

CONFÉDÉRATION SUISSE  
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH** **702 353 A2**

(51) Int. Cl.: **G04B** 17/04 (2006.01)  
**H03H** 9/15 (2006.01)

**Demande de brevet pour la Suisse et le Liechtenstein**

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(12) **DEMANDE DE BREVET**

(21) Numéro de la demande: 01924/09

(71) Requéérant:  
The Swatch Group Research and Development Ltd.,  
Rue des Sors 3  
2074 Marin (CH)

(22) Date de dépôt: 15.12.2009

(72) Inventeur(s):  
Thierry Hessler, 2024 St-Aubin (CH)  
Thierry Conus, 2543 Lengnau (CH)  
Kaspar Trümpy, 4500 Soleure (CH)

(43) Demande publiée: 15.06.2011

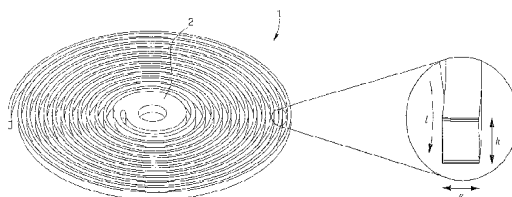
(74) Mandataire:  
ICB Ingénieurs Conseils en Brevets SA,  
Faubourg de l'Hôpital 3  
2001 Neuchâtel (CH)

(54) **Résonateur thermocompensé au moins aux premier et second ordres.**

(57) L'invention se rapporte à un résonateur (1) thermocompensé comportant un corps utilisé en déformation, l'âme du corps comportant un premier matériau. Selon l'invention, le corps comporte au moins un premier et un deuxième revêtements permettant audit résonateur d'avoir des coefficients thermiques aux premier et deuxième ordres sensiblement nuls.

L'invention concerne le domaine des bases de temps et de fréquence.

L'invention se rapporte également à une pièce d'horlogerie comportant au moins un tel résonateur thermocompensé, formant un spiral, un diapason ou un résonateur MEMS.



## Description

### Domaine de l'invention

[0001] L'invention se rapporte à un résonateur thermocompensé du type balancier-spiral, MEMS ou diapason permettant de fabriquer une base de temps ou de fréquence dont les coefficients thermiques sont sensiblement nuls au moins aux premier et deuxième ordres.

### Arrière plan de l'invention

[0002] Le document EP 1 422 436 divulgue un spiral formé en silicium et recouvert de dioxyde de silicium afin de rendre le coefficient thermique sensiblement nul autour des températures de procédure COSC, c'est-à-dire entre +8 et +38 °C. De même, le document WO 2008-043 727 divulgue un résonateur MEMS qui possède des qualités similaires de faible dérive de son module d'Young dans la même plage de température.

[0003] Cependant la dérive de la fréquence même uniquement au deuxième ordre des divulgations ci-dessus peut nécessiter des corrections complexes selon les applications. Par exemple, pour que des montres électroniques puissent être certifiées COSC une correction électronique basée sur une mesure de la température doit être effectuée.

### Résumé de l'invention

[0004] Le but de la présente invention est de pallier tout ou partie les inconvénients cités précédemment en proposant un résonateur compensé thermiquement au moins aux premier et deuxième ordres.

[0005] A cet effet, l'invention se rapporte à un résonateur thermocompensé comportant un corps utilisé en déformation, l'âme du corps comportant un premier matériau caractérisé en ce que le corps comporte au moins un premier et un deuxième revêtements permettant audit résonateur d'avoir des coefficients thermiques aux premier et deuxième ordres sensiblement nuls.

[0006] Avantageusement selon l'invention, le corps du résonateur utilisé en déformation comporte autant de revêtement que d'ordre du coefficient thermique à compenser. Ainsi, suivant les grandeurs et les signes de chaque ordre des matériaux de l'âme et de chaque revêtement, un calcul de chaque épaisseur est effectué afin de compenser chaque ordre.

