

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
18 août 2016 (18.08.2016)

(10) Numéro de publication internationale
WO 2016/128694 A1

- (51) Classification internationale des brevets :
G04B 17/06 (2006.01) *B81B 3/00* (2006.01)
G04B 17/22 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2016/050333
- (22) Date de dépôt international :
12 février 2016 (12.02.2016)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1551233 13 février 2015 (13.02.2015) FR
- (71) Déposant : TRONIC'S MICROSYSTEMS [FR/FR]; 98
rue du Pré de l'Herme, 38920 Crolles (FR).
- (72) Inventeurs : GAFF, Vincent; 400 Route de Souveyron,
38320 Brie (FR). VISSE, Pierre-Marie; 12 Cours de la
Libération, 38100 Grenoble (FR). RIBETTO, Luca; 47
Boulevard Campaloud, 38500 Voiron (FR).
- (74) Mandataires : PALIX, Stéphane et al.; Cabinet Laurent
& Charras, Le Contemporain, 50 Chemin de la Bruyère,
69574 Dardilly Cédex (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasiatique (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU,
TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU,
LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,
SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Publiée :
— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

[Suite sur la page suivante]

- (54) Title : MECHANICAL OSCILLATOR AND ASSOCIATED PRODUCTION METHOD
(54) Titre : OSCILLATEUR MÉCANIQUE ET PROCÉDÉ DE RÉALISATION ASSOCIÉ

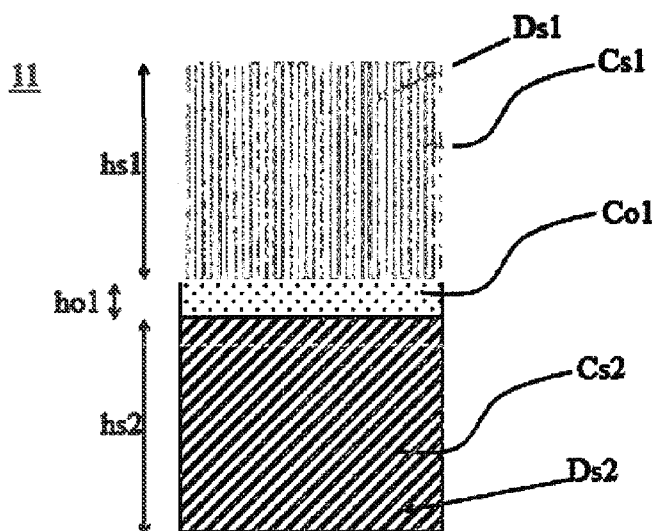


Fig. 1

(57) Abstract : The invention relates to a mechanical oscillator equipped with a bar (11), said bar (11) including a first silicon layer (Cs1) having a crystal lattice extending in a first direction (Ds1) of a plane, a thermally compensating layer (Co1) formed from a material having a Young's modulus of thermal coefficient of opposite sign to that of silicon, and a second silicon layer (Cs2) having a crystal lattice extending in a second direction (Ds2) of the plane, the first and second directions (Ds1, Ds2) being shifted by an angle of 45° in the plane of the layers, and the thermally compensating layer (Co1) extending between the first and second silicon layers (Cs1, Cs2).

(57) Abrégé : L'invention concerne un oscillateur mécanique muni d'un barreau (11), ledit barreau (11) comportant une première couche de silicium (Cs1) comportant un réseau cristallin s'étendant selon une première direction (Ds1) d'un plan, une couche de compensation thermique (Co1) constituée d'un matériau présentant un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à

celui du silicium, et une deuxième couche de silicium (Cs2) comportant un réseau

[Suite sur la page suivante]

WO 2016/128694 A1

- *avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h)*

OSCILLATEUR MECANIQUE ET PROCEDE DE REALISATION ASSOCIEDOMAINE TECHNIQUE

5 L'invention concerne le domaine des oscillateurs mécaniques ainsi qu'un procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique. L'invention trouve une application particulièrement avantageuse pour les ressorts spiraux destinés à équiper le balancier d'un ensemble d'horlogerie mécanique telle qu'une montre.

10 ART ANTERIEUR

Un oscillateur mécanique est un dispositif permettant d'entretenir le mouvement d'une masse par rapport à un point stable sous l'effet d'une force. La force instantanée appliquée par l'oscillateur mécanique sur la masse dépend de plusieurs paramètres dont
15 la raideur du matériau constituant l'oscillateur mécanique. L'oscillateur mécanique est classiquement constitué par un barreau qui peut adopter des formes très variées telles qu'un segment droit, un hélicoïde ou une spirale.

Certaines applications de précision, telles que les ressorts spiraux destinés à
20 équiper le balancier d'un ensemble d'horlogerie mécanique, nécessitent un barreau sous la forme d'une spirale dont la raideur varie le moins possible en fonction de la température. La raideur d'un ressort de type spiral est donnée par :

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

avec :

φ , l'angle de torsion du ressort et

25 M , le couple de rappel du ressort spiral.

L'équation de ce couple de rappel pour un barreau constitué d'un matériau spécifique est donné par :

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

avec :

E , le module d'Young du matériau employé pour le barreau,
 L , la longueur du barreau,
 w , la largeur du barreau, et
 t , l'épaisseur du barreau.

5

La fréquence propre de résonance du spiral est proportionnelle à la racine carrée de sa raideur. Par conséquent, la fréquence du spiral est proportionnelle à la racine carré du module d'Young du matériau du barreau. Donc, si le module d'Young varie en fonction de la température, la fréquence du spiral va également varier en fonction de la
10 température. Pour une faible variation en température, la fréquence du spiral dépend donc au premier ordre de la variation en température du module d'Young. Il est ainsi admis que l'équation suivante montre les variations du module d'Young en fonction de la température :

$$E = E_0(1 + \alpha_E (T - T_0))$$

avec :

15 α_E , le coefficient thermique du module d'Young,
 E , le module d'Young à la température T , et
 E_0 , le module d'Young à la température T_0 .

Il est connu de fabriquer des oscillateurs mécaniques en utilisant des alliages
20 complexes, tant par le nombre des composants (fer, carbone, nickel, chrome, tungstène, molybdène, béryllium, niobium...) que par les procédés métallurgiques utilisés pour obtenir une auto compensation des variations du module d'élasticité du métal en combinant deux influences contraires: celle de la température et celle de la magnéto
25 constriction (contraction des corps magnétiques sous l'effet de l'aimantation). Cependant, ces oscillateurs métalliques sont difficiles à fabriquer. Tout d'abord, en raison de la complexité des procédés utilisés pour réaliser les alliages, les propriétés mécaniques intrinsèques du métal ne sont pas constantes d'une production à l'autre. Ensuite, le réglage, qui est la technique permettant de faire en sorte que
30 l'oscillateur soit régulier, est fastidieux et long. Cette opération nécessite de nombreuses interventions manuelles et beaucoup de pièces défectueuses doivent être éliminées. Pour ces raisons, la production est coûteuse et le maintien d'une qualité constante est un défi permanent.

Il est également connu de réaliser des oscillateurs mécaniques par gravure d'une galette de silicium afin d'améliorer la régularité et la précision de conception. Les procédés de réalisation de ces oscillateurs mécaniques utilisent généralement des galettes de silicium monocristallin. Ainsi, ces oscillateurs mécaniques présentent une direction cristallographique prédéterminée par rapport à la galette de silicium utilisée, par exemple l'ensemble de directions $\langle 100 \rangle$. Cependant, le module d'Young pour le silicium monocristallin n'est pas identique dans toutes les directions du matériau et cela induit une différence de comportement mécanique en fonction de l'axe du mouvement.

La demande de brevet suisse N° 699 780 présente un oscillateur mécanique de type spiral réalisé à partir d'une galette de silicium monocristallin. Les variations en température du module d'Young du barreau en forme de spiral sont compensées par deux couches métalliques amorphes disposées à l'intérieur du barreau de silicium et dont le coefficient thermique du module d'Young est opposé à celui du silicium. Ce document ne permet pas de compenser les variations en température du module d'Young de la même manière dans plusieurs directions du plan de la galette de silicium monocristallin.

Les brevets européens N° 1 422 436 et N° 2 215 531 présentent également un oscillateur mécanique de type spiral réalisé à partir d'une galette de silicium monocristallin. Les variations en température du module d'Young sont compensées par une couche d'oxyde de silicium amorphe disposée autour d'un barreau de silicium. Le coefficient thermique du module d'Young pour le silicium est de $-64 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ et le coefficient thermique du module d'Young pour l'oxyde de silicium est de $187,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ à une température ambiante, environ 20°C .

Le brevet européen N° 1 422 436 propose de compenser les variations du module d'Young du barreau en silicium dans plusieurs directions d'un plan à l'aide d'une modulation de la largeur du barreau en fonction des sollicitations attendues par le barreau. Cette solution est particulièrement complexe à mettre en œuvre car elle nécessite de connaître toutes les sollicitations attendues sur le barreau et d'adapter la forme du barreau en conséquence.

