dans une plaquette, au cours d'une oxydation thermique, caractérisé par le fait que l'oxydation thermique est effectuée sur une pièce d'horlogerie en silicium fortement dopé.

[0016] Un autre aspect de l'invention concerne une utilisation d'un wafer comprenant au moins une couche de silicium fortement dopé, pour limiter la déformation d'une pièce d'horlogerie ménagée dans ladite couche de silicium fortement dopé, au cours d'une oxydation thermique.

[0017] Selon ces deux aspects, il est possible de limiter, voire de supprimer les déformations subies par une pièce d'horlogerie en silicium, lorsqu'elle est soumise à une oxydation thermique, entre 600 et 1300°C, sans devoir manipuler les plaquettes. En conséquence, l'utilisation de pièces en silicium fortement dopé permet de conduire les opérations d'oxydation en une seule étape, il n'est plus nécessaire de prévoir d'arrêts pour retourner ou pivoter les plaquettes ou les pièces.

[0018] Un autre aspect peut concerner un procédé d'oxydation thermique d'une pièce d'horlogerie en silicium, comprenant une étape préliminaire consistant à fortement doper la pièce d'horlogerie en silicium, et dans lequel l'étape d'oxydation thermique est exempte de retournement ou de modification de l'orientation par rapport à la gravité de la pièce d'horlogerie en silicium fortement dopé.

[0019] Un autre aspect peut concerner un procédé d'oxydation thermique d'une pièce d'horlogerie en silicium, dans lequel l'étape d'oxydation thermique est exempte de retournement ou de modification de l'orientation par rapport à la gravité de la pièce d'horlogerie en silicium, et dans lequel le procédé comprend une étape préliminaire consistant à fortement doper la pièce d'horlogerie en silicium, de sorte à limiter la déformation de la pièce d'horlogerie lors de l'oxydation thermique.

[0020] Avant l'oxydation thermique, le procédé peut comprendre une étape consistant à graver la pièce d'horlogerie dans une plaquette en silicium, en laissant une portion attachée à un substrat de base et en formant au moins une extrémité libre du substrat. Une telle extrémité libre sera retenue par le reste de la pièce d'horlogerie et notamment par la portion attachée au substrat de base, ce qui pourrait provoquer une déformation de la pièce d'horlogerie au cours de l'oxydation thermique, mais l'utilisation de silicium fortement dopé supprime ou réduit ce risque de déformation, même sans étape de retournement.

35 Brève description des dessins

[0021] D'autres détails de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit, faite en référence au dessin annexé dans lequel :

- la figure 1 est une représentation schématique d'une installation d'oxydation de plaquettes de silicium dans un four à chargement horizontal, les plaquettes étant disposées verticalement,
- la figure 2 représente un spiral non dopé, déformé après une oxydation thermique dans un four, selon la disposition de la figure 1,
- la figure 3 représente un spiral dopé, après une oxydation thermique dans un four, selon la disposition de la figure 1,
- la figure 4 représente des résultats de mesures effectuées sur un lot de spiraux d'une première géométrie, en silicium non dopé et ayant subi une étape d'oxydation en position verticale et sur un lot de spiraux en silicium, de la même première géométrie et fortement dopés, ayant subi la même étape d'oxydation en position verticale,
- la figure 5 représente des résultats de mesures effectuées sur un lot de spiraux d'une deuxième géométrie, en silicium non dopé et ayant subi une étape d'oxydation en position verticale, sur un lot de spiraux en silicium, de la même deuxième géométrie en silicium non dopé, ayant subi la même étape d'oxydation en position verticale et avec un retournement intermédiaire, et sur un lot de spiraux en silicium, de la même deuxième géométrie et fortement dopés, ayant subi l'étape d'oxydation en position verticale, sans retournement intermédiaire.

Mode de réalisation de l'invention

[0022] Le document WO2019/180596 décrit les étapes qui permettent de graver des composants horlogers, particulièrement des spiraux, dans une plaquette (également appelée wafer) de silicium. Ces étapes de lithographie sont bien connues de l'homme du métier et sont intégrées par référence à la présente demande.

