



CONFÉDÉRATION SUISSE  
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) CH 703 271 B1

(51) Int. Cl.: H03H 3/04 (2006.01)  
H03H 9/21 (2006.01)  
G04B 17/06 (2006.01)  
F16F 1/10 (2006.01)

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

(12) **FASCICULE DU BREVET**

(21) Numéro de la demande: 00940/10

(22) Date de dépôt: 10.06.2010

(43) Demande publiée: 15.12.2011

(24) Brevet délivré: 27.02.2015

(45) Fascicule du brevet publié: 27.02.2015

(73) Titulaire(s):  
The Swatch Group Research and Development Ltd.,  
Rue des Sors 3  
2074 Marin (CH)

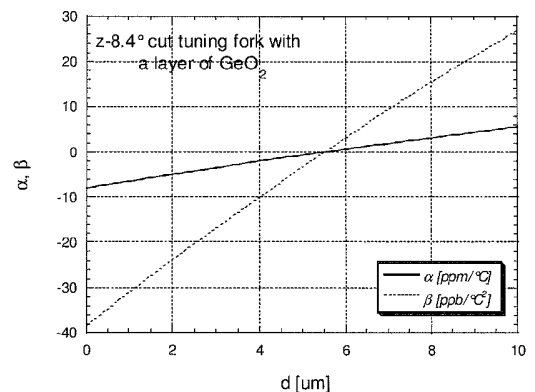
(72) Inventeur(s):  
Thierry Hessler, 2024 St-Aubin (CH)  
Silvio Dalla Piazza, 2610 St-Imier (CH)

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

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

(57) L'invention se rapporte à un résonateur thermocompensé comportant un corps utilisé en déformation, l'âme du corps étant formé à partir d'une plaque coupée dans un cristal de quartz. Selon l'invention, le corps comporte un revêtement déposé au moins partiellement contre l'âme, l'angle ( $\theta$ ) de coupe de la plaque et l'épaisseur ( $d$ ) du revêtement étant adaptés en fonction des coefficients thermoélastiques dudit revêtement afin d'obtenir des coefficients thermiques aux premier et deuxième ordres ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) sensiblement nuls.

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



**Description****Domaine de l'invention**

**[0001]** L'invention se rapporte à un résonateur thermocompensé du type balancier-spiral, diapason ou plus généralement MEMS permettant de fabriquer une base de temps ou de fréquence dont les coefficients thermiques sont sensiblement nuls 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 2 008 043 727 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 à quartz 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 en quartz compensé thermiquement 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 étant formé à partir d'une plaque coupée dans un cristal de quartz caractérisé en ce que le corps comporte un revêtement déposé au moins partiellement contre l'âme, l'angle de coupe de la plaque est choisi afin que les coefficients thermiques aux premier et deuxième ordres soient négatifs et l'épaisseur du revêtement étant adaptés en fonction des coefficients thermoélastiques dudit revêtement qui sont positifs aux premiers et deuxième ordres afin d'obtenir des coefficients thermiques aux premier et deuxième ordres sensiblement nuls.

**[0006]** Avantageusement selon l'invention, le corps du résonateur utilisé en déformation comporte un seul revêtement pour compenser deux ordres. Ainsi, suivant les grandeurs et les signes de chaque ordre du matériau de revêtement, le calcul de l'angle de coupe dans le monocristal de quartz et de l'épaisseur du revêtement est effectué afin de compenser les deux premiers ordres.

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

- le corps comporte une section sensiblement en forme d'un quadrilatère dont les faces sont identiques deux à deux;
- le corps comporte une section sensiblement en forme d'un quadrilatère dont les faces sont entièrement revêtues;
- le revêtement comporte du dioxyde de germanium;
- le corps est un barreau enroulé sur lui-même en formant un spiral et est couplé avec une inertie;
- le corps comporte au moins deux bras montés symétriquement afin de former un diapason;
- le diapason est du type inversé et/ou du type rainuré et/ou du type conique et/ou du type palmé;
- le corps est un 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:

- |                           |                                                                                                                                                                |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| les fig. 1 à 4            | sont des représentations générales en perspective de plusieurs types de résonateur du type diapason;                                                           |
| les fig. 5A, 5B, 6A et 6B | sont des alternatives de sections des résonateurs des fig. 1 à 4;                                                                                              |
| la fig. 7                 | est une représentation générale en perspective d'une partie d'un résonateur balancier-spiral;                                                                  |
| la fig. 8                 | est une section représentative du ressort-spiral de la fig. 7;                                                                                                 |
| la fig. 9                 | est un graphique représentant les coefficients thermiques du premier et deuxième ordre d'un diapason suivant son angle de coupe dans un monocristal de quartz; |

- la fig. 10 est un graphique représentant la variation des premier et deuxième ordres du coefficient thermique d'un diapason de quartz coupé selon un angle égal à  $-8,4^\circ$  par rapport à l'axe z en fonction de l'épaisseur d'une couche de dioxyde de germanium;
- les fig. 11 et 12 sont des représentations schématiques d'un angle de coupe par rapport aux axes cristallographiques d'un cristal de quartz.

### Description détaillée des modes de réalisation préférés

**[0010]** Comme expliqué ci-dessus, l'invention se rapporte à un résonateur en quartz 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, seules les applications à un balancier-spiral et à des diapasons sont présentées ci-dessous. Cependant, d'autres applications de résonateur seront réalisables pour un homme du métier sans difficultés excessives à partir de l'enseignement ci-dessous.

**[0011]** Dans le graphique à la fig. 9, on peut voir la caractérisation de la dérive des coefficients thermiques au premier et deuxième ordres pour des résonateurs du type diapason actuels en fonction de l'angle de coupe selon l'axe z d'un cristal de quartz.

**[0012]** Les fig. 11 et 12 montrent l'interprétation spatiale de l'axe z par rapport à un monocristal de quartz. Un cristal de quartz comporte des axes cristallographiques x, y, z. L'axe x est l'axe électrique et, l'axe y, l'axe mécanique. Selon l'exemple de la fig. 11 et 12, la hauteur h du spiral ou du diapason possède donc une orientation par rapport à l'axe cristallographique z suivant l'angle  $\theta$  de coupe qui a été choisi.

**[0013]** Bien entendu, l'angle  $\theta$  de coupe ne saurait se limiter à un angle unique par rapport à un axe, des rotations selon plusieurs angles par rapport à plusieurs axes sont également possibles pour obtenir l'effet technique désiré dans la présente invention. A titre d'exemple, l'angle  $\theta$  de coupe finale pourrait ainsi être la résultante d'un premier angle  $\Phi$  par rapport à l'axe x et d'un deuxième angle  $\Theta$  par rapport à l'axe z.

**[0014]** A la fig. 9, on s'aperçoit, comme illustré en trait continu, que le coefficient thermique du premier ordre  $\alpha$  coupe l'axe nul autour d'un angle de coupe de 0 degré et de 12 degrés. On comprend donc que suivant l'angle de coupe du monocristal de quartz, il est possible d'obtenir «naturellement» un coefficient thermique du premier ordre  $\alpha$  sensiblement nul, c'est-à-dire que le résonateur comporte une variation de fréquence au premier ordre quasiment indépendante de la température.

**[0015]** Ces caractéristiques avantageuses sont utilisées depuis plusieurs dizaines d'années pour former notamment des bases de temps pour des pièces d'horlogerie avec un angle de coupe proche de 0 degré.

**[0016]** A cette même fig. 9, on s'aperçoit, comme illustré en traits interrompus, que le coefficient thermique du deuxième ordre  $\beta$  ne coupe jamais l'axe nul. Dès lors, on comprend, même avec l'angle de coupe actuel proche de 0 degré, que le quartz reste sensible aux variations de température à cause de la variation du coefficient thermique au deuxième ordre  $\beta$  mais dans une moindre mesure qu'avec le coefficient thermique du premier ordre  $\alpha$ .

**[0017]** Enfin à cette figure, on s'aperçoit que les angles de coupe négatifs dans le monocristal de quartz forment systématiquement un résonateur dont les coefficients thermiques sont négatifs aux premier  $\alpha$  et deuxième ordres  $\beta$ .