[0007] Conformément à d'autres caractéristiques avantageuses de l'invention:

- le corps comporte un troisième revêtement permettant audit résonateur d'avoir des coefficients thermiques aux premier, deuxième et troisième ordres sensiblement nuls;
- l'âme du corps comporte des coefficients thermoélastiques des premier et deuxième ordres qui sont négatifs comme du silicium monocristallin;
- le corps comporte une section sensiblement en forme d'un quadrilatère dont les faces sont identiques deux à deux ou dont les faces sont entièrement revêtues;
- le premier revêtement comporte des coefficients thermoélastiques du premier ordre positif et du deuxième ordre négatif comme du dioxyde de silicium;
- le deuxième revêtement comporte un coefficient thermoélastique du deuxième ordre positif et du premier ordre positif comme du dioxyde de germanium ou comporte un coefficient thermoélastique du premier ordre négatif;
- le premier revêtement est interverti avec le deuxième revêtement;
- dépôt desdits revêtements est privilégié sur les faces parallèles par rapport au plan neutre du corps afin de modifier avec le plus d'intensité possible la fréquence dudit résonateur;
- le corps est un barreau enroulé sur lui-même en formant un spiral et est couplé avec un volant d'inertie ou comporte au moins deux barreaux montés symétriquement afin de former un diapason ou est un résonateur MEMS.

[0008] Enfin l'invention se rapporte également à une base de temps ou de fréquence, comme par exemple une pièce d'horlogerie, caractérisée en ce qu'elle comporte au moins un résonateur conforme à l'une des variantes précédentes.

### Description sommaire des dessins

[0009] D'autres particularités et avantages ressortiront clairement de la description qui en est faite ci-après, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux dessins annexés, dans lesquels:

- la fig. 1 est une représentation générale en perspective d'un ressort-spiral;
- la fig. 2 est une section représentative du ressort-spiral de la fig. 1;
- la fig. 3 est une représentation de plusieurs modes de réalisation selon l'invention;
- la fig. 4 est un graphique représentant les modules élastiques de chaque matériau selon un premier mode de réalisation de l'invention;

- la fig. 5 est un graphique représentant les modules élastiques de chaque matériau selon un deuxième mode de réalisation de l'invention;
- la fig. 6 est un graphique représentant l'absence de variation de fréquence d'un résonateur selon l'invention;
- la fig. 7 est un graphique représentant la variation des premier et deuxième ordres du coefficient thermique d'un balancier-spiral de silicium enrobé de dioxyde de silicium;
- la fig. 8 est un graphique représentant la variation des premier et deuxième ordres du coefficient thermique d'un balancier-spiral de silicium enrobé de dioxyde de germanium;
- la fig. 9 est un graphique représentant la variation des premier et deuxième ordres du coefficient thermique d'un balancier-spiral de silicium enrobé de dioxyde de silicium et de dioxyde de germanium.

**Description détaillée des modes de réalisation préférés**

[0010] Comme expliqué ci-dessus, l'invention se rapporte à un résonateur qui peut être du type balancier-spiral, diapason ou plus généralement un résonateur du type MEMS (abréviation provenant des termes anglais «Micro Electro Mechanical System»). Afin d'apporter une explication plus simple de l'invention, seule l'application à un balancier-spiral est présentée ci-dessous. Cependant, d'autres applications de résonateur comme celles ci-dessus seront réalisables pour un homme du métier sans difficultés excessives à partir de l'enseignement ci-dessous.

[0011] De même, l'explication est portée sur une âme du corps, dans notre exemple un spiral, formé à partir de silicium monocristallin. Cependant, le matériau de l'âme n'est pas limité à du silicium monocristallin mais peut s'élargir à différents types de matériaux comme, par exemple, du polysilicium, du verre, du nitrure, du diamant, du quartz monocristallin ou du métal.

[0012] Dans le graphique à la fig. 6, on peut voir la caractérisation de dérive de la fréquence pour des résonateurs actuels en fonction de la température. Une première courbe en trait plein intitulée «Quartz-z-cut» montre la dérive fréquentielle d'un diapason 32 kHz en quartz monocristallin réalisé dans une coupe z légèrement tournée. Une deuxième courbe en traits interrompus courts intitulé «Si-SiO<sub>2</sub>» montre la dérive fréquentielle d'un résonateur MEMS en silicium revêtu de dioxyde de silicium.