[0023] Cette plaquette peut être de différents types, comprenant une simple couche de silicium, ou une couche de

silicium disposée sur une couche d'oxyde de silicium (SOI), ou plusieurs couches de silicium, avec une couche d'oxyde de silicium intercalée entre les couches de silicium. Selon les configurations, le composant est gravé dans la couche de silicium ou dans un groupe de couches de silicium.

[0024] Le silicium peut être de différentes natures, monocristallin, polycristallin ou encore amorphe.

[0025] Parmi les étapes de fabrication, on effectue une voire plusieurs étapes d'oxydation thermique. Ces étapes d'oxydation peuvent avoir différents buts :

- ajustement dimensionnel ou lissage des flancs lorsque l'étape d'oxydation est suivie d'une désoxydation,
- ajustement du coefficient thermique d'élasticité du spiral, grâce au fait que l'oxyde de silicium présente un coefficient thermique d'élasticité de signe opposé à celui du silicium,
- renforcement mécanique du composant.

[0026] Comme illustré à la figure 1, ces étapes d'oxydation sont effectuées dans un four d'oxydation 10, à des températures comprises typiquement entre 600°C et 1300°C et par exemple entre 1000°C et 1100°C, ce qui permet de former une couche d'oxyde de silicium (SiO₂) qui recouvre la plaquette et les composants gravés, en consommant du silicium de la plaquette. Selon l'épaisseur d'oxyde visée et le matériel utilisé, on peut prévoir une durée de traitement comprise entre 30 minutes et 30 heures.

[0027] Dans certains process, les wafers sont chargés dans le four en étant disposé horizontalement. Comme dans le document WO2019/180596, il est proposé de disposer les wafers sur des supports munis d'entretoises, pour empêcher ou du moins limiter la déformation des spiraux sous l'effet de la gravité. Cependant, cette solution ne peut fonctionner pour des wafers 12 disposés verticalement, notamment dans des fours 10 à chargement horizontal, tel que représenté sur la figure 1.

[0028] Les demanderesses ont remarqué avec surprise, que les déformations subies par les composants lors des opérations d'oxydation thermique, sous l'effet de la chaleur et du propre poids des composants, étaient très limitées, voire quasi nulles, en utilisant une plaquette dont la ou les couche(s) de silicium est/sont en silicium dopé. De préférence, le dopage est un dopage élevé au bore ou au phosphore. Par dopage élevé (cette expression étant équivalente à « fortement dopé »), on entend une concentration moyenne de dopant au sein du même wafer plus grande que 1×10^{18} , plus particulièrement plus grande que 1×10^{19} , encore plus particulièrement plus grande que 5×10^{19} atomes par cm³. On peut alternativement définir un dopage élevé comme un dopage correspondant à une résistivité plus petite que 0.01 ohm.cm, ou encore une résistivité comprise entre 0.0045 et 0.0055 ohm.cm, encore plus particulièrement une résistivité de 0.005 ohm.cm. Autrement dit, une pièce en silicium fortement dopé présentera une résistivité plus petite que 0.01 ohm.cm, ou encore une résistivité comprise entre 0.0045 et 0.0055 ohm.cm, encore plus particulièrement une résistivité de 0.005 ohm.cm. On peut prévoir de manière non limitative d'effectuer un dopage de type N, négatif, avec du phosphore ou redphosphore, de l'arsenic, de l'antimoine, ou un dopage de type P, positif, avec du bore.

[0029] De manière avantageuse, les effets du dopage sont particulièrement sensibles avec des spiraux en silicium monocristallin, présentant notamment des orientations cristallines <100> ou <110>. Ce sont en effet les typologies de silicium qui sont particulièrement sujettes à une déformation lors d'une opération d'oxydation thermique.

[0030] Il est connu d'utiliser du silicium dopé, voire fortement dopé, pour réaliser des composants horlogers. Cependant, les effets connus d'un tel dopage concernent les propriétés mécaniques du silicium, telles que sa dureté et son module de Young. Il a également été proposé de doper une portion d'un spiral en silicium pour obtenir une thermo-compensation de la raideur du spiral, en d'autres termes pour limiter les variations du couple élastique du spiral en fonction de la température. Les effets d'un dopage sur la déformation thermique du silicium n'ont jusqu'à présent pas été identifiés ou décrits.