**[0018]** Avantageusement, l'idée de l'invention est d'adapter un angle  $\theta$  de coupe du quartz avec une couche unique de revêtement afin de compenser les coefficients thermiques de résonateurs à quartz aux premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres pour obtenir un résonateur très peu sensible aux variations de température.

**[0019]** A titre de définition, la variation relative de la fréquence d'un 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 ( $10^{-6}$ );
- A une constante qui dépend du point de référence, en ppm;
- $T_0$  la température de référence, en  $^\circ\text{C}$ ;
- $\alpha$  le coefficient thermique du premier ordre, exprimé en ppm  $^\circ\text{C}^{-1}$ ;
- $\beta$  le coefficient thermique du deuxième ordre, exprimé en ppm  $^\circ\text{C}^{-2}$ ;
- $\gamma$  le coefficient thermique du troisième ordre, exprimé en ppm  $^\circ\text{C}^{-3}$ .

**[0020]** De plus, le coefficient thermoélastique (CTE) représente la variation relative du module d'Young en fonction de la température. Les termes « $\alpha$ » et « $\beta$ » qui sont utilisés ci-dessous représentent ainsi respectivement les coefficients thermiques du premier et du deuxième ordres, c'est-à-dire la variation relative de la fréquence du résonateur en fonction de la température. Les termes « $\alpha$ » et « $\beta$ » dépendent du coefficient thermoélastique du corps du résonateur et des coefficients de dilatation du corps. De plus, les termes « $\alpha$ » et « $\beta$ » prennent également en compte les coefficients propres à une éventuelle inertie séparée, telle que, par exemple, le balancier pour un résonateur balancier-spiral.

**[0021]** Les oscillations de tout résonateur destiné à une base de temps ou de fréquence devant être entretenues, la dépendance thermique comprend également une contribution éventuelle du système d'entretien. Préférentiellement, le corps du résonateur est une âme de quartz recouverte d'un seul revêtement sur au moins une partie ou la totalité de sa surface extérieure et, éventuellement, par-dessus les métallisations habituelles nécessaires si un actionnement piézoélectrique est désiré. Bien évidemment, dans ce dernier cas, quel que soit le revêtement choisi, les plages de connexions doivent rester libres.

**[0022]** Dans l'exemple illustré aux fig. 1 à 4, on peut voir des variantes de diapasons 1, 21, 31, 41 applicables à l'invention. Ils sont formés d'une base 3, 23, 33, 43 raccordée à deux bras 5, 7, 25, 27, 35, 37, 45, 47, lesquels sont destinés à osciller selon les directions respectives B et C.

**[0023]** Les variantes des fig. 2 à 4 présentent des diapasons 21, 31, 41 du type inversé, c'est-à-dire que la base 23, 33, 43 se prolonge entre les deux bras 25, 27, 35, 37, 45, 47 afin d'optimiser le découplage entre la fixation et la zone active du résonateur 21, 31, 41 et d'optimiser la longueur des bras vibrants pour une surface donnée de matière. Les variantes des fig. 2 à 4 présentent des diapasons 21, 31, 41 du type rainuré (également connu sous le nom anglais «groove»), c'est-à-dire que les deux bras 25, 27, 35, 37, 45, 47 comportent des rainures 24, 26, 34, 36, 44, 46 afin d'y déposer des électrodes pour augmenter le couplage piézoélectrique et permettre ainsi d'obtenir des résonateurs de petites tailles avec d'excellents paramètres électriques.

**[0024]** De plus, la fig. 1 présente une variante de bras 5, 7 du type conique, c'est-à-dire dont la section diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la base 3 de façon à mieux répartir les contraintes élastiques sur la longueur des bras et ainsi augmenter le couplage des électrodes. Enfin, les fig. 1 et 4 présentent des diapasons 1, 41 du type palmé, c'est-à-dire que les deux bras 5, 7, 45, 47 comportent à leur extrémité des palmes 2, 8, 42, 48 afin d'augmenter l'inertie d'oscillation des bras 5, 7, 45, 47 du résonateur 1, 41 pour permettre d'obtenir des résonateurs optimisés en longueur pour une fréquence donnée. On comprend donc qu'il existe une multitude de variantes possibles de diapasons qui peuvent, de manière non exhaustive, être du type inversé et/ou du type rainuré et/ou du type conique et/ou du type palmé.