Le brevet européen N° 2 215 531 propose de résoudre ce problème en utilisant un barreau de silicium spécifique orienté selon l'axe cristallographique {1,1,1} qui présente des caractéristiques mécaniques similaires dans plusieurs directions d'un plan. Ce mode de réalisation nécessite un silicium très particulier qui contraint fortement le
5 procédé de fabrication de l'oscillateur mécanique.

Le problème technique de l'invention consiste donc à proposer un oscillateur mécanique en silicium monocristallin simple à fabriquer dont les caractéristiques mécaniques sont les mêmes dans toutes les directions d'un plan. En outre, l'invention
10 vise également à limiter les variations des caractéristiques mécaniques en fonction de la température.

EXPOSE DE L'INVENTION

15 La présente invention propose de répondre à ce problème technique par un assemblage de deux couches de silicium monocristallin, dont les directions des réseaux cristallins sont décalées, en intercalant une couche de compensation thermique.

Selon un premier aspect, l'invention concerne un oscillateur mécanique muni d'un
20 barreau, ledit barreau comportant une première couche de silicium comportant un réseau cristallin s'étendant selon une première direction d'un plan, une couche de compensation thermique constituée d'un matériau présentant un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium, et une deuxième couche de silicium comportant un réseau cristallin s'étendant selon une deuxième direction du
25 plan, la première et la deuxième direction étant décalées d'un angle de 45° dans le plan des couches, et la couche de compensation thermique s'étendant entre les première et deuxième couches de silicium.

Au sens de l'invention, un barreau correspond donc à une structure composite
30 comportant plusieurs couches de matériaux et non à une structure monolithique.

L'invention permet ainsi d'obtenir un oscillateur mécanique dont le comportement mécanique est identique dans toutes les directions du plan quel que soit la température. La variation du module d'Young pour le silicium monocristallin entre plusieurs directions du matériau est compensée par la présence de deux couches de silicium monocristallin identiques décalées de 45°. L'influence du coefficient thermique du module d'Young sur les caractéristiques mécaniques en fonction de la température est limitée à l'aide de la couche de compensation thermique. Ainsi, le barreau se comporte globalement sensiblement de la même manière quel que soit la direction du plan considérée et quel que soit la température. En choisissant, par exemple, une couche de compensation thermique isotrope dans le plan (ou amorphe), celle-ci présente également un coefficient thermique du module d'Young également isotrope. Cette couche de compensation thermique compense donc de manière homogène les variations de raideur subies par le barreau. En outre, il n'est pas nécessaire de prévoir un réseau monocristallin isotrope dans un plan qui nécessiterait un procédé de fabrication complexe.

Selon un mode de réalisation, ledit barreau comporte une troisième couche de silicium comportant un réseau cristallin s'étendant selon une troisième direction parallèle à la direction de la première couche de silicium, et une deuxième couche de compensation thermique constituée d'un matériau présentant un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium, chaque couche de compensation thermique étant disposée entre deux couches de silicium superposées, la direction de la couche de silicium, disposée entre les deux autres couches de silicium, étant décalée d'un angle de 45° avec la direction des deux autres couches de silicium. Ce mode de réalisation, en multipliant les couches, permet de limiter l'épaisseur de chaque couche de compensation thermique.

Selon un mode de réalisation, ledit barreau comporte une couche externe constituée d'un matériau présentant un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium. L'utilisation de la couche de compensation thermique s'étendant entre les première et deuxième couches de silicium permet de limiter l'épaisseur de la couche externe.

Selon un mode de réalisation, la couche de compensation thermique dont le matériau présente un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium est réalisée en oxyde de silicium. Ce mode de réalisation permet de faciliter le processus de fabrication de l'oscillateur mécanique car l'oxyde de silicium est obtenu à partir du silicium au contact de l'air ou dans une chambre d'Oxydation.

Selon un mode de réalisation, le rapport volumique entre le matériau présentant un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium et les couches de silicium, dépend de la nature de ce matériau. Par exemple, pour l'oxyde de silicium, il est compris entre 20% et 30%, préférentiellement voisin de 26%, à une température ambiante, environ 20°C. Ce mode de réalisation permet de compenser efficacement la sensibilité thermique du barreau. En outre, l'utilisation d'une couche de compensation thermique s'étendant entre les première et deuxième couches de silicium permet de limiter l'épaisseur de la couche externe ce qui présente des gains en temps de fabrication et en qualité de la couche externe.

Selon un mode de réalisation, l'oscillateur mécanique est un ressort spiral destiné à équiper le balancier d'un ensemble d'horlogerie mécanique et formé d'un barreau en spirale. L'invention est particulièrement adaptée aux ressorts spiraux utilisés pour la réalisation des montres de précision. L'invention est également adaptée à la réalisation d'autres oscillateurs ou résonateurs mécaniques, par exemple de type diapason.

Selon un deuxième aspect, l'invention concerne un procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique précédemment décrit.

Selon un mode de réalisation, le procédé comporte les étapes suivantes : déposer une couche de compensation thermique sur une couche de silicium d'une première galette de silicium du type silicium sur isolant, graver le motif de l'oscillateur mécanique sur la couche de compensation thermique et sur la couche de silicium de la première galette de silicium sur isolant, sceller une deuxième galette de silicium du type silicium sur isolant sur la première galette de silicium avec une rotation de 45° par rapport à la première galette de silicium de sorte qu'une couche de silicium de la deuxième galette de silicium soit en contact avec la couche de compensation thermique, supprimer un substrat et une couche d'isolant de la première galette de silicium sur

isolant, graver la couche de silicium de la deuxième galette de silicium en utilisant la première couche de silicium comme masque, et supprimer un substrat et une couche d'isolant de la deuxième galette de silicium sur isolant, la première et la deuxième galette de silicium de type silicium sur isolant étant constituées d'un substrat surmonté
5 d'une couche d'isolant puis d'une couche de silicium monocristallin.

Au sens de l'invention, on entend par « déposer une couche de matériau », les procédés consistants à ajouter de la matière par dépôt, ajouter de la matière par croissance et transformation d'une couche existante ou reporter une couche annexe par
10 scellement de la couche annexe.

Selon un mode de réalisation, le procédé comporte les étapes suivantes : déposer une première partie d'une couche de compensation thermique sur une couche de silicium d'une première galette de silicium du type silicium sur isolant, déposer une
15 deuxième partie de la couche de compensation thermique sur une couche de silicium d'une deuxième galette de silicium du type silicium sur isolant, graver le motif de l'oscillateur mécanique sur la première partie de la couche de compensation thermique et sur la couche de silicium de la première galette de silicium sur isolant, graver le motif de l'oscillateur mécanique sur la deuxième partie de la couche de compensation
20 thermique et sur la couche de silicium de la deuxième galette de silicium sur isolant, sceller la deuxième galette de silicium sur la première galette de silicium avec une rotation de 45° par rapport à la première galette de silicium de sorte que les deux parties de la couche de compensation thermique soient en contact, supprimer un substrat et une
25 couche d'isolant de la deuxième galette de silicium sur isolant, et supprimer un substrat et une couche d'isolant de la première galette de silicium sur isolant, la première et la deuxième galette de silicium de type silicium sur isolant étant constituées d'un substrat surmonté d'une couche d'isolant puis d'une couche de silicium monocristallin.

Selon un mode de réalisation, le procédé comporte les étapes suivantes : graver le
30 motif de l'oscillateur mécanique sur une première couche de silicium, une deuxième couche d'isolant et une deuxième couche de silicium d'une galette de silicium du type double silicium sur isolant, et supprimer un substrat et une première couche d'isolant de la galette de silicium, la première galette de silicium de type double silicium sur isolant

étant constituée d'un substrat surmonté d'une première couche d'isolant, d'une première couche de silicium monocristallin, d'une deuxième couche d'isolant puis d'une deuxième couche de silicium monocristallin, la première et la deuxième couche de silicium de la galette de silicium de type double silicium sur isolant comportant des réseaux cristallins dont les directions sont décalées d'un angle de 45°.

Selon un mode de réalisation, le procédé comporte les étapes suivantes : graver le motif de l'oscillateur mécanique sur une deuxième couche de silicium et deuxième couche d'isolant d'une première galette de silicium du type double silicium sur isolant, sceller une deuxième galette de silicium sur la deuxième couche de silicium de la première galette de silicium, supprimer un substrat et une première couche d'isolant de la première galette de silicium, graver le motif de l'oscillateur mécanique sur une première couche de silicium de la première galette de silicium, et supprimer la deuxième galette de silicium, la première galette de silicium de type double silicium sur isolant étant constituée d'un substrat surmonté d'une première couche d'isolant, d'une première couche de silicium monocristallin, d'une deuxième couche d'isolant puis d'une deuxième couche de silicium monocristallin, la première et la deuxième couche de silicium de la galette de silicium de type double silicium sur isolant comportant des réseaux cristallins dont les directions sont décalées d'un angle de 45°, la deuxième galette de silicium étant constituée d'une seule couche de silicium surmontée ou non d'une couche d'isolant de compensation thermique.