[0031] Pour illustrer ces effets, on a représenté sur la figure 2 un spiral non dopé réalisé dans un wafer <100> ayant subi une oxydation thermique en étant positionné verticalement dans un four d'oxydation. La flèche symbolise l'orientation du champ gravitationnel lors de l'étape d'oxydation. On constate que les spires sont décalées progressivement par rapport à leur position nominale sous l'effet de leur poids. Après l'opération d'oxydation, la déformation induite est définitive et le spiral au repos et à plat reste déformé. Pour quantifier la déformation, un segment a été disposé radialement et parallèlement au champ gravitationnel sur la figure 2. Il arrive au niveau de la 7^{ème} spire sur le spiral non dopé, en partant du centre.

[0032] On a représenté sur la figure 3 un spiral réalisé dans un wafer <100> présentant un dopage élevé, au sens des paragraphes ci-dessus, ayant subi une oxydation thermique en étant positionné verticalement dans un four d'oxydation. Dans sa géométrie, il est très proche de sa forme avant oxydation. On a représenté un segment de même longueur que celui représenté sur la figure 2 et positionné de manière identique. On constate qu'il se termine au niveau de la 5^{ème} spire, soit un décalage de 2 spires entre un spiral en silicium non dopé (figure 2) et un spiral fortement dopé (figure 3).

[0033] On a également mesuré le pas entre l'avant dernière-spire et la dernière spire de spiraux réalisés dans un wafer <100> fortement dopé (échantillon A), et de spiraux réalisés dans un wafer <100> non dopé (échantillon B), les

spiraux ayant subi une oxydation thermique dans un four à chargement horizontal, en étant positionnés verticalement.

[0034] Sur des échantillons de 20 spiraux, le pas moyen depuis le centre et dans la direction de la gravité mesuré pour l'échantillon B s'est réduit de plus de 15%, tandis que le pas moyen depuis le centre et dans la direction de la gravité pour l'échantillon A ne s'est réduit que d'une valeur inférieure à 3%, par rapport aux spiraux avant l'étape d'oxydation thermique. Les autres paramètres (temps d'oxydation, température d'oxydation, position du wafer dans le four, position de l'attache, géométrie du spiral etc..) étant par ailleurs constants, cette amélioration du comportement du spiral à l'oxydation est dû au dopage.

[0035] La figure 4 représente des résultats de mesures effectuées sur un lot A1 de spiraux d'une première géométrie, en silicium non dopé et ayant subi une étape d'oxydation en position verticale et sur un lot B1 de spiraux en silicium, de la même première géométrie et fortement dopés, ayant subi la même étape d'oxydation en position verticale.

[0036] Dans le détail, les pièces du lot A1 ont été réalisées en silicium <100> non dopé, et présentent une conductivité électrique comprise entre 1,2 et 6,7 ohm.cm. Les pièces du lot B1 ont été réalisées en silicium <100> fortement dopé (dans cet exemple non limitatif, il s'agit d'un dopage par du phosphore, dopage N, négatif), et présentent une conductivité électrique comprise entre 0,003 et 0,01 ohm.cm.

[0037] Toutes les pièces du lot A1 et toutes les pièces du lot B1 ont été gravées pour présenter la même géométrie, et ont ensuite été soumises à une même étape d'oxydation thermique en position verticale (dans cet exemple non limitatif, il s'agit d'une exposition à une température comprise entre 1000°C et 1100°C et pendant une durée comprise entre 1h et 30h en fonction de l'épaisseur désirée d'oxyde de silicium). Avant l'étape d'oxydation thermique, toutes les pièces (lot A1 et B1) présentent une géométrie conforme. La figure 4 représente des résultats de mesures du rayon de la courbe terminale des spiraux, effectuées sur les pièces du lot A1 et les pièces du lot B1, après l'étape d'oxydation thermique. La figure 4 représente : les tolérances minimale et maximale respectivement R_m et R_M que doit respecter le rayon de la courbe terminale, le nombre de pièces pour chaque classe de valeurs de rayon, et les courbes de Gauss construites à partir des populations mesurées.

