



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



FASCICULE DU BREVET A5

11

623 690

21 Numéro de la demande: 9442/78

73 Titulaire(s):
Centre Electronique Horloger S.A., Neuchâtel

22 Date de dépôt: 08.09.1978

72 Inventeur(s):
Jean Hermann, Neuchâtel
Claude Bourgeois, Bôle

24 Brevet délivré le: 15.06.1981

45 Fascicule du brevet
publié le: 15.06.1981

74 Mandataire:
William Blanc & Cie conseils en propriété,
industrielle S.A., Genève

54 Résonateur piézo-électrique.

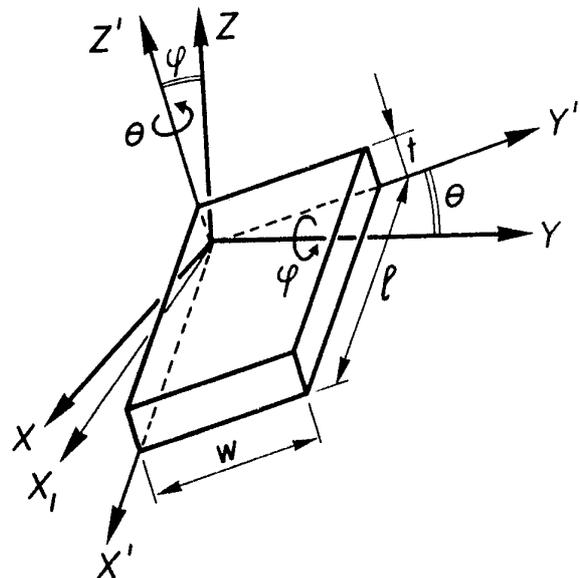
57 Le résonateur comporte au moins un cristal de quartz d'axe électrique X , mécanique Y et optique Z en forme de plaque mince rectangulaire dont la longueur l est orientée selon un axe X' , la largeur w selon un axe Y' et l'épaisseur t selon un axe Z' , et qui vibre selon un mode de contour. L'axe Z' situé dans le plan des axes X et Z forme avec l'axe Z un angle φ tel que

$$16^\circ < \varphi < 36^\circ$$

et l'axe Y' forme avec l'axe Y un angle θ tel que

$$10^\circ < \theta < 30^\circ.$$

Ce résonateur présente un coefficient thermique de premier ordre nul et ne dépendant pas de façon critique du rapport dimensionnel de la plaque; les coefficients thermiques d'ordres supérieures sont très faibles. Le couplage piézo-électrique est tel que le mode optimisé est pratiquement seul excité.



RENDICATIONS

1. Résonateur piézo-électrique comportant au moins un cristal de quartz d'axe électrique X, mécanique Y et optique Z en forme de plaque mince rectangulaire dont la longueur l est orientée selon un axe X', la largeur w selon un axe Y' et l'épaisseur t selon un axe Z', et vibrant selon un mode de contour, caractérisé en ce que l'axe Z' normal aux grandes faces de la plaque est situé dans le plan des axes X et Z et forme avec l'axe Z un angle φ tel que

$$16^\circ < \varphi < 36^\circ$$

et en ce que l'axe Y' forme avec l'axe Y un angle ϑ tel que

$$10^\circ < \vartheta < 30^\circ$$

2. Résonateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le rapport de la largeur w à la longueur l de la plaque est compris entre 0,5 n et 0,8 n , où n est l'ordre de l'harmonique du mode fondamental de vibration utilisé.

3. Résonateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'angle φ est au moins approximativement égal à 26° et que l'angle ϑ est au moins approximativement égal à 20° .

4. Résonateur selon la revendication 2, caractérisé en ce que le rapport w/l est au moins approximativement égal à $\frac{2}{3} \times n$, où n est l'ordre de l'harmonique du mode fondamental de vibration utilisé.

5. Résonateur selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'il comporte un cristal de quartz ayant la forme d'un diapason dont les branches sont constituées de deux plaques rectangulaires ayant un rapport dimensionnel w/l de 0,5 à 0,8.

6. Résonateur selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'il comporte un cristal de quartz présentant une partie active ayant la forme d'une plaque rectangulaire équivalant, quant à ses dimensions, à une plaque composée d'au moins une plaque rectangulaire ayant un rapport dimensionnel w/l de 0,5 à 0,8, et une partie passive présentant au moins une évanescence, la partie passive étant disposée de façon adjacente à la partie active.

7. Résonateur selon la revendication 6, caractérisé en ce que la partie active comporte une plaque rectangulaire ayant un rapport dimensionnel w/l de 0,5 à 0,8, et que la partie passive comporte deux triangles qui prolongent la partie active dans le sens de la longueur.