Selon un mode de réalisation, le procédé comporte les étapes suivantes : déposer une couche de compensation thermique sur une couche de silicium d'une première galette de silicium du type silicium sur isolant, graver le motif de l'oscillateur mécanique sur la couche de compensation thermique et sur la couche de silicium de la première galette de silicium, sceller une deuxième galette de silicium sur la première galette de silicium avec une rotation de 45° par rapport à la première galette de silicium de sorte que la deuxième galette de silicium soit en contact avec la couche de compensation thermique, amincir la deuxième galette de silicium, graver le motif de l'oscillateur mécanique sur la deuxième galette de silicium, et supprimer un substrat et une couche d'isolant de la première galette de silicium, la première galette de silicium de type silicium sur isolant étant constituée d'un substrat surmonté d'une couche

d'isolant puis d'une couche de silicium monocristallin, la deuxième galette de silicium étant constituée d'une seule couche de silicium surmontée ou non d'une couche d'isolant de compensation thermique.

5 Selon un mode de réalisation, le procédé comporte les étapes suivantes : amincir un substrat d'une galette de silicium du type silicium sur isolant, graver le motif de l'oscillateur mécanique sur une couche de silicium de la galette de silicium, déposer une couche de structuration sur le substrat de la galette de silicium, graver le motif de l'oscillateur mécanique sur un substrat et une couche d'isolant de la galette de silicium
10 en utilisant la première couche de silicium comme masque, et supprimer la couche de structuration du substrat de la galette de silicium, la galette de silicium de type silicium sur isolant étant constituée d'un substrat en silicium surmonté d'une couche d'isolant puis d'une couche de silicium monocristallin, la première couche de silicium et le substrat en silicium de la galette de silicium comportant des réseaux cristallins dont les
15 directions sont décalées d'un angle de 45°.

 Selon un mode de réalisation, le procédé comporte une étape supplémentaire d'oxydation du barreau.

20 Selon un mode de réalisation, au moins une galette de silicium est du type triple silicium sur isolant constituée d'un substrat surmonté d'une première couche d'isolant, d'une première couche de silicium monocristallin, d'une deuxième couche d'isolant, d'une deuxième couche de silicium monocristallin, d'une troisième couche d'isolant puis d'une troisième couche de silicium monocristallin, la première et la deuxième
25 couche de silicium de la galette de silicium de type double silicium sur isolant comportant des réseaux cristallins dont les directions sont décalées d'un angle de 45°.

DESCRIPTION SOMMAIRE DES FIGURES

La manière de réaliser l'invention ainsi que les avantages qui en découlent, ressortiront bien du mode de réalisation qui suit, donné à titre indicatif mais non
5 limitatif, à l'appui des figures annexées dans lesquelles les figures 1 à 12 représentent :

- Figure 1 : une vue en coupe d'un barreau d'un oscillateur mécanique selon un premier design de l'invention ;
- Figure 2 : une représentation schématique des différentes directions des axes du réseau cristallin sur un wafer de silicium de type <100> ;
- 10 - Figure 3 : une représentation des caractéristiques mécaniques d'une des deux couches de silicium du barreau de la Figure 1 en fonction de la direction dans le plan de l'axe du réseau cristallin;
- Figure 4 : une vue en coupe d'un barreau d'un oscillateur mécanique selon un deuxième design de l'invention ;
- 15 - Figure 5 : une vue en coupe d'un barreau d'un oscillateur mécanique selon un troisième design de l'invention ;
- Figure 6 : une vue en coupe d'un barreau d'un oscillateur mécanique selon un quatrième design de l'invention ;
- Figure 7 : une représentation schématique du procédé de réalisation du barreau
20 de la Figure 1 selon un premier mode de réalisation ;
- Figure 8 : une représentation schématique du procédé de réalisation du barreau de la Figure 1 selon un deuxième mode de réalisation ;
- Figure 9 : une représentation schématique du procédé de réalisation du barreau de la Figure 1 selon un troisième mode de réalisation ;
- 25 - Figure 10 : une représentation schématique du procédé de réalisation du barreau de la Figure 1 selon un quatrième mode de réalisation ;
- Figure 11 : une représentation schématique du procédé de réalisation du barreau de la Figure 1 selon un cinquième mode de réalisation ; et
- Figure 12 : une représentation schématique du procédé de réalisation du
30 barreau de la Figure 1 selon un sixième mode de réalisation.

DESCRIPTION DETAILLÉE DE L'INVENTION

La Figure 1 illustre un barreau 11 d'un oscillateur mécanique, par exemple sous la forme d'un segment droit, d'un hélicoïde ou d'une spirale, comportant un empilement de trois couches : une première couche de silicium Cs1 monocristallin directement au contact d'une couche de compensation thermique Co1 directement au contact d'une deuxième couche de silicium Cs2 monocristallin. La première couche de silicium Cs1 s'étend sur une hauteur hs_1 et sur toute la largeur L du barreau 11. La deuxième couche de silicium Cs2 s'étend sur une hauteur hs_2 sensiblement égale à la hauteur hs_1 et sur toute la largeur L du barreau 11. La couche de compensation thermique Co1 s'étend sur une hauteur ho_1 très inférieure aux deux hauteurs hs_1 , hs_2 et sur toute la largeur L du barreau 11.

Les deux couches de silicium Cs1, Cs2 comportent deux réseaux cristallins identiques. Chaque réseau cristallin de chaque couche de silicium Cs1, Cs2 comporte une direction prédéterminée Ds_1 , Ds_2 . On entend par « direction » des couches de silicium, la direction d'un réseau cristallin selon laquelle le réseau cristallin présente un maximum du module d'Young dans le plan de la couche de silicium correspondante Cs1, Cs2. Les hachures des Figures 1, 4, 5 et 6 permettent de visualiser de manière schématique les décalages entre les directions Ds_1 , Ds_2 et Ds_3 . Cependant, les décalages entre les directions Ds_1 , Ds_2 et Ds_3 sont effectués dans le plan des couches de silicium Cs1, Cs2 et Cs3 et ne sont donc pas visible de la même manière sur une vue en coupe réelle du barreau 11. On entend par « un réseau cristallin s'étend dans une direction » que le réseau cristallin comporte une structure cristalline dont le maximum du module d'Young est atteint dans la direction prédéterminée.

La Figure 2 illustre un réseau monocristallin du type $\langle 100 \rangle$ de la première couche de silicium Cs1 modélisé suivant trois ressorts linéaires. Pour un réseau cristallin du type $\langle 100 \rangle$, la résistance mécanique de la première couche de silicium Cs1 dans la direction cristalline $[-110]$ de l'axe x et dans la direction cristalline $[-1-10]$ de l'axe y est plus importante que la résistance mécanique dans les directions cristallines $[100]$ de l'axe x_1 et $[010]$ de l'axe y_1 . La Figure 3 illustre les caractéristiques mécaniques d'une galette de type $\langle 100 \rangle$ en fonction de la direction angulaire d'un effort F repéré dans le

plan du réseau cristallin du type $\langle 100 \rangle$ à température constante. E représente la variation du module d'Young. Cette grandeur mécanique présente des maxima locaux dans les directions $\langle 110 \rangle$ et $\langle \bar{1}10 \rangle$ et des minima locaux dans les directions $\langle 100 \rangle$ et $\langle 010 \rangle$. On peut ainsi en déduire que la raideur du réseau cristallin du type $\langle 100 \rangle$ de la première couche de silicium Cs1 est différente entre les directions x [-110] et y1 [010]. Cette raideur est identique entre les directions x [-110] et y [-1-10].

Compte tenu de l'épaisseur de la couche de compensation thermique Co1, les propriétés mécaniques du barreau 11 dépendent en grande partie des propriétés mécaniques des deux couches de silicium Cs1, Cs2. Si les deux couches de silicium Cs1, Cs2 présentent la même orientation cristalline et la même hauteur de sorte que $hs1=hs2$; la résistance $F_{\text{tot X}}$ du barreau 11 suivant la direction x [-110] est égale à la somme des résistances F1, F2 des deux couches de silicium Cs1, Cs2. Le module d'Young E_{-110} suivant la direction x [-110] des deux couches de silicium Cs1, Cs2 étant identique, les résistances F1 et F2 sont également identiques de sorte que :

$$F_1 = F_2 = \frac{hs1 \times L \times E_{-110}}{\varepsilon} ;$$

avec ε représentant le coefficient de déformation.

La résistance $F_{\text{tot X}}$ du barreau 11 suivant la direction x [-110] est donc égale à :

$$F_{\text{tot X}} = F_1 + F_2 = \frac{2 \times hs1 \times L \times E_{-110}}{\varepsilon} .$$

Cette résistance $F_{\text{tot X}}$ suivant la direction x [-110] est identique suivant la direction Y [-1-10] dans le cas d'un spiral mono-âme.