[0013] Pour ces deux courbes, on voit que la dérive est non nulle sur une large gamme de températures notamment entre -20 et 80 °C. Cette dérive fréquentielle est principalement liée à la variation du module d'Young en fonction de la température. Cependant, même faible entre 10 et 40 °C, la dérive fréquentielle des deux exemples de fabrication actuelle peut nécessiter une correction extrinsèque au résonateur. C'est le cas par exemple d'une montre électronique qui contient un diapason en quartz corrigé électroniquement sur la base d'une mesure de la température de la montre, afin d'être certifiée COSC.

[0014] Ainsi, avantageusement, le but de l'invention est de proposer un résonateur dont la dérive fréquentielle en fonction de la température est encore minimisée comme montré par la courbe en traits interrompus courts et longs intitulé «composite» dont l'échelle est volontairement gardée identique par rapport aux deux autres courbes afin de montrer l'importante différence de la dérive. Plus précisément, le corps du résonateur, selon l'invention, comporte autant de revêtements que d'ordres du coefficient thermique à compenser.

[0015] Préférentiellement, le corps du résonateur comprend ainsi au moins deux revêtements et éventuellement un troisième si la compensation au deuxième ordre induit toujours une dérive fréquentielle inacceptable. Cependant, à partir du troisième ordre compensé, la dérive fréquentielle devient négligeable pour n'importe quel résonateur. Ainsi, suivant les grandeurs et les signes de chaque ordre des matériaux de l'âme et de chaque revêtement, un calcul de chaque épaisseur est effectué afin de compenser globalement chaque ordre.

[0016] A titre de définition, la variation relative de la fréquence du résonateur suit la relation suivante:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = A + \alpha \cdot (T - T_0) + \beta \cdot (T - T_0)^2 + \gamma \cdot (T - T_0)^3$$

où

-  $\frac{\Delta f}{f_0}$  est la variation relative de fréquence, exprimée en ppm (10<sup>-6</sup>);

- A une constante qui dépend du point de référence, en ppm;
- T<sub>0</sub> la température de référence, en °C;
- # le coefficient thermique du premier ordre, exprimé en ppm. °C<sup>-1</sup>;
- # le coefficient thermique du deuxième ordre, exprimé en ppm. °C<sup>-2</sup>;
- # coefficient thermique du troisième ordre, exprimé en ppm. °C<sup>-3</sup>.

**[0017]** De plus, le coefficient thermoélastique (CTE) représente la variation relative du module d'Young en fonction de la température. Les termes «#» et «#» qui sont utilisés ci-dessous représentent ainsi respectivement les coefficients thermiques du premier et du deuxième ordre c'est-à-dire la variation relative de la fréquence du résonateur en fonction de la température. Les termes «#» et «#» dépendent du coefficient thermoélastique du corps du résonateur et des coefficients de dilatation du corps. De plus, les termes «#» et «#» prennent également en compte les coefficients propres à une éventuelle inertie séparée, telle que, par exemple, le balancier pour un résonateur balancier - spiral. Les oscillations de tout résonateur destiné à une base de temps ou de fréquence devant être entretenu, la dépendance thermique comprend également une contribution éventuelle du système d'entretien. Préférentiellement, le corps du résonateur est une âme 3 recouverte d'au moins deux revêtements 4, 5.

**[0018]** Dans l'exemple illustré aux fig. 1 à 3, on peut voir un spiral 1 venu de forme avec sa virole 2 dont au moins les premier et deuxième ordres du coefficient thermoélastique du corps sont compensés. La fig. 2 propose une coupe du corps du spiral permettant de mieux voir sa section en forme de quadrilatère. Le corps peut ainsi être défini par sa longueur  $h$ , sa hauteur  $h$  et son épaisseur  $e$ . La fig. 3 montre des alternatives possibles A, A', B, C et D sans être exhaustives. Bien évidemment, les revêtements 4 et 5 ne sont pas à l'échelle par rapport aux dimensions de l'âme 3, ceci afin de mieux montrer les localisations de chaque partie 3, 4 et 5.

**[0019]** Dans une première alternative A, une seule face de la section est recouverte successivement par le revêtement 4 puis par le revêtement 5. L'ordre d'empilement entre les revêtements 4 et 5 n'est pas fixé, c'est-à-dire que les revêtements 4 et 5 peuvent être intervertis. De plus, quand ce sont les faces parallèles au plan neutre F du barreau qui sont recouvertes cela modifie avec plus d'intensité la fréquence dudit résonateur que si le dépôt était effectué sur celles perpendiculaires au plan de flexion F. Bien entendu, il peut également être imaginé que chaque revêtement 4, 5 soit présent sur une face différente comme illustré à l'alternative A'.