**[0025]** Avantagusement selon l'invention, chaque diapason 1, 21, 31, 41 comporte des coefficients thermiques des premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres qui sont compensés par dépôt d'une couche 52, 54, 56, 52', 54', 56' contre l'âme 58, 58' du diapason 1, 21, 31, 41. Les fig. 5A, 5B, 6A et 6B proposent quatre exemples non exhaustifs de coupe du corps des diapasons 1, 21, 31, 41 selon le plan A-A permettant de mieux voir leur section en forme de quadrilatère ou de H au moins partiellement recouverte d'une couche 52, 54, 56, 52', 54', 56'. Bien évidemment, les revêtements 52, 54, 56, 52', 54', 56' ne sont pas à l'échelle par rapport aux dimensions de l'âme 58, 58', ceci afin de mieux montrer les localisations de chaque partie 52, 54, 56, 52', 54', 56'.

**[0026]** L'étude a été effectuée dans un premier temps pour un résonateur diapason 1 coupé dans un monocristal de quartz selon des angles négatifs par rapport à l'axe z, c'est-à-dire selon des coefficients thermiques aux premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres qui sont négatifs. Des matériaux dont les coefficients thermoélastiques aux premier et deuxième ordres sont positifs ont donc été recherchés. Il a été trouvé que le dioxyde de germanium et des oxydes de zirconium ou d'hafnium stabilisés répondent à ces caractéristiques.

**[0027]** Des analyses ont été effectuées pour trouver un angle  $\theta$  de coupe dans le quartz avec une couche unique de revêtement afin de compenser les coefficients thermiques de résonateurs à quartz aux premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres. Pour le cas de la fig. 5A, c'est-à-dire un revêtement 52, 54 sur chaque flanc de bras 5, 7 du diapason 1, il a été trouvé une convergence des coefficients thermiques des premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres du résonateur diapason 1 pour un angle  $\theta$  de  $-8,408$  degrés par rapport à l'axe z et une épaisseur d de  $5,47 \mu\text{m}$  pour chaque couche 2, 4.

**[0028]** Cette convergence est illustrée à la fig. 10 où on voit que bien que les premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  coefficients thermiques du diapason 1 coupent tous les deux l'axe nul pour une même épaisseur d des couches 2, 4.

**[0029]** Pour le cas de la fig. 6A, c'est-à-dire un revêtement 56 en recouvrement total des bras 5, 7 du diapason 1, il a été trouvé une convergence des coefficients thermiques des premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres du résonateur diapason 1 pour un angle  $\theta$  de  $-8,416$  degrés par rapport à l'axe z et une épaisseur d de  $4,26 \mu\text{m}$  pour la couche 6. On en conclut donc que l'angle  $\theta$  de coupe est sensiblement équivalent par rapport à la variante de la fig. 5A, par contre l'épaisseur d de revêtement 56 nécessaire est bien plus faible.

**[0030]** Selon une interprétation similaire pour des sections de diapasons du type rainuré illustré aux fig. 5B et 6B, un angle  $\theta$  et une épaisseur d peuvent également être déterminées. Le cas de la fig. 6B est particulièrement avantageux en ce que le revêtement 56' au niveau des arêtes des rainures permet l'augmentation de la surface sur laquelle la couche de compensation est active. On comprend donc, pour le cas particulier de la fig. 6B, que l'épaisseur d de revêtement 56' sera nécessairement encore moins grande.

**[0031]** Il est à noter pour toutes variantes ci-dessus que, si les bras 5, 7, 25, 27, 35, 37, 45, 47 sont nécessairement revêtus, la base 3, 23, 33, 43 n'a pas nécessairement à l'être. En effet, ce sont aux niveaux des zones de contraintes que le revêtement 52, 54, 56, 52', 54', 56' doit être présent.