Cependant, la résistance $F_{\text{tot y1}}$ du barreau 11 suivant la direction y1 [010] est égale à :

$$F_{\text{tot y1}} = F_1 + F_2 = \frac{2 \times hs1 \times L \times E_{010}}{\varepsilon} .$$

Or, la Figure 3 révèle que le module d'Young E_{010} des couches de silicium Cs1, Cs2 suivant la direction y1 [010] est inférieur au module d'Young E_{-110} des couches de silicium Cs1, Cs2 suivant la direction x [-110] ce qui induit une différence des résistances entre les directions x [-110] et y1 [010]. Ainsi, la résistance $F_{\text{tot X}}$ du barreau 11 suivant la direction x [-110] est supérieure à la résistance $F_{\text{tot y1}}$ du barreau 11 suivant la direction y1 [010]. Le barreau 11 présente ainsi une faiblesse de sa résistance dans la direction y1 [010].

L'invention propose de compenser cette différence de résistance par un décalage des directions Ds1, Ds2 des couches de silicium Cs1 et Cs2 d'un angle de 45° dans le plan des couches de silicium Cs1, Cs2. Ainsi, le module d'Young dans une direction donnée est différent entre les deux couches Cs1 et Cs2. Par exemple, suivant la direction y1 [010], le module d'Young E_{-110} de la première couche de silicium Cs1 diffère du module d'Young E_{010} de la deuxième couche de silicium Cs2. La résistance $F_{\text{tot}x}$ du barreau 11 suivant la direction x [-110] est donc égale à :

$$F_{\text{tot}x} = F_1 + F_2 = \frac{hs1}{\varepsilon} \times L \times (E_{-110} + E_{010}) .$$

La résistance $F_{\text{tot}y1}$ du barreau 11 suivant la direction y1 [010] est égale à :

$$F_{\text{tot}y1} = F_1 + F_2 = \frac{hs1}{\varepsilon} \times L \times (E_{010} + E_{1-10}) .$$

Etant donné que E_{1-10} est égal à E_{-110} , les résistances sont identiques dans les deux directions x [-110] et y1 [010]. La structure du barreau 11 de la Figure 1 permet ainsi d'obtenir des caractéristiques mécaniques identiques dans toutes les directions x, y et y1 du réseau cristallin.

15

La couche de compensation thermique Co1 est constituée d'un matériau présentant un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium de sorte que la variation de la résistance mécanique des couches de silicium Cs1, Cs2 en fonction de la température soit, au moins partiellement, compensée par la couche de compensation thermique Co1. De préférence, la couche de compensation thermique Co1 est de l'oxyde de silicium. Le coefficient thermique du module d'Young pour le silicium est de $-64.10^{-6}K^{-1}$ et le coefficient thermique du module d'Young pour l'oxyde de silicium est de $187,5.10^{-6}K^{-1}$ à une température ambiante, environ 20°C. Ainsi, pour compenser, au moins partiellement, la variation de la résistance mécanique des couches de silicium Cs1, Cs2 en fonction de la température, le rapport volumique entre la couche de compensation thermique Co1 et les couches de silicium Cs1, Cs2 soit au moins de 20 % à une température ambiante d'environ 20°C. Sur la Figure 1, la surface de la section $ho1.L$ est donc au moins égale à 20 % de la surface des sections $L.hs1$ et $L.hs2$.

30

La Figure 4 illustre une variante de l'invention dans laquelle le barreau 11 comporte trois couches de silicium Cs1, Cs2, Cs3 entrecoupées par deux couches de compensation thermique Co1, Co2. La première et la troisième couche de silicium Cs1, Cs3 comportent des réseaux cristallins orientés dans la même direction Ds1, Ds3. La

5 deuxième couche de silicium Cs2 disposée entre la première et la troisième couche de silicium Cs1, Cs3 comporte un réseau cristallin dont la direction Ds2 est décalée d'un angle de 45° avec les directions Ds1, Ds3. Afin d'obtenir des caractéristiques mécaniques identiques dans toutes les directions x, y et y1 du réseau cristallin, la

10 hauteur hs2 de la deuxième couche de silicium Cs2 doit être égale à la somme des hauteurs hs1 et hs3 des deux autres couches de silicium Cs1, Cs3. Afin de compenser, au moins partiellement, la dérive en température, la somme des hauteurs ho1 et ho2 doit être au moins égale, dans le cas de l'oxyde de silicium, à 20 % de la somme des hauteurs hs1, hs2 et hs3.

15 Les Figures 5 et 6 illustrent une variante dans laquelle une couche de compensation thermique est également disposée autour du barreau 11 des Figures 1 et 4. Ce mode de réalisation permet de limiter l'épaisseur de la couche de compensation thermique Co1 disposée entre les couches de silicium Cs1, Cs2. Par exemple, dans le cas de la Figure 5, la surface de la couche de compensation thermique comprend les

20 aires suivantes :

- ho1.L, aire de la couche extérieure Coe au-dessus du barreau 11,
- Lo1.H, aire de la couche extérieure Coe sur la gauche du barreau 11,
- Lo2.H, aire de la couche extérieure Coe sur la droite du barreau 11,
- ho3.L, aire de la couche extérieure Coe au-dessous du barreau 11 et
- 25 - ho2.L, aire de la couche Co1 entre les couches de silicium Cs1, Cs2.

La somme de ces surfaces doit être également égale, dans le cas de l'oxyde de silicium, à au moins 20 % de la somme des surfaces hs1.Ls et hs2.Ls des couches de silicium Cs1, Cs2 afin de compenser la dérive en température. Ainsi, l'épaisseur des couches de compensation thermiques, c'est-à-dire de la couche interne Co1 et de la

30 couche externe Coe, est réduite par rapport au mode de réalisation de la Figure 1. La Figure 6 illustre un mode de réalisation identique dans lequel le barreau comporte trois couches de silicium Cs1, Cs2 et Cs3 tel que décrit avec la Figure 4.

Les Figures 7 à 12 illustrent des procédés de réalisation du barreau 11 de la Figure 1. Le procédé de la Figure 7 utilise deux galettes de silicium du type silicium sur isolant SOI. Chaque galette du type silicium sur isolant SOI comporte un substrat Su1, Su2 surmonté d'une couche d'isolant Ci1, Ci2 puis d'une couche de silicium monocristallin Cs1, Cs2. Le substrat Su1, Su2, peut être réalisé en silicium. Dans une première étape 21, une couche de compensation thermique Co1 est déposée sur la couche de silicium Cs1 de la première galette du type SOI. Dans une deuxième étape 22, un motif de l'oscillateur mécanique est gravé sur la couche de compensation thermique Co1 et sur la couche de silicium Cs1. Dans une troisième étape 23, la couche de silicium Cs2 de la deuxième galette est scellée sur la couche de compensation thermique Co1. La deuxième galette est décalée d'un angle de 45° par rapport à la première galette avant cette étape 23 de scellement de sorte que les directions Ds1, Ds2 des réseaux cristallins soient également décalées d'un angle de 45°. Dans une étape 24, l'assemblage est retourné et le substrat Su1 ainsi que la couche d'isolant Ci1 de la première galette sont retirés. Dans une étape 25, la couche de silicium Cs2 de la deuxième galette est gravée au motif de l'oscillateur mécanique en utilisant la première couche de silicium comme masque de gravure. La gravure peut être effectuée par une technique de gravure ionique réactive profonde (également connu sous l'acronyme DRIE pour « Deep Reactive Ion Etching »). Le substrat Su2 et la couche d'isolant Ci2 de la deuxième galette de silicium sont ensuite retirés dans une étape 26 pour libérer l'oscillateur mécanique.

La Figure 8 illustre un procédé de réalisation utilisant également deux galettes SOI. Dans les étapes 32 et 33, deux parties Cop1, Cop2 de la couche de compensation thermique Co1 sont déposées respectivement sur chaque couche de silicium Cs1, Cs2 des deux galettes SOI. Dans les étapes 34, 35, les motifs de l'oscillateur sont ensuite gravés sur les deux parties Cop1 et Cop2 de la couche de compensation thermique Co1 ainsi que sur les deux couches de silicium Cs1, Cs2 des deux galettes. Dans une étape 36, les deux parties Cop1, Cop2 sont ensuite scellées avec un décalage de 45° entre les galettes de sorte à former la couche complète de compensation thermique Co1. Les étapes 37, 38 consistent à supprimer les deux substrats Su1, Su2 ainsi que les deux couches d'isolant Ci1, Ci2 afin de libérer l'oscillateur mécanique.