[0038] On peut noter que les pièces du lot A1 présentent une grande dispersion (écart type mesuré de 0.072 mm), avec un peu plus de la moitié des pièces en dehors de la plage de tolérances $[R_m-R_M]$, tandis que les pièces du lot B1 présentent une faible dispersion (écart type de 0.027 mm) et sont toutes dans la plage de tolérances $[R_m-R_M]$. Ces données montrent que l'utilisation de silicium fortement dopé permet de réduire notablement les déformations lors de l'étape d'oxydation thermique, avec dans l'exemple ci-dessus, une réduction par trois de la variabilité de la valeur du rayon de la courbe terminale des spiraux, et des pièces qui restent toutes dans la plage de tolérance après l'oxydation thermique.

[0039] La figure 5 représente des résultats de mesures effectuées :

- sur un lot A de spiraux d'une deuxième géométrie, en silicium non dopé et ayant subi une étape d'oxydation en position verticale sans retournement intermédiaire,
- sur un lot B de spiraux en silicium, de la même deuxième géométrie en silicium non dopé, ayant subi la même étape d'oxydation en position verticale mais avec un retournement intermédiaire, et
- sur un lot C de spiraux en silicium, de la même deuxième géométrie et fortement dopés, ayant subi l'étape d'oxydation en position verticale, sans retournement intermédiaire.

[0040] Dans le détail, les pièces du lot A et du lot B ont été réalisées en silicium <111> non dopé, et présentent une conductivité électrique comprise entre 1,0 et 10,0 ohm.cm. Les pièces du lot C ont quant à elles été réalisées en silicium <111> fortement dopé (dans cet exemple non limitatif, il s'agit d'un dopage par du phosphore, dopage N, négatif), et présentent une conductivité électrique comprise entre 0,001 et 0,005 ohm.cm.

[0041] Les pièces du lot A ont été soumises à une étape d'oxydation thermique conduite en une seule fois (dans cet exemple non limitatif, il s'agit d'une exposition à une température comprise entre 1000°C et 1100°C et pendant une durée comprise entre 1h et 30h en fonction de l'épaisseur désirée d'oxyde de silicium), en position verticale. Les pièces du lot B ont été soumises à une étape d'oxydation thermique en position verticale, avec un retournement intermédiaire par rapport à la gravité. Les pièces du lot C ont été soumises à une étape d'oxydation thermique conduite en une seule fois, en position verticale, comme les pièces du lot A.

[0042] Toutes les pièces des lots A, B et C ont été gravées pour présenter la même géométrie, et ont ensuite été soumises à l'étape d'oxydation thermique comme indiqué ci-dessus (lots A et C en une seule fois en position verticale, lot B en position verticale avec un retournement intermédiaire). La figure 5 représente des résultats de mesures du rayon de la courbe terminale des spiraux, effectuées sur les pièces des lots A, B et C. La valeur cible du rayon de la courbe terminale des spiraux est de 3,100 mm.

[0043] La figure 5 montre que les trois lots A, B, et C présentent des rayons de courbe terminale clairement distincts. En particulier, les pièces du lot A présentent un rayon de la courbe terminale d'environ 3,205 mm, les pièces du lot B présentent un rayon de la courbe terminale d'environ 3,147 mm, et les pièces du lot C présentent un rayon de la courbe terminale d'environ 3,107 mm. Ces données montrent que les pièces du lot A (silicium non dopé, sans retournement)

sont les plus déformées après l'étape d'oxydation thermique, les pièces du lot B (silicium non dopé, avec retournement intermédiaire) sont un peu moins déformées, et que les pièces du lot C (silicium fortement dopé, sans retournement) sont les moins déformées. Ainsi, l'utilisation de silicium fortement dopé permet de limiter la déformation lors de l'oxydation thermique d'une manière encore plus efficace qu'un retournement de pièces en silicium non dopé.

[0044] Ainsi, on constate que l'utilisation d'un wafer en silicium fortement dopé permet d'éviter les déformations rencontrées avec des wafers en silicium non dopé, lors d'étapes d'oxydation thermique au cours desquelles les wafers sont disposés verticalement, cela sans devoir retourner ou modifier l'orientation des wafers entre des étapes d'oxydation successives. L'effet est également obtenu lorsque les plaquettes sont disposées horizontalement, même si cette déformation est moins sensible, il n'en demeure pas moins que les spiraux peuvent se déformer en-dehors du plan du wafer, sous l'effet de leur poids, et qu'une telle déformation est également limitée avec des spiraux fortement dopés.

