



CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH** **718 082 B1**

Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein
Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(51) Int. Cl.: **C23C** **16/40** (2006.01)
H01L **21/02** (2006.01)
G04B **17/06** (2006.01)
B81B **3/00** (2006.01)
G04B **17/04** (2006.01)

(12) **FASCICULE DU BREVET**

(21) Numéro de la demande: 001491/2020

(22) Date de dépôt: 23.11.2020

(43) Demande publiée: 31.05.2022

(24) Brevet délivré: 30.11.2023

(45) Fascicule du brevet publié: 30.11.2023

(73) Titulaire(s):
CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique
SA - Recherche et Développement, Rue Jaquet-Droz 1
2007 Neuchâtel (CH)

(72) Inventeur(s):
Michel Despont, 1400 Cheseaux-Noréaz (CH)
Michele Palmieri, 1588 Cudrefin (CH)
Olivier Dubochet, 2562 Port (CH)
Yves Petremand, 1400 Yverdon-les-Bains (CH)

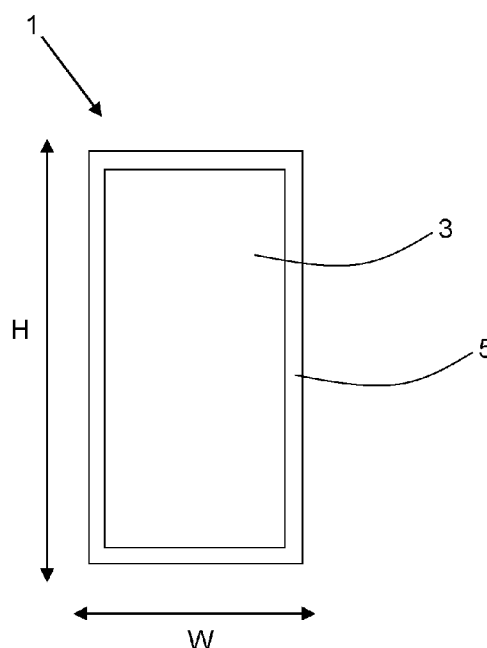
(74) Mandataire:
e-Patent SA, Rue Saint-Maurice 12 Case postale
2001 Neuchâtel 1 (CH)

(54) **Procédé de fabrication d'un élément élastique pour un système micromécanique.**

(57) L'invention concerne un procédé de fabrication d'un élément élastique (1) pour un système micromécanique, comprenant :

- la formation d'un noyau (3) en silicium ou en carbure de silicium ;
- le dépôt d'une couche de thermocompensation (5) de dioxyde de silicium sur ledit noyau.

Selon l'invention, ladite couche de thermocompensation (5) est déposée par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur à basse pression d'orthosilicate de tétraéthyle.



Description

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne le domaine de la micromécanique, en particulier mais non exclusivement l'horlogerie et les MEMS (systèmes micro-électro-mécaniques). En particulier, elle concerne un procédé de fabrication d'un élément élastique destiné à être incorporé dans de tels systèmes.

État de l'art

[0002] Au cours des dernières décennies, les éléments élastiques micro-usinés sont devenus courants dans les systèmes micromécaniques, notamment dans les dispositifs MEMS et l'horlogerie. En particulier, le silicium monocristallin est devenu un matériau populaire pour ces éléments élastiques, qu'ils soient sous forme de ressorts à spirale classiques ou de ressorts à lame, bien que d'autres matériaux tels que le silicium amorphe ou polycristallin, le carbure de silicium, le verre, le quartz et le métal soient également utilisés. Ces éléments élastiques sont typiquement micro-usinés, par exemple par gravure d'une plaque de matériau à travers un masque, par frittage dans un moule ou par électrodéposition (par exemple LIGA) dans le cas du métal (qui est typiquement du nickel, du cuivre, du phosphore de nickel et similaire).

[0003] Cependant, ces matériaux présentent souvent une propriété indésirable qui nécessite une compensation.