La Figure 9 illustre un procédé de réalisation utilisant une seule galette du type double-SOI. Une galette du type double-SOI est constituée d'un substrat Su1 surmonté d'une première couche d'isolant Ci1, d'une première couche de silicium monocristallin Si1, d'une deuxième couche d'isolant Ci2 puis d'une deuxième couche de silicium monocristallin Si2. La deuxième couche d'isolant Ci2 réalise ainsi la fonction de la couche de compensation thermique Co1 du barreau 11. La première couche de silicium Cs1 et la deuxième couche de silicium Cs2 comportent des réseaux cristallins dont les directions sont décalées d'un angle de 45°. Une première étape 41 consiste à graver le motif de l'oscillateur mécanique dans la première couche de silicium Cs1, la deuxième couche d'isolant Ci2 et la deuxième couche de silicium Cs2. Une seconde étape 42 consiste à retirer le substrat Su1 et la première couche d'isolant Ci1 pour libérer l'oscillateur mécanique.

La Figure 10 illustre une variante du procédé de la Figure 9 utilisant une galette du type double-SOI. Une première étape 51 consiste à graver le motif de l'oscillateur mécanique dans la deuxième couche de silicium Cs2 et la deuxième couche d'isolant Ci2. Dans une deuxième étape 52, une galette de silicium Si2 est scellée sur la deuxième couche de silicium Cs2. Cette galette de silicium Si2 est une couche sacrificielle qui sert uniquement de support à la structure et sera supprimée dans une étape ultérieure. Dans une étape 53, l'assemblage est retourné et le substrat Su1 ainsi que la première couche d'isolant Ci1 de la première galette sont retirés. Le motif de l'oscillateur mécanique est gravé sur la première couche de silicium Cs1 dans une étape 54 et, dans une étape 55, la galette de silicium Si2 est retirée pour libérer l'oscillateur mécanique. Cette variante du procédé de la Figure 9 peut être mise en œuvre lorsque le barreau 11 est trop épais et que l'étape 41 de gravure ne permet pas de graver correctement la première couche de silicium Cs1.

La Figure 11 illustre un procédé de réalisation utilisant une galette du type SOI et une galette de silicium Si2. Dans une première étape 61, une couche de compensation thermique Co1 est déposée sur la couche de silicium Cs1 de la première galette du type SOI. Dans une deuxième étape 62, un motif de l'oscillateur mécanique est gravé sur la couche de compensation thermique Co1 et sur la couche de silicium Cs1. La galette de silicium Si2 est ensuite scellée avec un décalage de 45° sur la couche de compensation

thermique Co1 dans une étape 63. L'étape 64 consiste à amincir la galette de silicium Si2 jusqu'à atteindre la hauteur hs_2 souhaitée pour la deuxième couche de silicium Cs2 du barreau 11 de la Figure 1. Dans une étape 65, le motif de l'oscillateur mécanique est gravé sur la deuxième couche de silicium Cs2 formé par la galette de silicium Si2 et, dans une étape 66, le substrat Su1 et la couche d'isolant Ci1 sont retirés pour libérer l'oscillateur mécanique.

La Figure 12 illustre un procédé de réalisation utilisant une seule galette du type SOI dans laquelle le substrat Su1 est réalisé en silicium et forme la deuxième couche de silicium Cs2 de la Figure 1. La couche de compensation thermique Co1 est formée par la couche d'isolant Ci1 préférentiellement réalisée en oxyde de silicium. Une première étape 71 consiste à amincir le substrat Su1 jusqu'à atteindre la hauteur hs_2 souhaitée pour la deuxième couche de silicium Cs2 du barreau 11 de la Figure 1. Dans une étape 72, le motif de l'oscillateur mécanique est gravé sur la couche de silicium Cs1. Une couche de structuration Cst est ensuite déposée sur le substrat aminci Su1 dans une étape 73 afin de rigidifier la structure puis le motif de l'oscillateur mécanique est gravé dans les couches d'isolant Ci1 et de substrat Su1 dans une étape 74. Dans une étape 75, la couche de structuration Cst est retirée pour libérer l'oscillateur mécanique.

En variante, ces procédés peuvent être adaptés pour réaliser une des variantes des Figures 4 à 6. Par exemple, la réalisation d'une couche externe Coe de compensation thermique peut être réalisée dans une chambre d'oxydation du silicium formant ainsi une couche d'oxyde de silicium autour du barreau 11. La réalisation d'une deuxième couche de compensation thermique Co2 et d'une troisième couche de silicium Cs3 peut être réalisée, par exemple, par le scellement d'une troisième galette de type silicium sur isolant et par des étapes supplémentaires de gravure correspondantes.

L'invention permet ainsi d'obtenir un oscillateur mécanique dont la raideur est isotrope dans le plan et indépendante de la température sans augmenter la taille du barreau et sans utiliser une couche de silicium isotrope dans le plan.

REVENDICATIONS

1. Oscillateur mécanique muni d'un barreau (11), ledit barreau (11) comportant :

- 5 - une première couche de silicium (Cs1) comportant un réseau cristallin s'étendant selon une première direction (Ds1) d'un plan, et
- une couche de compensation thermique (Co1) constituée d'un matériau présentant un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium,

10 caractérisé en ce que ledit barreau (11) comporte également une deuxième couche de silicium (Cs2) comportant un réseau cristallin s'étendant selon une deuxième direction (Ds2) du plan,

- la première (Ds1) et la deuxième (Ds2) direction étant décalées d'un angle de 45° dans le plan des couches, et
- la couche de compensation thermique (Co1) s'étendant entre les première et 15 deuxième couches de silicium (Cs1, Cs2).

2. Oscillateur mécanique selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit barreau (11) comporte :

- 20 - une troisième couche de silicium (Cs3) comportant un réseau cristallin s'étendant selon une troisième direction (Ds3) parallèle à la direction de la première couche de silicium (Ds1), et
- une deuxième couche de compensation thermique (Co2) constituée d'un matériau présentant un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium,
- 25 - chaque couche de compensation thermique (Co1, Co2) étant disposée entre deux couches de silicium (Cs1, Cs2, Cs3) superposées,
- la direction de la deuxième couche de silicium (Cs2), disposée entre les deux autres couches de silicium (Cs1, Cs3), étant décalée d'un angle de 45° avec la direction des deux autres couches de silicium (Cs1, Cs3).

30

3. Oscillateur mécanique selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que ledit barreau (11) comporte une couche externe (Coe) de compensation thermique constituée d'un matériau présentant un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium.

5

4. Oscillateur mécanique selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que la couche de compensation thermique (Co1, Co2, Coe) dont le matériau présente un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium est réalisée en oxyde de silicium (SiO₂).

10

5. Oscillateur mécanique selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le rapport volumique entre le matériau présentant un coefficient thermique du module d'Young de signe opposé à celui du silicium et les couches de silicium (Cs1, Cs2, Cs3) est compris entre 20 % et 30 %, préférentiellement voisin de 26 %, à une température ambiante, environ 20°C.

15

6. Oscillateur mécanique selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que l'oscillateur mécanique est un ressort spiral destiné à équiper le balancier d'un ensemble d'horlogerie mécanique et formé d'un barreau (11) en spirale.

20

7. Procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'il comporte:

- la gravure (22) d'un motif de l'oscillateur mécanique sur la première couche de silicium (Cs1), sur la couche de compensation thermique (Co1) et sur la deuxième couche de silicium (Cs2).

25

8. Procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :

- déposer (21) une couche de compensation thermique (Co1) sur une première couche de silicium (Cs1) d'une première galette de silicium du type silicium sur isolant (SOI),

30

- graver (22) le motif de l'oscillateur mécanique sur la couche de compensation thermique (Co1) et sur la première couche de silicium (Cs1) de la première galette de silicium sur isolant (SOI),
 - sceller (23) une deuxième galette de silicium du type silicium sur isolant (SOI)
5 sur la première galette de silicium avec une rotation de 45° par rapport à la première galette de silicium de sorte qu'une deuxième couche de silicium (Cs2) de la deuxième galette de silicium soit en contact avec la couche de compensation thermique (Co1),
 - supprimer (24) un substrat (Su1) et une couche d'isolant (Ci1) de la première
10 galette de silicium sur isolant (SOI),
 - graver (25) la deuxième couche de silicium (Cs2) de la deuxième galette de silicium en utilisant la première couche de silicium (Cs1) comme masque, et
 - supprimer (26) un substrat (Su2) et une couche d'isolant (Ci2) de la deuxième galette de silicium sur isolant (SOI),
 - 15 - la première et la deuxième galette de silicium de type silicium sur isolant (SOI) étant constituées d'un substrat (Su1, Su2) surmonté d'une couche d'isolant (Ci1, Ci2) puis d'une desdites première ou deuxième couches de silicium monocristallin (Cs1, Cs2).
- 20 9. Procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :
- déposer (32) une première partie (Cop1) d'une couche de compensation thermique (Co1) sur une première couche de silicium (Cs1) d'une première galette de silicium du type silicium sur isolant (SOI),
 - 25 - déposer (33) une deuxième partie (Cop2) de la couche de compensation thermique (Co1) sur une deuxième couche de silicium (Cs2) d'une deuxième galette de silicium du type silicium sur isolant (SOI),
 - graver (34) le motif de l'oscillateur mécanique sur la première partie (Cop1) de la couche de compensation thermique (Co1) et sur la première couche de silicium (Cs1) de la première galette de silicium sur isolant (SOI),
 - 30 - graver (35) le motif de l'oscillateur mécanique sur la deuxième partie (Cop2) de la couche de compensation thermique (Co1) et sur la deuxième couche de silicium (Cs2) de la deuxième galette de silicium sur isolant (SOI),