[0045] Si les effets découlant de l'invention ont pu être montrés sur des spiraux, on les retrouve de manière identique avec d'autres pièces horlogères en silicium, pour lesquelles il est primordial de contrôler les dimensions et tolérances de fabrication. Il est effet connu de l'homme de l'art, qu'une étape d'oxydation thermique est présente dans quasiment tous les procédés de mise en oeuvre d'une pièce en silicium, au moins dans l'un des buts cités ci-dessus (ajustement dimensionnel, lissage, ajustement du coefficient thermique, renforcement mécanique). On pourra notamment viser des ancrs, des roues, des systèmes à pivot virtuel tels que des ancrs, des balanciers ou des oscillateurs complets, c'est-à-dire comprenant un organe de rappel et une masse inertielle.

Revendications

1. Procédé de limitation de la déformation d'une pièce d'horlogerie en silicium ménagée dans une plaquette, au cours d'une oxydation thermique, **caractérisé par le fait que** l'oxydation thermique est effectuée sur une pièce d'horlogerie en silicium fortement dopé.
2. Procédé de limitation selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la pièce d'horlogerie est réalisée en silicium monocristallin.
3. Procédé de limitation selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** la pièce d'horlogerie est réalisée en silicium monocristallin d'orientation <100> ou <110>.
4. Procédé de limitation selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** comprend une étape de fourniture d'une plaquette en silicium fortement dopé.
5. Procédé de limitation selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le silicium présente une concentration de dopant plus grande que 1×10^{18} , plus particulièrement plus grande que 1×10^{19} , encore plus particulièrement plus grande que 5×10^{19} atomes par cm^3 .
6. Procédé de limitation selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le silicium présente une résistivité plus petite que 0.01 ohm.cm, plus particulièrement une résistivité de 0.005 ohm.cm.
7. Procédé de limitation selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le dopant est choisi parmi du bore ou du phosphore.
8. Procédé de limitation selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** est effectué avec des pièces d'horlogerie formées dans une plaquette disposée verticalement dans un four d'oxydation.
9. Procédé de limitation selon la revendication 8, **caractérisé en ce qu'il** ne comprend pas d'étape de retournement ou de rotation de la plaquette.
10. Procédé de limitation selon l'une des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce que** la pièce d'horlogerie est choisie parmi un spiral, une ancre, une roue, un système à pivot virtuel tels que qu'une ancre, qu'un balancier ou un oscillateur.
11. Utilisation d'un wafer comprenant au moins une couche de silicium fortement dopé, pour limiter la déformation d'une pièce d'horlogerie ménagée dans ladite couche de silicium fortement dopé, au cours d'une oxydation thermique.
12. Utilisation selon la revendication 11, **caractérisée en ce que** la pièce d'horlogerie est réalisée en silicium monocristallin.

13. Utilisation selon la revendication 12, **caractérisée en ce que** la pièce d'horlogerie est réalisée en silicium monocristallin d'orientation <100> ou <110>.
- 5 14. Utilisation selon l'une des revendications 11 à 13, **caractérisée en ce qu'il** comprend une étape de fourniture d'une plaquette en silicium fortement dopé.
- 10 15. Utilisation selon l'une des revendications 11 à 14, **caractérisée en ce que** le silicium présente une concentration de dopant plus grande que 1×10^{18} , plus particulièrement plus grande que 1×10^{19} , encore plus particulièrement plus grande que 5×10^{19} atomes par cm^3 .
- 15 16. Utilisation de réalisation selon l'une des revendications 11 à 15, **caractérisée en ce que** le silicium présente une résistivité plus petite que 0.01 ohm.cm, plus particulièrement une résistivité comprise entre 0.0045 et 0.0055 ohm.cm, encore plus particulièrement une résistivité de 0.005 ohm.cm.
- 20 17. Utilisation selon l'une des revendications 11 à 16, **caractérisée en ce que** le dopant est choisi parmi du bore ou du phosphore.
- 25 18. Utilisation selon l'une des revendications 11 à 17, **caractérisée en ce qu'il** est effectué avec des pièces d'horlogerie formées dans une plaquette disposée verticalement dans un four d'oxydation.
- 30 19. Utilisation selon la revendication 18, **caractérisée en ce qu'il** ne comprend pas d'étape de retournement ou de rotation de la plaquette
- 35 20. Utilisation selon l'une des revendications 11 à 19, dans laquelle la pièce d'horlogerie est choisie parmi un spiral, une ancre, une roue, un système à pivot virtuel tels que qu'une ancre, qu'un balancier ou un oscillateur.
- 40
- 45
- 50
- 55