[0004] Pour prendre l'exemple spécifique du silicium monocristallin, ce matériau a un coefficient thermoélastique dE/dT fortement négatif, c'est-à-dire que lorsque la température augmente, le module de Young du matériau diminue et l'élément élastique devient moins rigide. Dans la direction $\langle 100 \rangle$ du plan $\{001\}$, cette variation est d'environ -60 ppm/K . Dans le cas d'un oscillateur horloger, où l'élément élastique fournit une force de rappel à une masse inertielle afin de la faire osciller autour d'une position neutre, cela peut conduire à des erreurs importantes dans la cadence journalière de l'oscillateur, de l'ordre de 155 secondes par jour dans une gamme de température de $23 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

[0005] Dans le cas où l'élément élastique est utilisé dans un dispositif MEMS, tel qu'un capteur, pour fournir une force de rappel à un micromécanisme construit pour mesurer une valeur d'un paramètre particulier (par exemple, une accélération, une force ou similaire), des variations de température peuvent provoquer des erreurs de mesure significatives en affectant la rigidité de l'élément élastique. Dans le cas d'un actionneur MEMS, tel qu'un micromiroir orientable, ces changements entraînent une imprécision du positionnement de l'actionneur et de tout élément affecté par celui-ci (par exemple, un miroir).

[0006] Le document EP 1 422 436 apporte une solution à ce problème dans le cadre d'un oscillateur horloger, dans lequel l'élément élastique est pourvu d'une couche fonctionnelle externe en un matériau à coefficient thermoélastique fortement positif, à savoir le dioxyde de silicium SiO_2 (dE/dT environ $+215 \text{ ppm/K}$). L'épaisseur de cette couche peut être choisie pour accorder le coefficient thermoélastique de tout l'élément élastique comme on le souhaite, de manière à le rendre sensiblement nul, ou pour obtenir une valeur positive ou négative souhaitée de manière à thermocompenser l'influence de la température sur la masse inertielle particulière (par exemple le balancier) avec laquelle elle interagit pour former un oscillateur.

[0007] L'oxyde obtenu par croissance thermique, c'est-à-dire par l'oxydation de la surface du silicium plutôt que le dépôt d'une couche sur celle-ci, est la principale technologie utilisée pour former ces couches, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle est efficace et peut être contrôlée avec précision. Simple à mettre en oeuvre, elle élimine les défauts de surface du silicium et protège en même temps le noyau de silicium en couvrant entièrement sa surface et en laissant les éventuels défauts structuraux de surface à l'intérieur de la couche d'oxyde. De plus, un tel procédé peut également être utilisé pour accorder la fréquence car il consomme du silicium, et permet donc d'accorder la rigidité de l'élément élastique s'il est retiré partiellement ou complètement (dans ce dernier cas, cela représenterait une étape supplémentaire avant de former la couche de thermocompensation).

[0008] Cependant, l'inconvénient d'une telle solution est que la couche de dioxyde de silicium présente une contrainte intrinsèque importante lorsque l'on utilise des procédés d'oxydation par croissance thermique ou d'autres procédés à haute température pour former cette couche. Ces contraintes internes sont dues aux températures élevées, typiquement de $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ou plus, qui créent des défauts ponctuels auto-interstitiels dans le cristal de silicium, aux variations locales des contraintes internes liées à la topographie du silicium, et à l'accumulation de contraintes lorsque l'élément élastique est refroidi à la température ambiante. Même dans le cas où la couche d'oxyde est retirée, elle peut parfois créer une déformation permanente du silicium.

[0009] Toutes ces contraintes intrinsèques résiduelles sont problématiques en général, y compris dans les ressorts à spirale plats conventionnels, mais sont particulièrement problématiques dans les oscillateurs modernes non conventionnels tels que l'oscillateur dit „Généquand“, où la topologie des éléments élastiques est beaucoup plus complexe qu'un simple ressort à spirale. Par conséquent, dans le cas de mécanismes à flexures surcontraintes, la contrainte interne peut créer des effets indésirables supplémentaires tels que le raidissement ou le ramollissement du ressort, des effets d'affaiblissement et même une déformation géométrique des éléments élastiques comme la flexion, le flambage, la torsion, etc. Cela peut entraîner un comportement déséquilibré et, dans le cas des oscillateurs, des variations de fréquence en fonction de l'orientation du vecteur gravité et une dépendance non linéaire de la fréquence à la température. Dans le cas des éléments élastiques des dispositifs MEMS, les mêmes effets indésirables sont tout aussi problématiques.

[0010] Outre la croissance de couches d'oxyde sur le noyau de silicium par réaction de l'oxygène avec ledit matériau, les procédés de dépôt pour former des couches fonctionnelles, tels que le dépôt de couches atomiques (ALD), diverses formes de dépôt chimique en phase vapeur (CVD), diverses formes de dépôt physique en phase vapeur (PVD) et le dépôt moléculaire en phase vapeur (MVD) peuvent également induire des contraintes indésirables, en fonction de la température du procédé, et/ou sont trop lents pour être commercialement viables.