- sceller (36) la deuxième galette de silicium sur la première galette de silicium avec une rotation de 45° par rapport à la première galette de silicium de sorte que les deux parties (Cop1, Cop2) de la couche de compensation thermique (Co1) soient en contact,
 - 5 - supprimer (37) un substrat (Su2) et une couche d'isolant (Ci2) de la deuxième galette de silicium sur isolant (SOI), et
 - supprimer (38) un substrat (Su1) et une couche d'isolant (Ci1) de la première galette de silicium sur isolant (SOI),
 - la première et la deuxième galette de silicium de type silicium sur isolant (SOI)
10 étant constituées d'un substrat (Su1, Su2) surmonté d'une couche d'isolant (Ci1, Ci2) puis d'une desdites première ou deuxième couches de silicium (Cs1, Cs2) monocristallin.
10. Procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique selon la revendication 7,
15 caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :
- graver (41) le motif de l'oscillateur mécanique sur une première couche de silicium (Cs1), une deuxième couche d'isolant (Ci2) et une deuxième couche de silicium (Cs2) d'une galette de silicium du type double silicium sur isolant (double-SOI), et
 - 20 - supprimer (42) un substrat (Su1) et une première couche d'isolant (Ci1) de la galette de silicium,
 - la première galette de silicium de type double silicium sur isolant (double-SOI) étant constituée d'un substrat (Su1) surmonté d'une première couche d'isolant (Ci1), d'une première couche de silicium (Cs1) monocristallin, d'une deuxième
25 couche d'isolant (Ci2) puis d'une deuxième couche de silicium (Cs2) monocristallin, la première et la deuxième couche de silicium (Cs1, Cs2) de la galette de silicium de type double silicium sur isolant (double-SOI) comportant des réseaux cristallins dont les directions sont décalées d'un angle de 45° .

11. Procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :

- 5 - graver (51) le motif de l'oscillateur mécanique sur une deuxième couche de silicium (Cs2) et deuxième couche d'isolant (Ci2) d'une première galette de silicium du type double silicium sur isolant (double-SOI),
- sceller (52) une deuxième galette de silicium (Si2) sur la deuxième couche de silicium (Cs2) de la première galette de silicium,
- supprimer (53) un substrat (Su1) et une première couche d'isolant (Ci1) de la première galette de silicium,
- 10 - graver (54) le motif de l'oscillateur mécanique sur une première couche de silicium (Cs1) de la première galette de silicium, et
- supprimer (55) la deuxième galette de silicium (Si2),
- la première galette de silicium de type double silicium sur isolant (double-SOI) étant constituée d'un substrat (Su1) surmonté d'une première couche d'isolant (Ci1), d'une première couche de silicium (Cs1) monocristallin, d'une deuxième
- 15 couche d'isolant (Ci2) puis d'une deuxième couche de silicium (Cs2) monocristallin, la première et la deuxième couche de silicium (Cs1, Cs2) de la galette de silicium de type double silicium sur isolant (double-SOI) comportant des réseaux cristallins dont les directions sont décalées d'un angle de 45°,
- 20 - la deuxième galette de silicium (Si2) étant constituée d'une seule couche de silicium surmontée ou non d'une couche d'isolant.

12. Procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :

- 25 - déposer (61) une couche de compensation thermique (Co1) sur une couche de silicium (Cs1) d'une première galette de silicium du type silicium sur isolant (SOI),
- graver (62) le motif de l'oscillateur mécanique sur la couche de compensation thermique (Co1) et sur la couche de silicium (Cs1) de la première galette de
- 30 silicium,
- sceller (63) une deuxième galette de silicium (Si2) incorporant ladite deuxième couche de silicium (Cs2) sur la première galette de silicium avec une rotation de 45° par rapport à la première galette de silicium de sorte que la deuxième galette

- de silicium (Si2) soit en contact avec la couche de compensation thermique (Co1),
- amincir (64) la deuxième galette de silicium (Si2),
 - graver (65) le motif de l'oscillateur mécanique sur la deuxième galette de silicium (Si2), et
 - supprimer (66) un substrat (Su1) et une couche d'isolant (Ci1) de la première galette de silicium,
 - la première galette de silicium de type silicium sur isolant (SOI) étant constituée d'un substrat (Su1) surmonté d'une couche d'isolant (Ci1) puis d'une couche de silicium (Cs1) monocristallin,
 - la deuxième galette de silicium (Si2) étant constituée d'une seule couche de silicium surmontée ou non d'une couche d'isolant.
13. Procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :
- amincir (71) un substrat (Su1) formant ladite deuxième couche de silicium (Cs2) d'une galette de silicium du type silicium sur isolant (SOI),
 - graver (72) le motif de l'oscillateur mécanique sur une couche de silicium (Cs1) de la galette de silicium,
 - déposer (73) une couche de structuration (Cst) sur le substrat (Su1) de la galette de silicium,
 - graver (74) le motif de l'oscillateur mécanique sur un substrat (Su1) et une couche d'isolant (Ci1) de la galette de silicium en utilisant la première couche de silicium comme masque, et
 - supprimer (75) la couche de structuration (Cst) du substrat (Su1) de la galette de silicium,
 - la galette de silicium de type silicium sur isolant (SOI) étant constituée d'un substrat (Su1) en silicium surmonté d'une couche d'isolant (Ci1) puis d'une couche de silicium (Cs1) monocristallin, la première couche de silicium (Cs1) et le substrat (Su1) en silicium de la galette de silicium du type silicium sur isolant (SOI) comportant des réseaux cristallins dont les directions sont décalées d'un angle de 45°.

14. Procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique selon l'une des revendications 8 à 13, caractérisé en ce qu'il comporte une étape supplémentaire d'oxydation du barreau.
15. Procédé de réalisation d'un oscillateur mécanique selon l'une des revendications 8 à 14, caractérisé en ce qu'il comporte une étape supplémentaire consistant à apposer une deuxième couche de compensation thermique (Co2) et une troisième couche de silicium (Cs3).