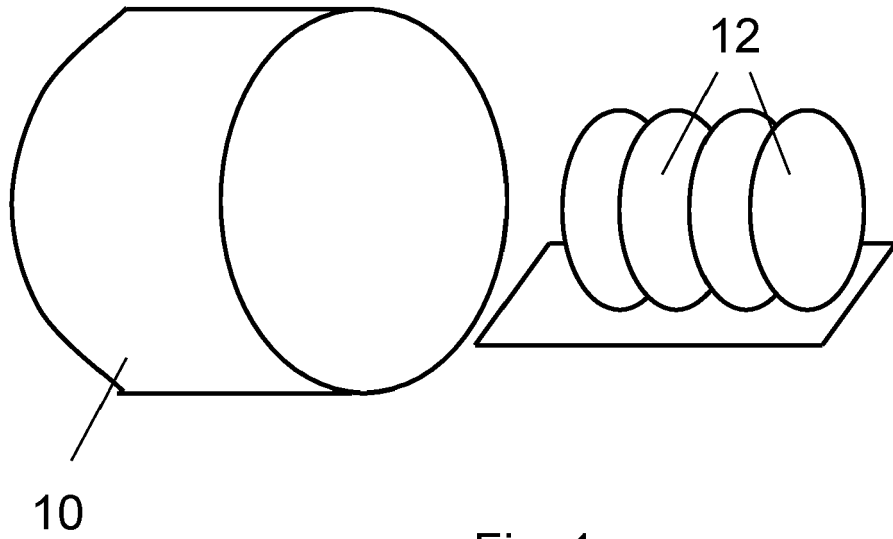


Fig. 1

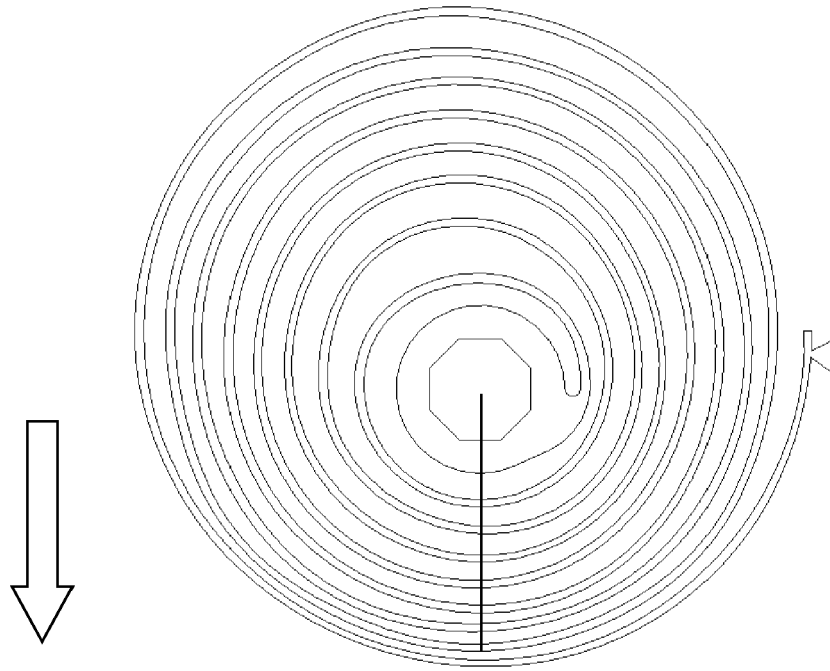


Fig. 2