**[0020]** Dans une deuxième alternative B ou C, la section du corps comporte des faces identiques deux à deux. Ainsi soit deux faces parallèles comportent les deux revêtements 4, 5 empilés sans ordre particulier, c'est-à-dire que les revêtements 4 et 5 peuvent être intervertis, comme dans l'exemple B, soit chacune des faces parallèles possède un des revêtements 4, 5 comme dans l'exemple C. Bien entendu, il peut également être imaginé qu'un revêtement 4 soit présent sur deux faces adjacentes et que les deux autres faces soient recouvertes par un revêtement 5.

**[0021]** Dans une troisième alternative D, la section du barreau comporte des faces qui sont entièrement revêtues successivement par le revêtement 4 puis par le revêtement 5. L'ordre d'empilement entre les revêtements 4 et 5 n'a cependant ici pas non plus d'importance, c'est-à-dire que les revêtements 4 et 5 peuvent être intervertis.

**[0022]** Comme illustré à la fig. 4, on peut voir un graphique représentant la dépendance thermique du module de Young de chaque matériau pour illustrer un mode de réalisation de l'invention qui utilise le silicium, le dioxyde de silicium et le dioxyde de germanium. Ainsi, le module d'Young du silicium diminue en augmentant la température quand les modules d'Young des deux autres matériaux croissent en augmentant la température. De plus, la croissance est plus marquée pour le dioxyde de silicium que pour le dioxyde de germanium entre les deux valeurs de température, c'est-à-dire entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**[0023]** En fait, le coefficient thermoélastique du silicium est négatif au premier et second ordre quand les coefficients thermoélastiques des deux autres matériaux sont positifs au premier ordre. Cependant, le coefficient thermoélastique au deuxième ordre est négatif pour le dioxyde de silicium alors qu'il est positif pour le dioxyde de germanium.

**[0024]** Cependant, cette interprétation de la fig. 4 se focalise sur le coefficient thermoélastique des matériaux. Il est nécessaire de prendre encore en compte les coefficients de dilatations des matériaux et l'effet du système d'entretien des oscillations pour finalement obtenir les coefficients #, # de la modification de la fréquence du résonateur. Pour comprendre cette interprétation finale, ses deux coefficients sont représentés aux fig. 7 et 8.

**[0025]** Ainsi, pour la fig. 7, l'âme 3 comporte des coefficients thermoélastiques des premier et deuxième ordres qui sont négatifs, comme le silicium, et recouvert par un revêtement 4 qui comporte les coefficients thermoélastiques du premier ordre positif et du deuxième ordre négatif, comme le dioxyde de silicium. Sont également pris en compte, les coefficients de dilatation des matériaux, en particulier celui du balancier ( $18\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ ). L'effet du système d'entretien des oscillations est ici négligé. On peut également voir à la fig. 7 que les ordres # (trait continu) et # (traits discontinus) ne sont pas à la même unité. On voit qu'à partir d'une certaine épaisseur de revêtement, le premier ordre # est compensé, c'est-à-dire croise la ligne 0, par contre, le deuxième ordre # ne fait que diminuer par rapport au matériau de l'âme seul. On comprend donc que si le premier ordre # peut être compensé, tel n'est pas le cas du deuxième ordre #.

**[0026]** A la fig. 8, l'âme 3 comporte des coefficients thermoélastiques des premier et deuxième ordres qui sont négatifs, comme le silicium, et recouvert par un revêtement 5 qui comporte des coefficients thermoélastiques des premier et deuxième ordres qui sont positifs, comme le dioxyde de germanium. Comme pour la fig. 7, on peut voir à la fig. 8 que les ordres # (trait continu) et # (traits discontinus) ne sont pas à la même unité. On voit qu'à partir d'une faible épaisseur de revêtement, le deuxième ordre # est compensé, c'est-à-dire croise la ligne 0, par contre, le premier ordre # est compensé à une plus forte épaisseur. Cependant, il est impossible que les deux ordres # et # soient compensés avec une épaisseur d'un seul matériau.