**[0032]** Dans l'exemple illustré aux fig. 7 et 8, on peut voir un spiral 11 dont le corps 15 est venu de forme avec sa virole 13 et dont les coefficients thermiques des premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres du corps sont compensés. La fig. 8 propose

une coupe du corps 15 du spiral 11 permettant de mieux voir sa section en forme de quadrilatère. Le corps 15 peut ainsi être défini par sa longueur  $l$ , sa hauteur  $h$  et son épaisseur  $e$ . La fig. 8 montre un exemple où l'âme 18 est entièrement revêtue de manière similaire à la fig. 6A. Bien évidemment, la fig. 8 présente uniquement un exemple non limitatif et, comme pour les diapasons 1, 21, 31, 41, le spiral 11 peut comporter un revêtement sur au moins une partie ou la totalité de la surface extérieure du corps 15.

**[0033]** L'étude a donc été effectuée dans un deuxième temps pour un résonateur du type balancier-spiral dont le spiral 11 est coupé dans un monocristal de quartz selon des coefficients thermiques aux premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres qui sont négatifs et avec des matériaux en recouvrement dont les coefficients thermoélastiques aux premier et deuxième ordres sont positifs.

**[0034]** Des analyses ont été effectuées pour trouver un angle  $\theta$  de coupe dans le quartz avec une couche unique de revêtement afin de compenser les coefficients thermiques de résonateurs à quartz aux premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres.

**[0035]** Pour le cas de la figure 8, c'est-à-dire un revêtement 16 en recouvrement total du corps 15 du spiral 11, il a été trouvé une convergence des coefficients thermiques des premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres du résonateur pour plusieurs valeurs de dilatation du balancier:

**[0036]**

| $\alpha_{bal}$ | $\theta$ | $d$ |
|----------------|----------|-----|
| 5              | -15,9    | 8,5 |
| 10             | -12,3    | 7,2 |
| 15             | -8,0     | 6,1 |
| 20             | -2,4     | 5,5 |

où:

- $\alpha_{bal}$  est le coefficient de dilatation du balancier, exprimé en ppm °C<sup>-1</sup>;
- $\theta$  est l'angle de coupe dans le quartz, exprimé en degrés;
- $d$  est l'épaisseur du revêtement de GeO<sub>2</sub>, exprimé en  $\mu$ m.

**[0037]** Par conséquent, au vu des explications ci-dessus, l'enseignement de l'invention ne saurait se limiter à un matériau de revêtement particulier, ni même à un résonateur particulier ou même à une zone de dépôt particulière du revêtement. L'exemple de la coupe par rapport à l'axe  $z$  du cristal de quartz n'est pas non plus limitatif. D'autres références dans le cristal de quartz comme les axes  $x$  et  $y$  sont également possibles tout comme plusieurs rotations sont possibles, comme expliqué ci-dessus.

**[0038]** On comprend donc qu'il est possible de manière avantageuse selon l'invention de compenser les coefficients thermiques des premier  $\alpha$  et deuxième  $\beta$  ordres de n'importe quel résonateur à quartz avec une couche unique.

## Revendications

1. Résonateur thermocompensé comportant un corps utilisé en déformation, l'âme (58, 58', 18) du corps (3, 5, 7, 15, 23, 25, 27, 33, 35, 37, 43, 45, 47) étant formé à partir d'une plaque coupée dans un cristal de quartz, caractérisé en ce que le corps (3, 5, 7, 15, 23, 25, 27, 33, 35, 37, 43, 45, 47) comporte un revêtement (52, 54, 56, 52', 54', 56', 16) déposé au moins partiellement contre l'âme (58, 58', 18), l'angle ( $\theta$ ) de coupe de la plaque est choisi afin que les coefficients thermiques aux premier et deuxième ordres ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) soient négatifs et l'épaisseur ( $d$ ) du revêtement (52, 54, 56, 52', 54', 56', 16) est adaptée en fonction des coefficients thermoélastiques dudit revêtement qui sont positifs aux premiers et deuxièmes ordres afin d'obtenir des coefficients thermiques aux premier et deuxième ordres ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) sensiblement nuls.
2. Résonateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le corps (3, 5, 7, 15) comporte une section sensiblement en forme d'un quadrilatère dont les faces sont identiques deux à deux.
3. Résonateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le corps (3, 5, 7, 15) comporte une section sensiblement en forme d'un quadrilatère dont les faces sont entièrement revêtues.
4. Résonateur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le revêtement (52, 54, 56, 52', 54', 56', 16) comporte du dioxyde de germanium.
5. Résonateur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le corps (15) est un barreau enroulé sur lui-même en formant un spiral (11) et est couplé avec une inertie.