[0011] Par exemple, dans l'un des modes de réalisation divulgués dans le document EP 3 002 638, un ressort à spirale à noyau de silicium est pourvu d'une couche de thermocompensation de dioxyde de silicium déposée par diverses formes de procédés CVD, PVD, ALD et MVD à 500 °C ou moins. Les résultats rapportés dans ce document indiquent cependant que le simple dépôt d'une couche de dioxyde de silicium de cette manière ne donne pas de résultats satisfaisants, et nécessite un traitement thermique entre 800 °C et 1050 °C afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées. Par conséquent, des contraintes inhérentes résiduelles sont encore introduites dans la structure. En outre, l'uniformité des couches de SiO₂ produites par les procédés CVD et PVD classiques est discutable, alors que les procédés ALD et MVD produisent des couches très uniformes mais sont des procédés extrêmement lents. Par conséquent, ils ne sont pas rentables pour déposer les épaisseurs de SiO₂ nécessaires à la thermocompensation, qui sont typiquement de l'ordre de 1-3 µm dans le cas des composants d'oscillateurs de pièce d'horlogerie.

[0012] De plus, une couche d'Al₂O₃ déposée par ALD, bien que présentée comme une caractéristique optionnelle, semble être nécessaire pour l'adhésion entre la couche de SiO₂ et le noyau de silicium.

[0013] Le but de la présente invention est donc de surmonter au moins partiellement au moins certains des inconvénients de l'art antérieur susmentionnés.

Divulcation de l'invention

[0014] Plus précisément, l'invention concerne un procédé de fabrication d'un élément élastique pour un système micro-mécanique, des types décrits cidessus. Cette méthode comprend les étapes suivantes :

[0015] - la formation d'un noyau de silicium monocristallin, amorphe ou polycristallin, par exemple par masquage et gravure à partir d'une plaque de silicium ou de carbure de silicium ;

[0016] - le dépôt une couche de thermocompensation de dioxyde de silicium sur ledit noyau jusqu'à une épaisseur prédéterminée.

[0017] Selon l'invention, ladite couche de thermocompensation est déposée par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur à basse pression d'orthosilicate de tétraéthyle LPCVD-TEOS. Ce procédé permet d'utiliser des températures de traitement suffisamment basses pour éviter d'introduire des contraintes inhérentes / des contraintes résiduelles dans la couche de thermocompensation, tout en produisant une couche d'excellente conformité (c'est-à-dire d'épaisseur constante). Par conséquent, l'élément élastique fini ne présente que peu ou pas de contraintes inhérentes, et la couche de thermocompensation peut être déposée à un débit commercialement viable pour une production à grande échelle.

[0018] De préférence, le procédé de dépôt chimique en phase vapeur à basse pression d'orthosilicate de tétraéthyle est réalisé à une température inférieure à 750 °C, de préférence entre 650 °C et 725 °C.

[0019] De préférence, ledit procédé de dépôt chimique en phase vapeur à basse pression d'orthosilicate de tétraéthyle est réalisé dans les conditions suivantes :

- température entre 690 °C et 725 °C ;
- pression entre 93.3 Pa (700 mTorr) et 113.3 Pa (850 mTorr) ;
- débit d'orthosilicate de tétraéthyle entre 50 sccm à 70 sccm.

[0020] De préférence, ladite couche de thermocompensation est déposée directement sur ledit noyau, sans qu'aucune couche intermédiaire telle que des couches d'adhérence ne soit présente. Par conséquent, le nombre d'étapes de traitement peut être réduit au minimum.

Brève description des dessins

[0021] D'autres détails de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée en relation avec la figure, qui illustre :

- Figure 1 : une vue schématique en coupe d'un élément élastique selon l'invention.

Réalisation de l'invention

[0022] La figure 1 illustre schématiquement une vue en coupe transversale d'un élément élastique 1 du type produit selon le procédé de l'invention, perpendiculairement à sa direction longitudinale (c'est-à-dire à son axe principal).