**[0027]** Cela est dû aux différences de grandeurs des coefficients thermoélastiques à chaque ordre de chaque matériau. Ainsi, s'il semble illusoire de trouver un matériau pour le revêtement exactement «inverse» à celui de l'âme, ce qui permettrait de déposer une couche unique de compensation, l'invention propose, pour chaque ordre à compenser, d'ajouter un revêtement. Chaque revêtement n'est alors pas destiné à corriger «directement» un ordre mais permet d'affiner chacune des compensations.

**[0028]** A titre d'exemple, des calculs ont été représentés à la fig. 9. Dans cet exemple, l'âme 3 comporte des coefficients thermoélastiques des premier et deuxième ordres qui sont négatifs, comme le silicium. L'âme 3 est recouverte par un premier revêtement 4 qui comporte des coefficients thermoélastiques du premier ordre positif et du deuxième ordre négatif, comme le dioxyde de silicium. Le premier revêtement 4 est lui-même recouvert par un deuxième revêtement 5 qui comporte un coefficient thermoélastique des premier et deuxième ordres qui sont positifs, comme le dioxyde de germanium.

**[0029]** Comme visible à la fig. 9, on voit qu'il devient possible par calcul d'ajuster chaque épaisseur de revêtement 4, 5 afin que la compensation des ordres # et # convergent sensiblement à la même épaisseur finale, c'est-à-dire que les deux courbes # et # coupent la ligne 0 à la même épaisseur. Dans notre exemple de la fig. 9, l'âme 3, le premier revêtement 4 et le deuxième revêtement 5 comportent ainsi des épaisseurs respectives d'environ 40, 3,5 et 3,6 microns.

**[0030]** Ainsi, suivant l'épaisseur de l'âme 3 voulue ou celle de la section finale voulue, il est possible d'offrir un résonateur dont la compensation thermique est très améliorée par rapport à celles «Quartz-z-cut» ou «Si-SiO<sub>2</sub>» représentées à la fig. 6.

**[0031]** Bien entendu, la présente invention ne se limite pas à l'exemple illustré mais est susceptible de diverses variantes et modifications qui apparaîtront à l'homme de l'art. En particulier, d'autres matériaux pour l'âme 3 ou pour les revêtements 4, 5, etc. sont envisageables en obtenant une compensation thermique améliorée.

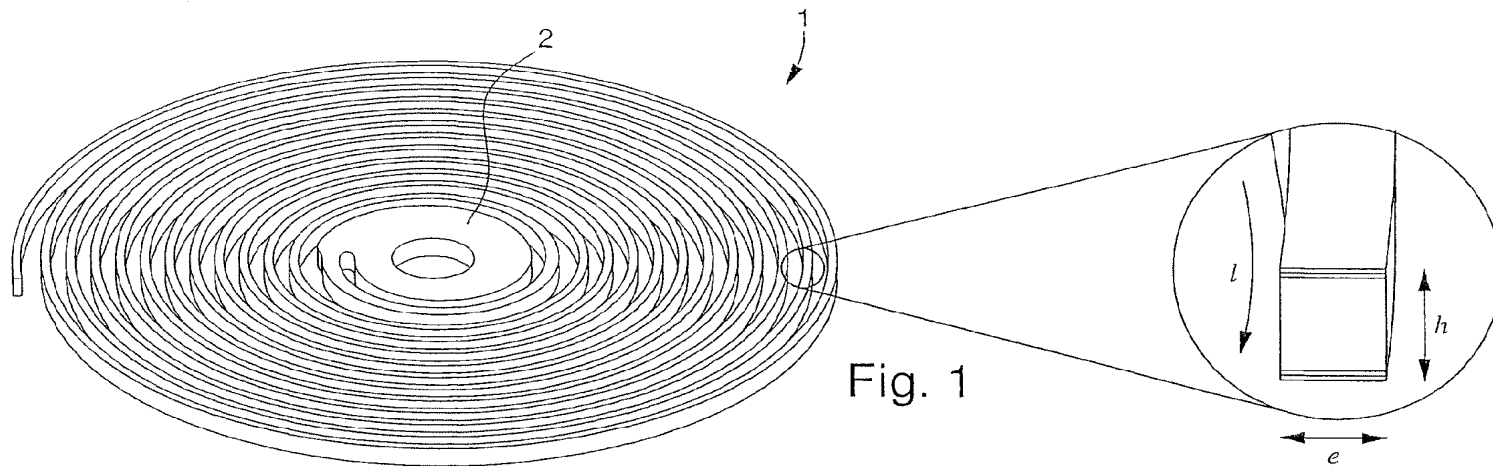
**[0032]** A titre d'exemple, il est fort probable qu'un matériau qui sera appelé X (comme les oxydes de zirconium ou d'hafnium stabilisés), qui comporte des coefficients thermoélastiques du premier ordre négatif (comme c'est le cas de la plupart des matériaux) et du deuxième ordre positif, puisse réaliser la compensation thermique. Cet exemple est illustré à la fig. 5. On comprend donc que, pour ce type de matériau, le premier revêtement # nécessairement une épaisseur supérieure par rapport à celle du mode de réalisation de la fig. 4.