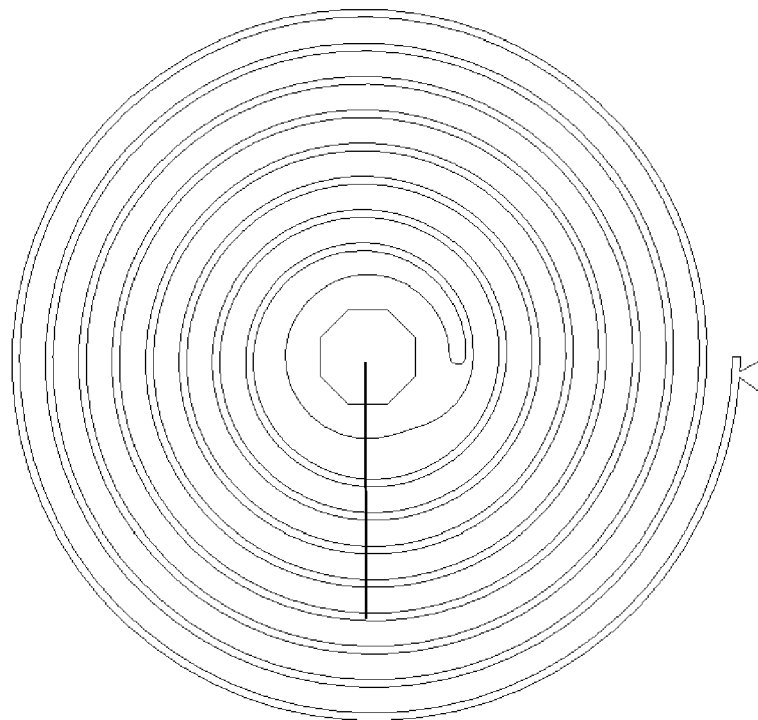


Fig. 3

Fig. 4

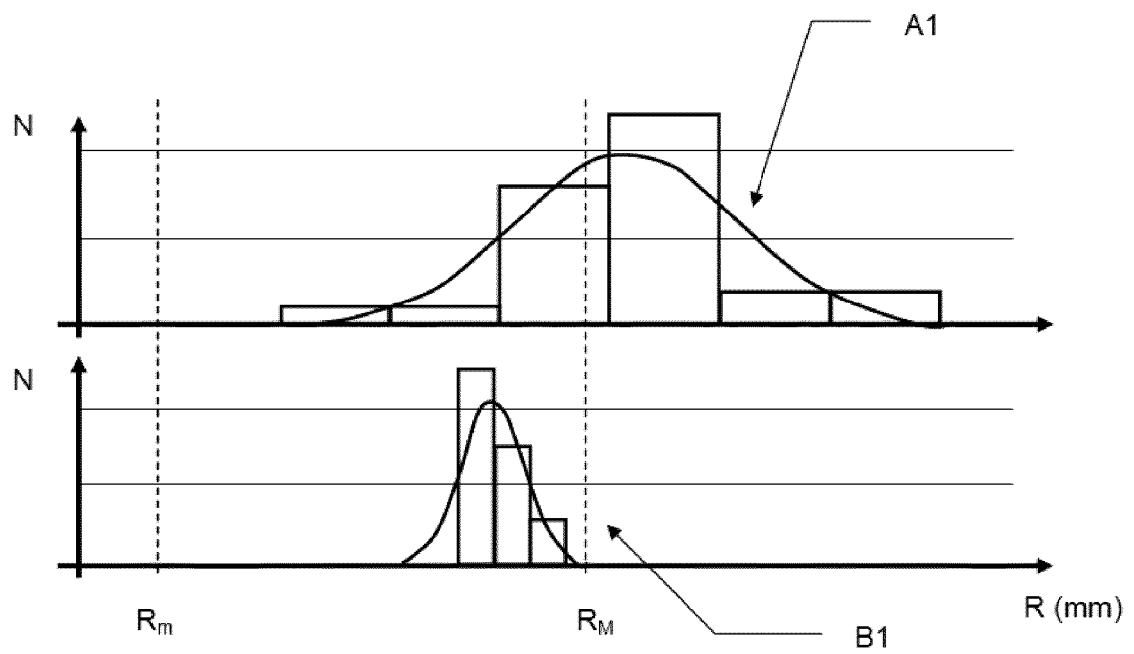
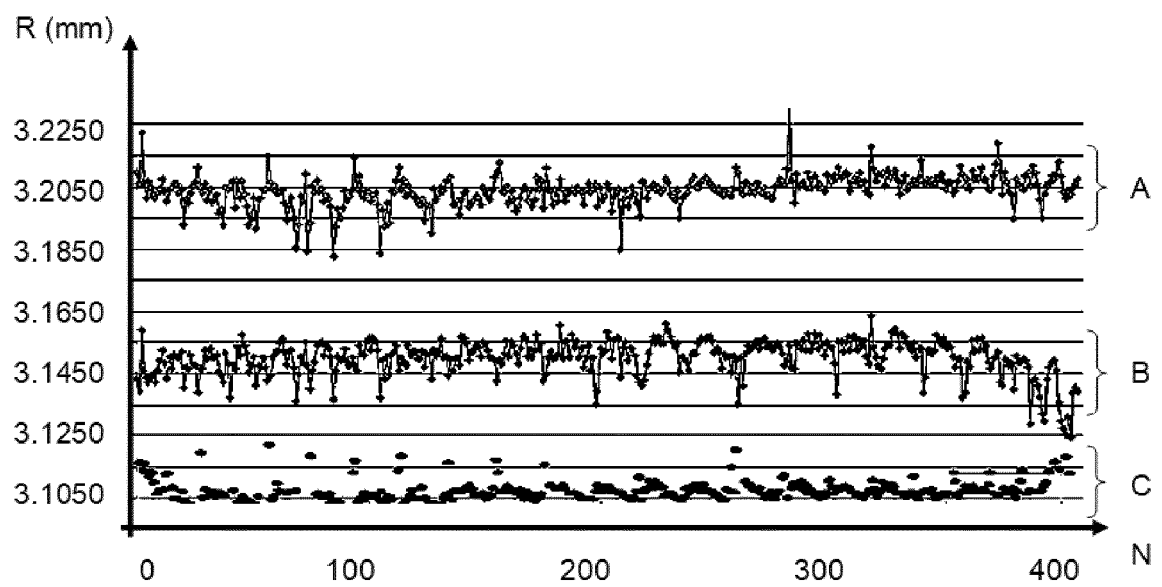