[0023] Cet élément élastique 1 peut être un ressort à spirale (c'est-à-dire un ressort plat sensiblement en spirale) pour un oscillateur de pièce d'horlogerie, ou un ressort à lame de toute forme connue pour un oscillateur de pièce d'horlogerie (pour les variantes modernes basées sur la flexion, voir par exemple la thèse de l'EPFL Flexure Pivot Oscillators for Mechanical Watches, Etienne Thalmann, Thesis Number 8802, 11 June 2020) ou pour un dispositif MEMS tel qu'un capteur (par exemple du type décrit dans S. Beeby et al, MEMS Mechanical Sensors, Artech House on Demand, 2004), un actionneur, une base de temps (par exemple du type décrit dans Ng, E. et al. The long path from MEMS resonators to timing products, Proceedings of 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. 1-2 (IEEE, 2015)) ou similaires, y compris, mais sans s'y limiter, les types mentionnés dans l'introduction. Dans le cas d'un oscillateur mécanique, l'élément élastique 1 est destiné à faire osciller une masse inertielle en translation et/ou en rotation autour d'un point neutre, alors que dans un dispositif MEMS, l'élément élastique 1 est destiné à fournir une force de rappel pour un capteur ou un actionneur.

[0024] L'élément élastique 1 comprend un noyau 3 en silicium, qui est typiquement du silicium monocristallin ou du carbure de silicium mais qui peut aussi être polycristallin (par exemple microcristallin) ou amorphe. Selon le rôle, la section transversale du noyau 3 peut être comprise entre $1\ \mu\text{m}^2$ et $8000\ \mu\text{m}^2$, avec une hauteur comprise entre 1 et $800\ \mu\text{m}$ et une largeur comprise entre 1 et $100\ \mu\text{m}$, et est typiquement produite par gravure d'une plaque de matériau à travers d'un masque, bien que d'autres procédés tels que le frittage dans un moule, soient possibles, comme cela est généralement connu dans le domaine du micro-usinage et n'a donc pas besoin d'être expliqué de manière exhaustive ici. La longueur du noyau est typiquement comprise entre 0,5 et 10 mm, la „longueur“ étant définie comme la dimension la plus longue de l'élément élastique 1, la „largeur“ étant l'autre dimension dans le plan de l'élément élastique 1 dans lequel il est destiné à fléchir, et la „hauteur“ étant la dimension perpendiculaire à ce plan.

[0025] Sur au moins certaines des surfaces extérieures du noyau 3, typiquement au moins toutes les surfaces extérieures illustrées sur la figure 1, une couche de thermocompensation 5 d'oxyde de silicium SiO_2 est prévue, l'épaisseur de cette couche 5 étant choisie pour accorder les propriétés thermoélastiques (c'est-à-dire la variation du module de Young par rapport à la température) de l'élément élastique à une valeur souhaitée. Cette épaisseur est typiquement comprise entre 1 et $3\ \mu\text{m}$, et peut être uniforme ou variable. En outre, la couche de thermocompensation 5 peut être prévue sur tout ou partie de la surface extérieure du noyau 3. En outre, l'épaisseur de la couche de SiO_2 peut être prédéterminée de manière à sous-compenser la réponse thermoélastique du noyau 3, à la compenser sensiblement ou à la surcompenser, et ainsi à accorder la réponse thermoélastique de l'élément élastique 1 à une valeur souhaitée. Dans le cas d'une surcompensation ou d'une sous-compensation, la réponse thermoélastique de l'élément élastique 1 peut être accordée pour compenser l'effet de la température sur l'inertie d'une masse inertielle associée, telle qu'un balancier dans le contexte d'un oscillateur.

[0026] La couche de thermocompensation 5 est de préférence formée directement sur la surface du noyau 3 sans aucune couche intermédiaire, mais l'interposition d'une couche supplémentaire (non illustrée) telle qu'une couche d'adhérence (par exemple Al_2O_3 déposé par ALD) n'est pas exclue.

[0027] Le coeur de l'invention concerne le procédé particulier choisi pour déposer la couche de thermocompensation 5 sur le noyau 3. Il s'agit du procédé de dépôt appelé LPCVD-TEOS (dépôt chimique en phase vapeur à basse pression d'orthosilicate de tétraéthyle $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$), dans lequel l'oxyde de dioxyde de silicium est déposé sur une surface à partir d'un précurseur liquide $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$.

[0028] Ce procédé se déroule à une température inférieure à $750\ ^\circ\text{C}$, et permet de créer une couche de très haute conformité à un débit de dépôt suffisamment élevé pour être économiquement adaptée au dépôt de la couche de thermocompensation 5, qui a typiquement une épaisseur de 1-3 μm . En outre, l'adhérence de la couche de dioxyde de silicium au silicium sous-jacent est adéquate sans nécessiter de couche d'adhérence.