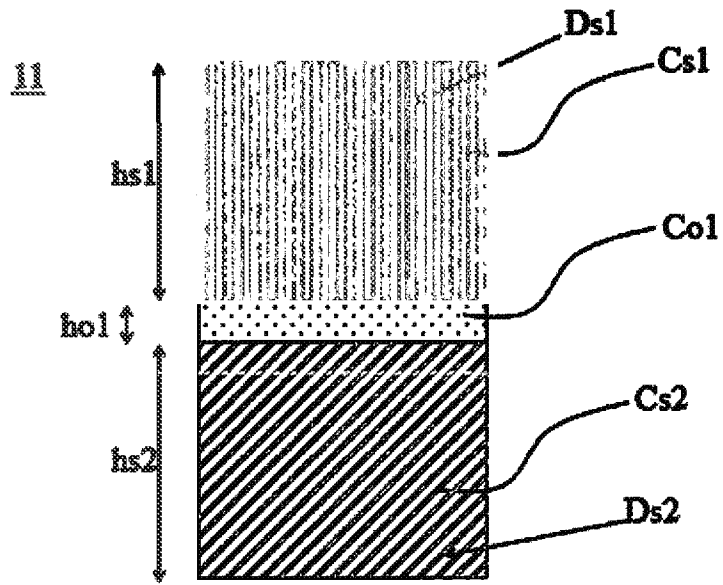


Fig. 1

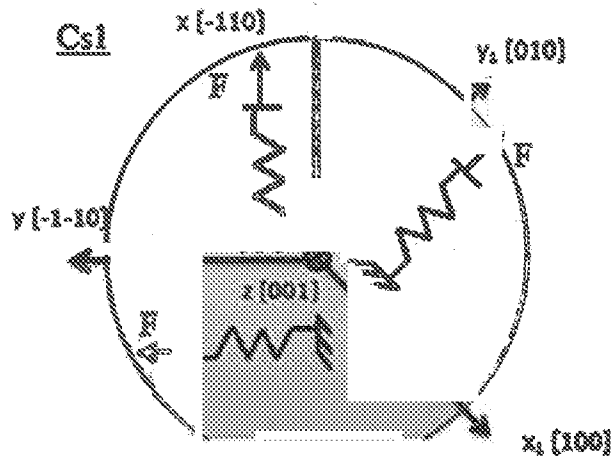


Fig. 2

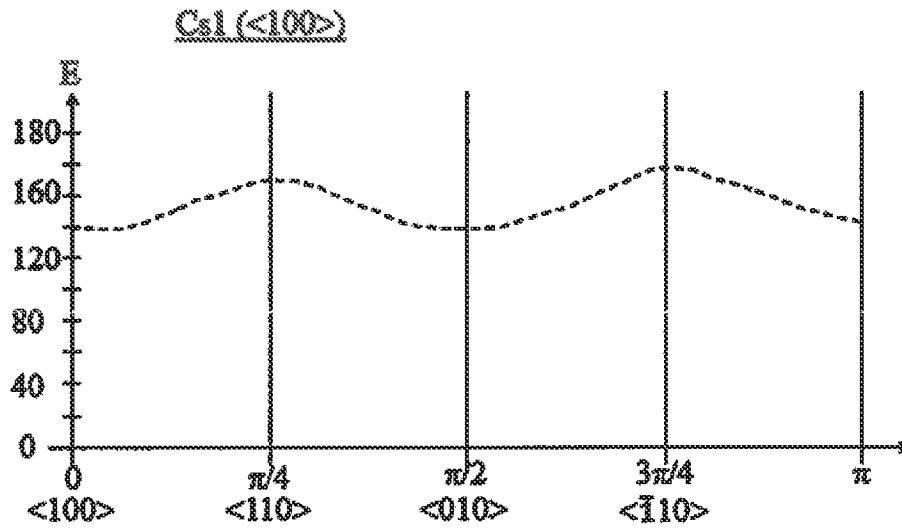


Fig. 3

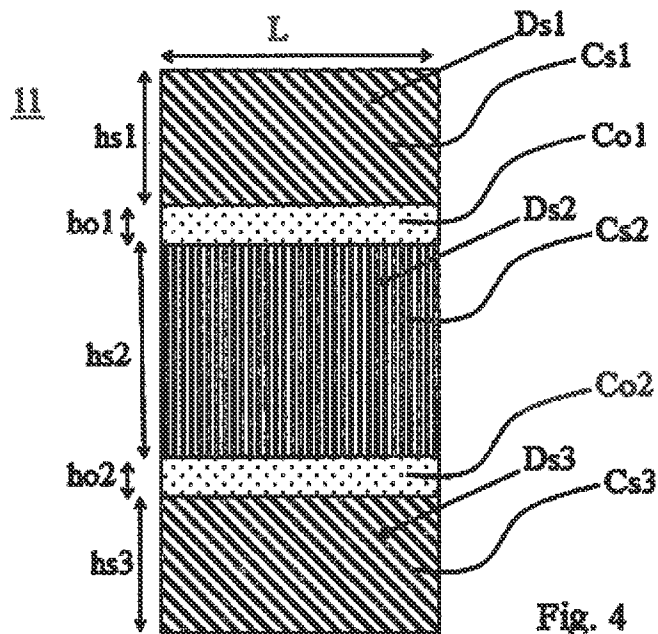


Fig. 4

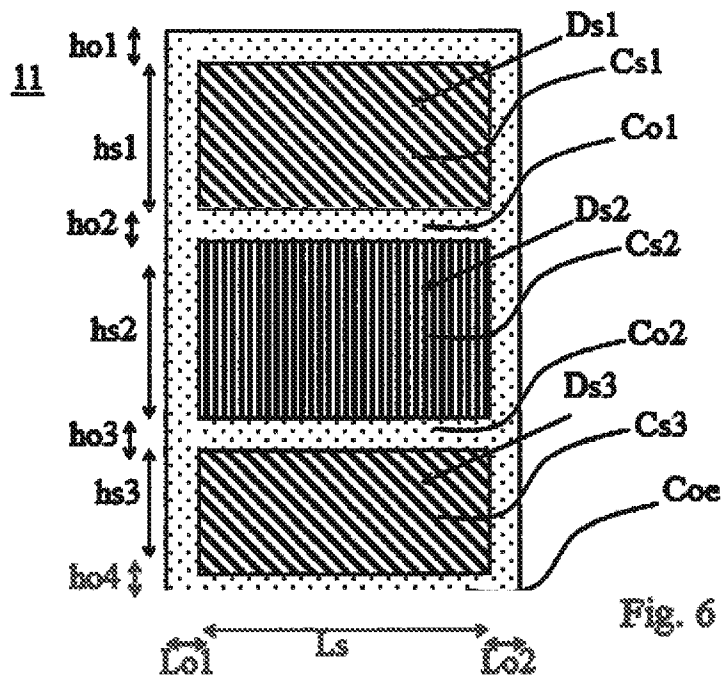
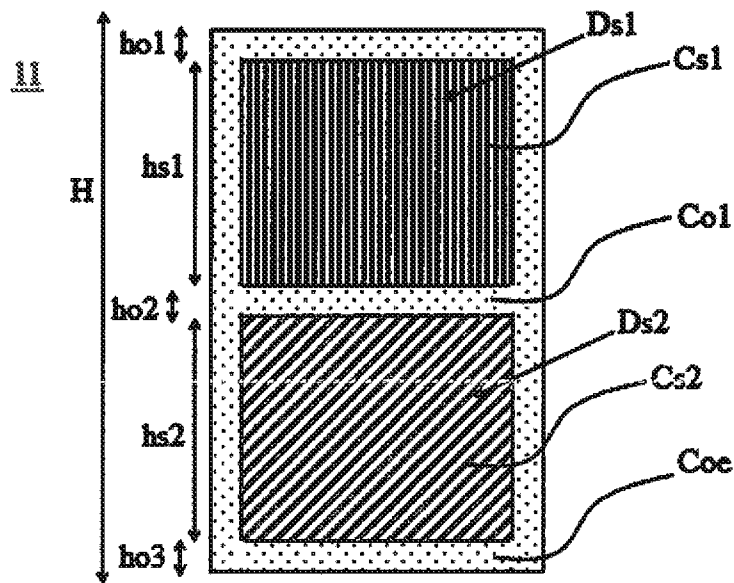