## **CH 703 271 B1**

6. Résonateur selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le corps comporte au moins deux bras (5, 7, 25, 27, 35, 37, 45, 47) montés symétriquement afin de former un diapason (1, 21, 31, 41).
7. Résonateur selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le diapason (1, 21, 31, 41) est du type inversé et/ou du type rainuré et/ou du type conique et/ou du type palmé.
8. Résonateur selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le corps est un MEMS.
9. Pièce d'horlogerie caractérisée en ce qu'elle comporte au moins un résonateur selon à l'une des revendications précédentes.

Fig. 1

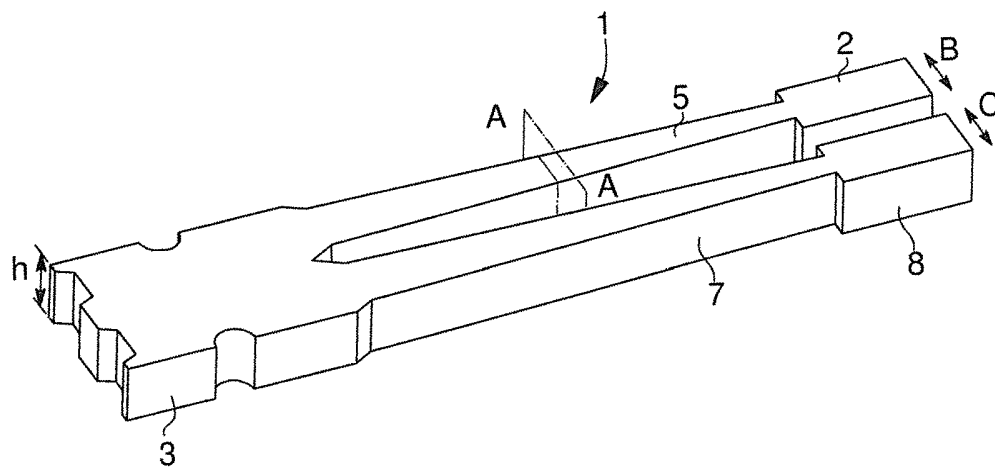


Fig. 2

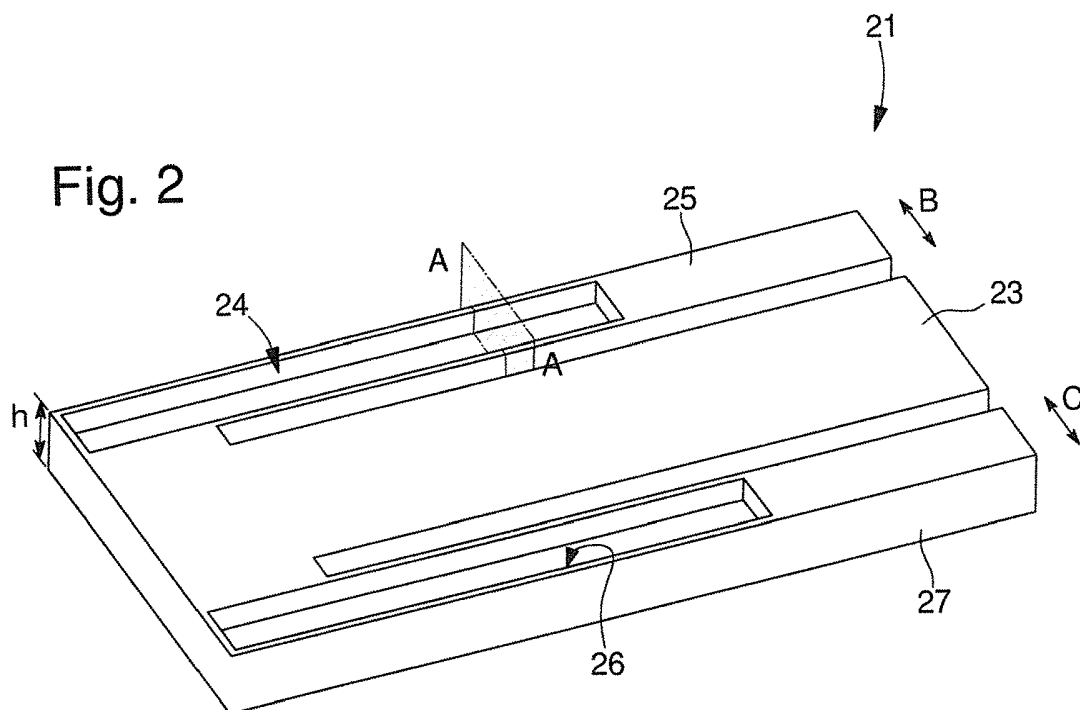


Fig. 3

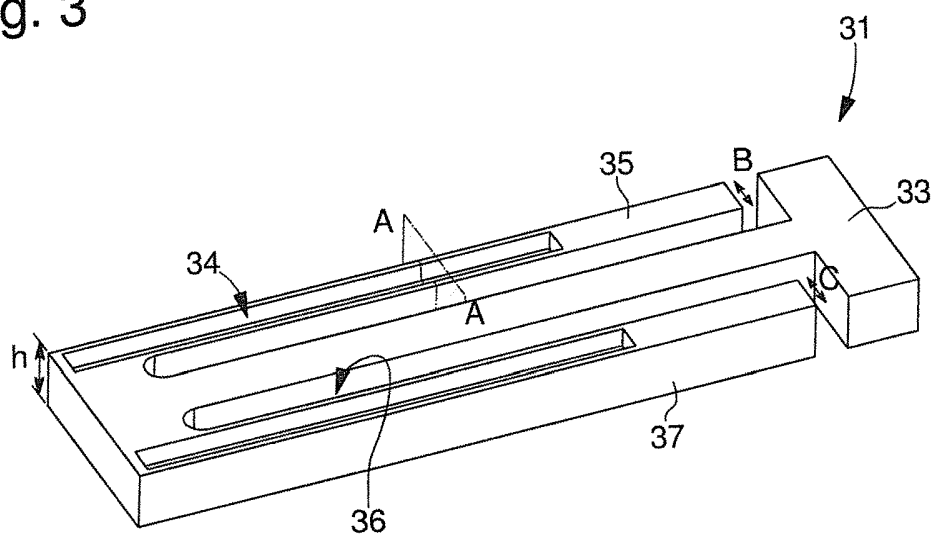


Fig. 4