## Revendications

1. Résonateur (1) thermocompensé comportant un corps utilisé en déformation, l'âme (3) du corps comportant un premier matériau caractérisé en ce que le corps comporte au moins un premier et un deuxième revêtements (4, 5) permettant audit résonateur d'avoir des coefficients thermiques aux premier et deuxième ordres (#, #) sensiblement nuls.
2. Résonateur (1) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le corps comporte un troisième revêtement permettant audit résonateur d'avoir des coefficients thermiques aux premier, deuxième et troisième ordres (#, #, #) sensiblement nuls.
3. Résonateur (1) selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que l'âme (3) du corps comporte des coefficients thermoélastiques des premier et deuxième ordres qui sont négatifs.
4. Résonateur (1) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'âme (3) du corps comporte du silicium monocristallin.
5. Résonateur (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le corps comporte une section sensiblement en forme d'un quadrilatère dont les faces sont identiques deux à deux.
6. Résonateur (1) selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le corps comporte une section sensiblement en forme d'un quadrilatère dont les faces sont entièrement revêtues.
7. Résonateur (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le premier revêtement (4) comporte des coefficients thermoélastiques du premier ordre positif et du deuxième ordre négatif.
8. Résonateur (1) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le premier revêtement (4) comporte du dioxyde de silicium.
9. Résonateur (1) selon la revendication 7 ou 8, caractérisé en ce que le deuxième revêtement (5) comporte un coefficient thermoélastique du deuxième ordre positif.
10. Résonateur (1) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le deuxième revêtement (5) comporte un coefficient thermoélastique du premier ordre positif.
11. Résonateur (1) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le deuxième revêtement (5) comporte du dioxyde de germanium.
12. Résonateur (1) selon la revendication 9, caractérisé en ce que le deuxième revêtement (5) comporte un coefficient thermoélastique du premier ordre négatif.