[0029] Typiquement, le noyau 3 est d'abord chauffé entre $200\ ^\circ\text{C}$ et $500\ ^\circ\text{C}$ dans une chambre de réaction, puis un mélange gazeux de TEOS et d'ozone est introduit dans la chambre. Une fois que le mélange gazeux de TEOS s'est réparti de manière homogène, un plasma radiofréquence est induit, comme cela est généralement connu, ce qui lance le processus de dépôt de SiO_2 . Le TEOS se décompose à la surface du noyau 3, et forme ainsi la couche de thermocompensation 5.

[0030] L'utilisation du procédé LPCVD-TEOS permet d'éviter les températures élevées et les contraintes résiduelles associées, et de produire des couches de SiO_2 très uniformes à une épaisseur prédéterminée.

[0031] Les paramètres typiques du processus sont les suivants :

- température entre $690\ ^\circ\text{C}$ et $725\ ^\circ\text{C}$;
- pression entre 93.3 Pa (700 mTorr) et 113.3 Pa (850 mTorr) ;
- débit d'orthosilicate de tétraéthyle entre 50 sccm à 70 sccm.

[0032] En conséquence, on peut voir que le procédé de l'invention comprend une étape de formation du noyau 3, suivie d'une étape de formation de la couche de thermocompensation 5 à une épaisseur prédéterminée au moyen d'un procédé LPCVD-TEOS, de préférence directement sur la surface du noyau 3 sans dépôt d'une couche d'adhérence ou autre.

[0033] Bien que l'invention ait été décrite en référence à des modes de réalisation spécifiques, des variations sont possibles sans sortir du cadre des revendications annexées.

Revendications

1. Procédé de fabrication d'un élément élastique (1) pour un système micromécanique, comprenant :
 - la formation d'un noyau (3) en silicium ou en carbure de silicium ;
 - le dépôt d'une couche de thermocompensation (5) de dioxyde de silicium sur ledit noyau jusqu'à une épaisseur prédéterminée,caractérisé en ce que ladite couche de thermocompensation (5) est déposée par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur à basse pression d'orthosilicate de tétraéthyle LPCVD-TEOS.
2. Procédé selon la revendication précédente, ledit procédé de dépôt chimique en phase vapeur à basse pression d'orthosilicate de tétraéthyle étant réalisé à une température inférieure à 750 °C, de préférence entre 650 °C et 725 °C.
3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, ledit procédé de dépôt chimique en phase vapeur à basse pression d'orthosilicate de tétraéthyle étant réalisé dans des conditions de :
 - température entre 690 °C et 725 °C ;
 - pression entre 93.3 Pa et 113.3 Pa ;
 - débit d'orthosilicate de tétraéthyle entre 50 sccm et 70 sccm.
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, ladite couche de thermocompensation (5) étant déposée directement sur ledit noyau.

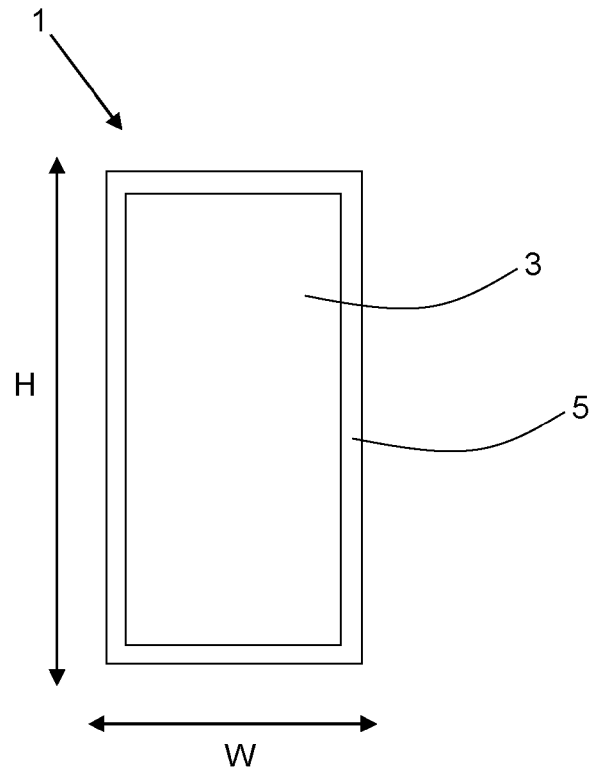


Figure 1