Fig. 5





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 23 15 1601

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	WO 2019/180596 A1 (PATEK PHILIPPE SA GENEVE [CH]) 26 septembre 2019 (2019-09-26) * page 5, ligne 25 - page 6, ligne 3; figure 9 * * page 2, ligne 6 * * page 2, ligne 10 * * page 1, ligne 3 - ligne 5 * -----	1-20	INV. G04B1/14 G04B15/14 G04B17/06 G04B17/22 G04D3/00
A	EP 3 159 746 A1 (ROLEX SA [CH]) 26 avril 2017 (2017-04-26) * alinéa [0037] * * alinéa [0018] * -----	3, 5, 7, 13, 15, 17	
A	EP 3 709 098 A1 (SEIKO EPSON CORP [JP]) 16 septembre 2020 (2020-09-16) * alinéa [0104] * -----	8, 18	
A	CH 716 696 A2 (SIGATEC SA [CH]) 15 avril 2021 (2021-04-15) * alinéa [0032] * -----	6, 16	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) G04B G04D
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 17 mai 2023	Examineur Scordel, Maxime
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 23 15 1601

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.

17-05-2023

10

Document brevet cité
au rapport de recherche

Date de
publication

Membre(s) de la
famille de brevet(s)

Date de
publication

15

WO 2019180596 A1 26-09-2019 CN 111868637 A 30-10-2020

CN 114460826 A 10-05-2022

EP 3543795 A1 25-09-2019

EP 3769162 A1 27-01-2021

EP 3907567 A1 10-11-2021

JP 2021518548 A 02-08-2021

US 2021026299 A1 28-01-2021

WO 2019180596 A1 26-09-2019

20

EP 3159746 A1 26-04-2017 CN 106597828 A 26-04-2017

EP 3159746 A1 26-04-2017

JP 6869689 B2 12-05-2021

JP 2017083434 A 18-05-2017

US 2017108831 A1 20-04-2017

25

EP 3709098 A1 16-09-2020 CN 111694256 A 22-09-2020

EP 3709098 A1 16-09-2020

JP 6908064 B2 21-07-2021

JP 7207458 B2 18-01-2023

JP 2020148651 A 17-09-2020

JP 2021152552 A 30-09-2021

US 2020292991 A1 17-09-2020

30

CH 716696 A2 15-04-2021 AUCUN

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 1422436 A [0009]
- EP 2215531 A [0009]
- WO 2016128694 A [0009]
- WO 2019180596 A [0012] [0022] [0027]