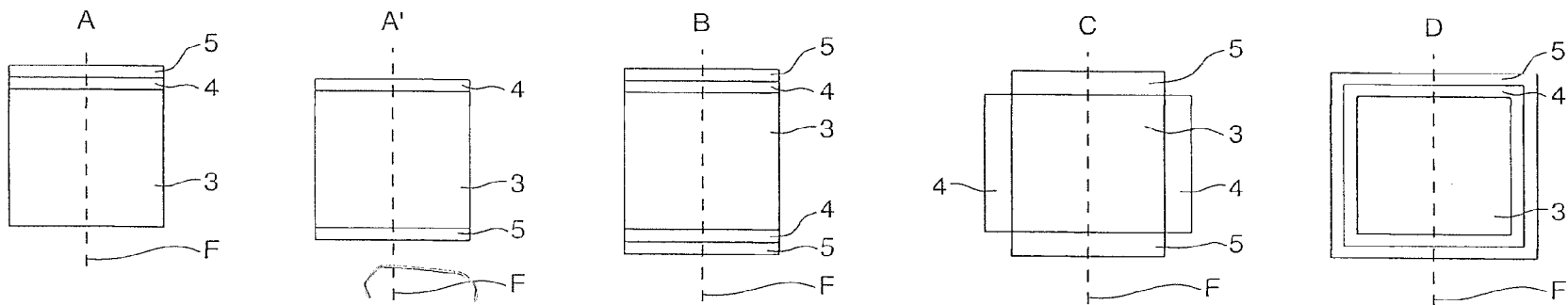
## CH 702 353 A2

13. Résonateur (1) selon l'une des revendications 9 à 12, caractérisé en ce que le premier revêtement (4) est interverti avec le deuxième revêtement (5).
14. Résonateur (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le dépôt desdits revêtements est privilégié sur les faces parallèles par rapport au plan neutre (F) du corps afin de modifier avec le plus d'intensité possible la fréquence dudit résonateur.
15. Résonateur (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le corps est un barreau enroulé sur lui-même en formant un spiral et est couplé avec un volant d'inertie.
16. Résonateur (1) selon l'une des revendications 1 à 14, caractérisé en ce que le corps comporte au moins deux barreaux montés symétriquement afin de former un diapason.
17. Résonateur (1) selon l'une des revendications 1 à 14, caractérisé en ce que le corps est un résonateur MEMS.
18. Pièce d'horlogerie caractérisée en ce qu'elle comporte au moins un résonateur conforme à l'une des revendications précédentes.