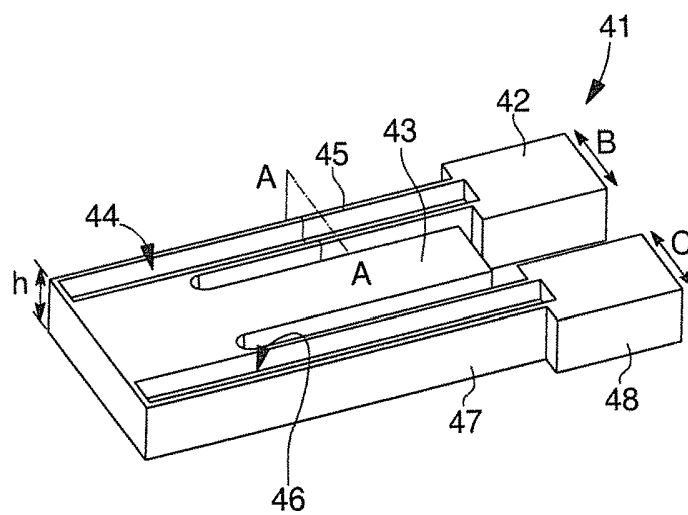




Fig. 5A

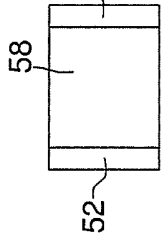


Fig. 5B

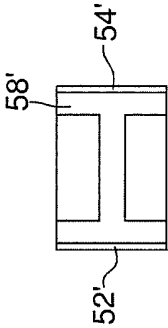


Fig. 6A

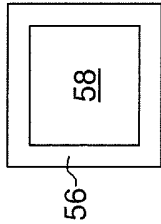


Fig. 6B

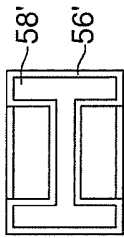


Fig. 7

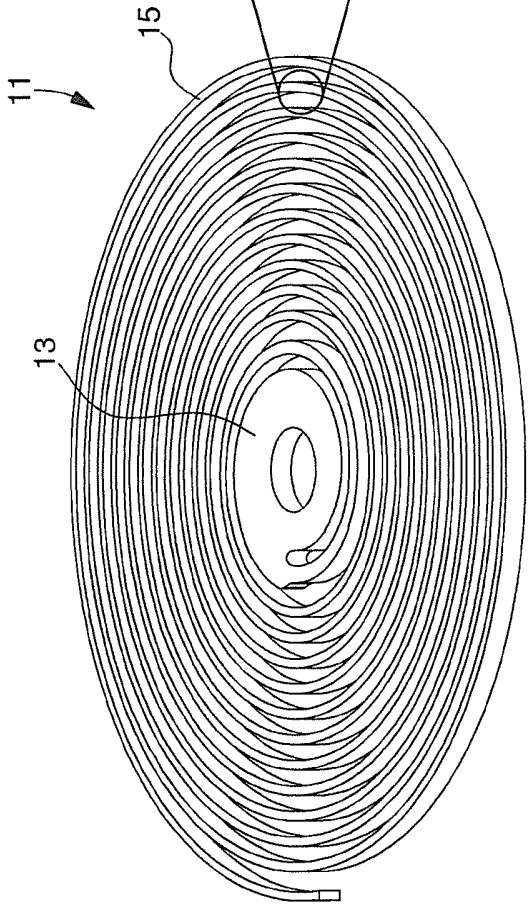


Fig. 8

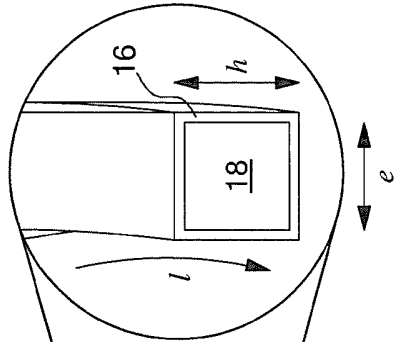


Fig. 9

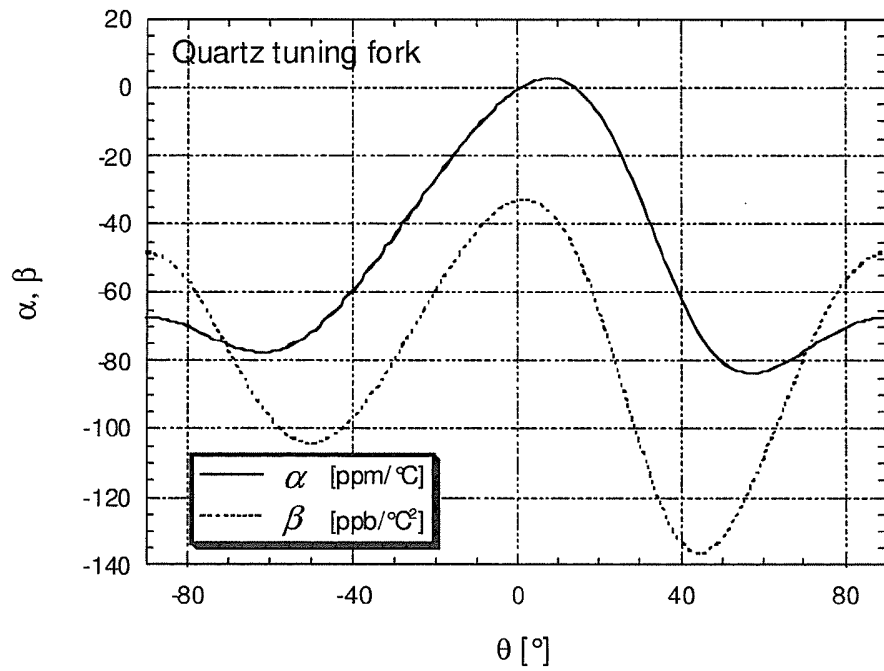


Fig. 10