Fig. 6

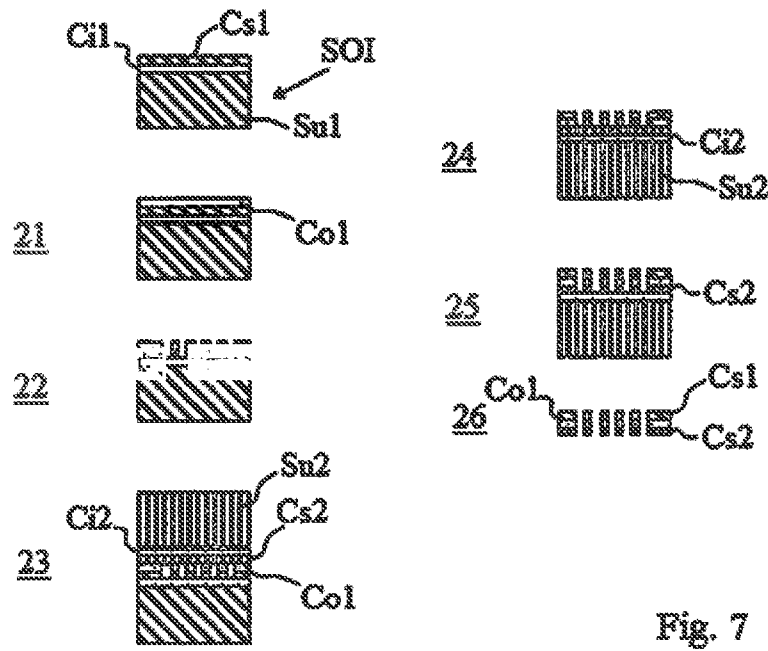


Fig. 7

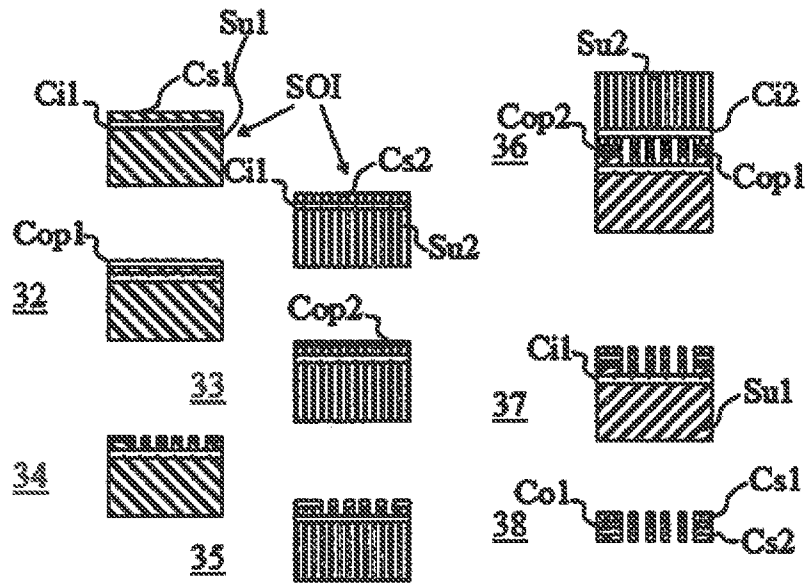


Fig. 8

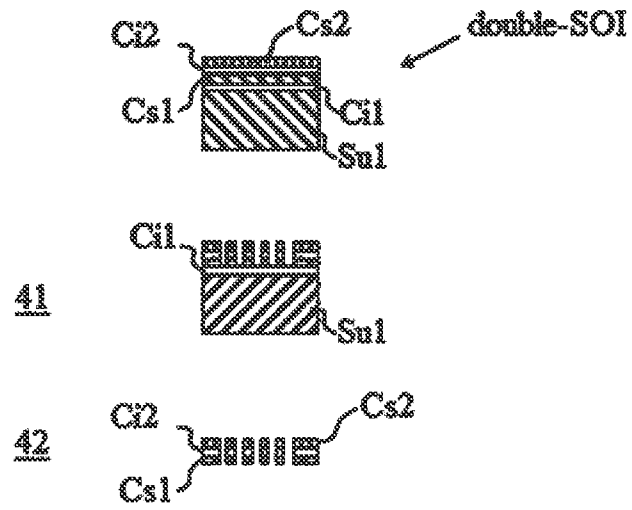


Fig. 9

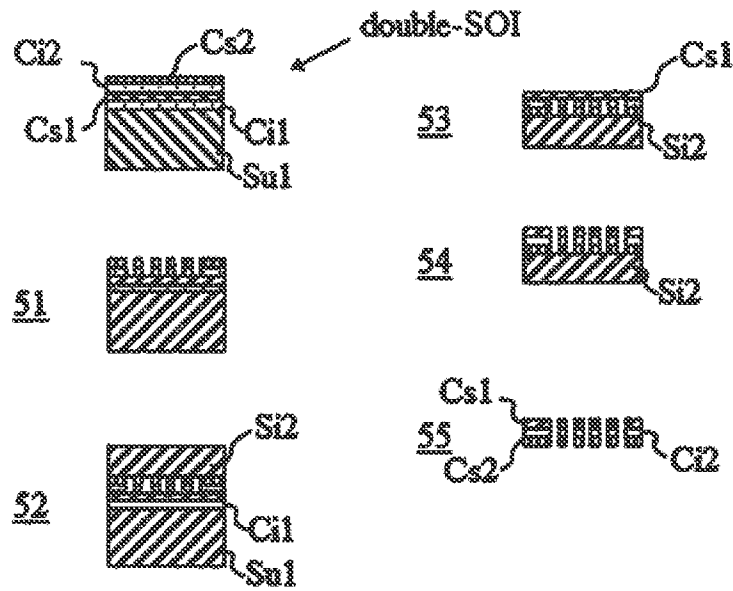


Fig. 10

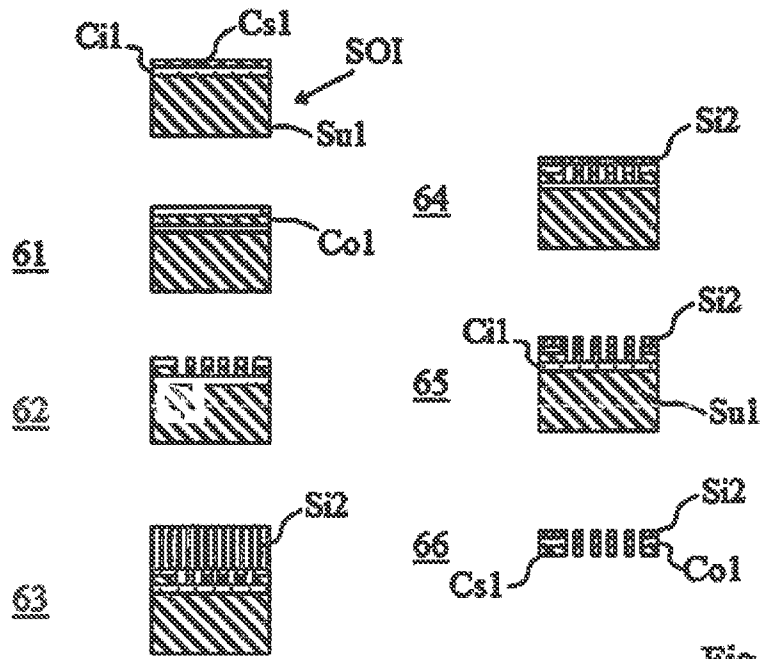


Fig. 11

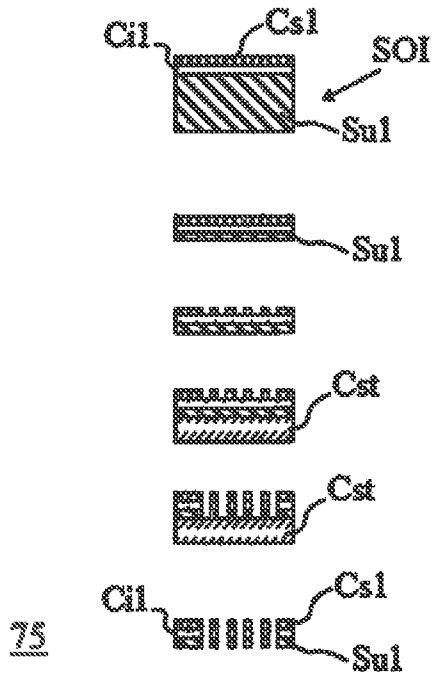


Fig. 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2016/050333

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G04B17/06 G04B17/22 B81B3/00
ADD.
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G04B B81B
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CH 708 067 B1 (RICHEMONT INT SA [CH]) 28 November 2014 (2014-11-28) figure 3 paragraph [0027] paragraph [0033]	1-15
A	WO 2015/011637 A2 (DAMASKO GMBH [DE]) 29 January 2015 (2015-01-29) figure 3 pages 6,7, last paragraph - paragraph 2 page 19, paragraph 3; figure 5	1-15
A	EP 1 791 039 A1 (SWATCH GROUP RES & DEV LTD [CH]) 30 May 2007 (2007-05-30) paragraph [0022]; figure 4	1-15
A	CH 701 605 A2 (ETA SA MFT HORLOGERE SUISSE [CH]) 15 February 2011 (2011-02-15) paragraphs [0010] - [0014]	1,7

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 1 June 2016	Date of mailing of the international search report 07/06/2016
---	---

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Meister, Martin
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No PCT/FR2016/050333

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
CH 708067	B1	28-11-2014	NONE

WO 2015011637	A2	29-01-2015	DE 102013114211 B3 09-10-2014
			EP 3025201 A2 01-06-2016
			WO 2015011637 A2 29-01-2015

EP 1791039	A1	30-05-2007	CN 101361027 A 04-02-2009
			EP 1791039 A1 30-05-2007
			EP 1958031 A2 20-08-2008
			HK 1128777 A1 15-03-2013
			JP 5061117 B2 31-10-2012
			JP 2009517637 A 30-04-2009
			KR 20080072002 A 05-08-2008
			US 2009016173 A1 15-01-2009
			WO 2007059876 A2 31-05-2007

CH 701605	A2	15-02-2011	NONE

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2016/050333

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G04B17/06 G04B17/22 B81B3/00 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE		
Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G04B B81B		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data, INSPEC		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	CH 708 067 B1 (RICHEMONT INT SA [CH]) 28 novembre 2014 (2014-11-28) figure 3 alinéa [0027] alinéa [0033]	1-15
A	WO 2015/011637 A2 (DAMASKO GMBH [DE]) 29 janvier 2015 (2015-01-29) figure 3 pages 6,7, dernier alinéa - alinéa 2 page 19, alinéa 3; figure 5	1-15
A	EP 1 791 039 A1 (SWATCH GROUP RES & DEV LTD [CH]) 30 mai 2007 (2007-05-30) alinéa [0022]; figure 4	1-15
A	CH 701 605 A2 (ETA SA MFT HORLOGERE SUISSE [CH]) 15 février 2011 (2011-02-15) alinéas [0010] - [0014]	1,7
<input type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée		"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 1 juin 2016		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 07/06/2016
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Meister, Martin

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2016/050333

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
CH 708067	B1	28-11-2014	AUCUN	

WO 2015011637	A2	29-01-2015	DE 102013114211 B3	09-10-2014
			EP 3025201 A2	01-06-2016
			WO 2015011637 A2	29-01-2015

EP 1791039	A1	30-05-2007	CN 101361027 A	04-02-2009
			EP 1791039 A1	30-05-2007
			EP 1958031 A2	20-08-2008
			HK 1128777 A1	15-03-2013
			JP 5061117 B2	31-10-2012
			JP 2009517637 A	30-04-2009
			KR 20080072002 A	05-08-2008
			US 2009016173 A1	15-01-2009
			WO 2007059876 A2	31-05-2007

CH 701605	A2	15-02-2011	AUCUN	