7

Fig. 3



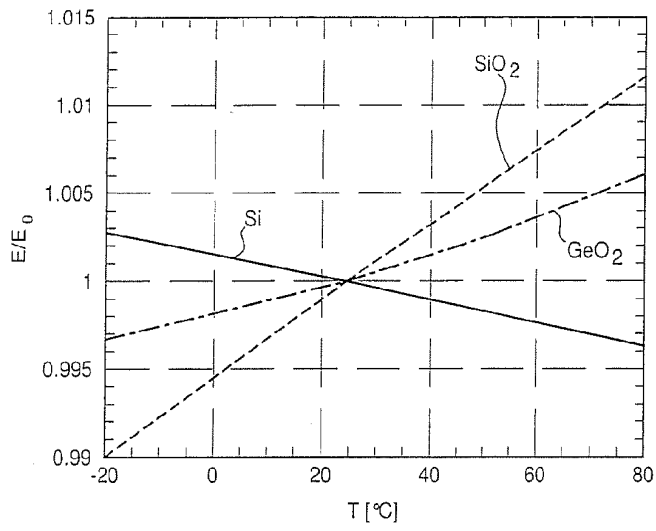


Fig. 4

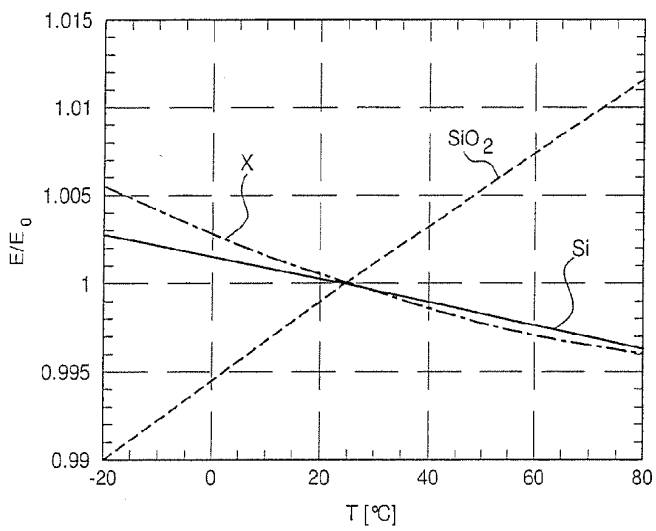


Fig. 5

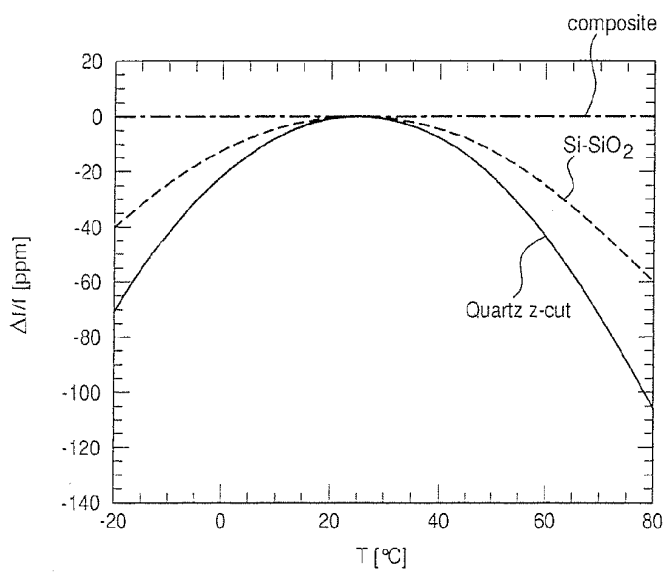


Fig. 6

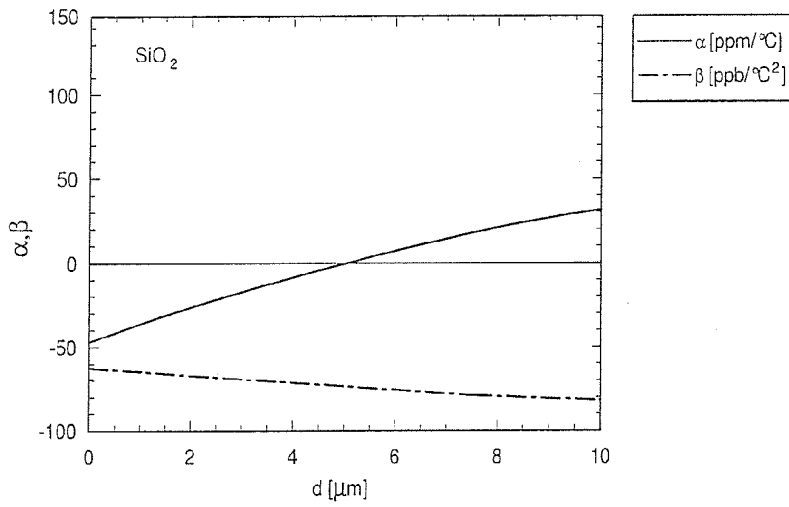


Fig. 7

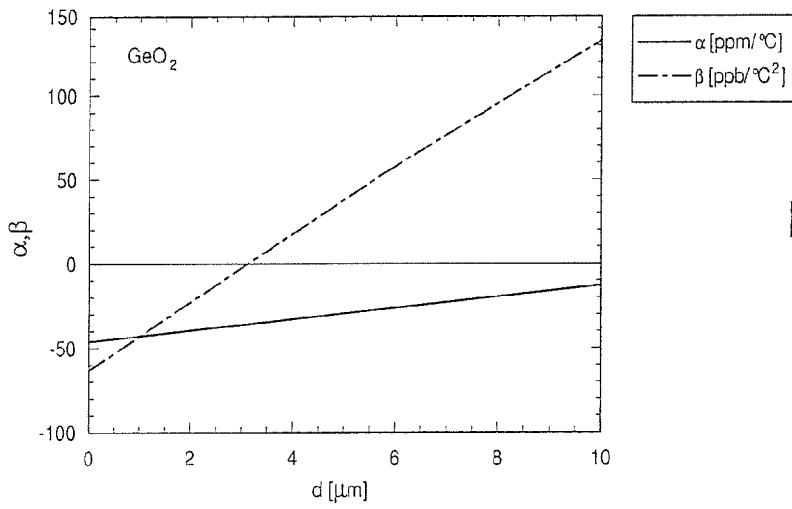


Fig. 8

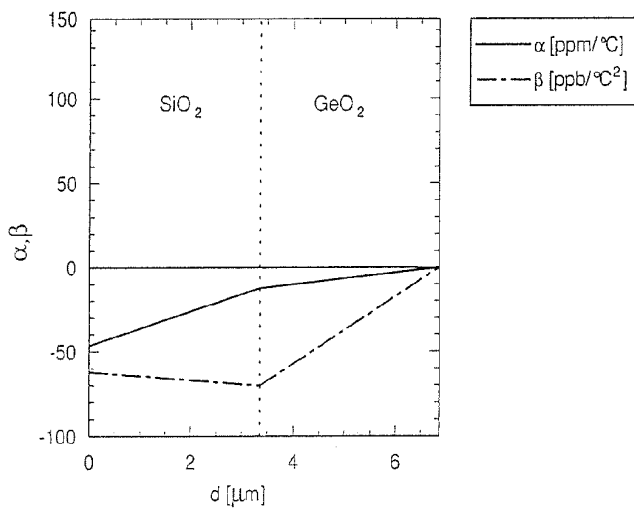


Fig. 9