8. Résonateur selon la revendication 3, caractérisé en ce que la partie active comporte une plaque rectangulaire ayant un rapport dimensionnel w/l de 0,5 à 0,8 et que la partie passive comporte un cadre rectangulaire entourant entièrement la partie active, les deux parties étant rattachées l'une à l'autre au moyen d'évanescences solidaires de chacun des petits côtés de la partie active.

9. Résonateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que la plaque est métallisée partiellement sur chacune de ses grandes faces, cette métallisation ayant la forme d'une bande parallèle à la longueur de la plaque et ces bandes étant décalées l'une par rapport à l'autre par rapport au plan médian de la plaque, cet agencement étant réalisé de telle manière que, si l'une des métallisations est polarisée positivement et l'autre négativement, le champ électrique présente une composante selon l'axe Y', de sens opposé à sa composante selon Z'.

La présente invention concerne un résonateur piézo-électrique comportant au moins un cristal de quartz d'axe électrique X, mécanique Y et optique Z en forme de plaque mince rectangulaire dont la longueur l est orientée selon un axe X', la largeur w selon un axe Y' et l'épaisseur t selon un axe Z' et vibrant selon un mode de contour.

Un résonateur à mode de contour se présente sous la forme d'une plaque mince à mouvements dans le plan. L'épaisseur doit être suffisamment faible pour que les forces d'inertie provoquées par les mou-

vements hors du plan – dues aux constantes élastiques croisées – aient une influence négligeable sur l'énergie de déformation. La forme la plus couramment adoptée est le rectangle, ce qui implique l'existence de quatre paramètres géométriques:

- deux angles de coupe pour définir la direction de la normale à la plaque;
- un angle de coupe pour définir l'orientation des côtés du rectangle dans le plan de la plaque, et
- un rapport dimensionnel entre les côtés du rectangle.

Pour qu'un résonateur présente un intérêt pratique, il faut que son coefficient thermique de premier ordre soit voisin de 0 (par exemple $\pm 1 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) à la température moyenne d'utilisation.

Il existe sur le marché des quartz de différentes coupes parmi lesquelles la coupe GT est celle qui présente les propriétés thermiques les plus favorables. Il s'agit d'une plaque rectangulaire dont le rapport dimensionnel est égal à 0,86, et qui est obtenu par une rotation autour de l'axe électrique X du cristal suivie d'une rotation $\pm 45^\circ$ autour de la normale. Le résonateur de coupe GT oscille selon un mode de contour et plus particulièrement en mode d'allongement selon la petite dimension de la plaque. Les coefficients thermiques du premier et du second ordre sont nuls, le coefficient du troisième ordre est très faible. L'inconvénient de cette coupe provient du fait que les propriétés thermiques du résonateur dépendent de façon critique du rapport dimensionnel de la plaque.

A titre d'exemple, pour un quartz de coupe GT, le coefficient thermique du premier ordre α est égal à $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, le coefficient de second ordre β est égal à $\pm 1 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}^2$ et le coefficient du troisième ordre γ est inférieur à $30 \cdot 10^{-12}/^\circ\text{C}^3$.

Cependant, il est à noter que pour une variation relative $\Delta(\frac{w}{l})/\frac{w}{l}$ du rapport dimensionnel, égale à 1%, la variation du coefficient thermique du premier ordre est égale à $2,5 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Cela signifie que le coefficient thermique d'un quartz GT devra obligatoirement être ajusté après montage du résonateur.

Une autre coupe connue est la coupe DT qui consiste en une plaque généralement carrée, obtenue par une rotation autour de l'axe électrique X et vibrant selon un mode de cisaillement de surface. Les résonateurs de coupe DT ont l'avantage par rapport à ceux de coupe GT d'être très peu sensibles aux variations du rapport dimensionnel. Cependant, leurs qualités thermiques sont moins bonnes. A titre d'exemple, le coefficient thermique du premier ordre α est nul, le coefficient thermique du second ordre β est égal à $-(15-20) \cdot 10^{-9}/^\circ\text{C}^2$ et le coefficient thermique du troisième ordre γ est approximativement égal à $45 \cdot 10^{-12}/^\circ\text{C}^3$.

On connaît également des quartz de coupe AT qui se présentent sous la forme d'une plaque obtenue par une rotation autour de l'axe électrique X du cristal. Les données de ces quartz se retrouvent notamment dans la publication «Quartz vibrators and their applications» de Pierre Vigoureux, édité par His Majesty's Stationary Office, Londres, 1950. Deux types de quartz de coupe AT, oscillant à une fréquence de 4 MHz sont actuellement commercialisés. Il s'agit du quartz AT de la société Nihon Dempa dont les propriétés thermiques à 25°C sont les suivantes:

- Coefficient thermique du premier ordre: $\alpha = \pm 0,1 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$;
 - Coefficient thermique du second ordre: $\beta = -4 \pm 1 \cdot 10^{-9}/^\circ\text{C}^2$;
 - Coefficient thermique du troisième ordre: $\gamma = 95 \cdot 10^{-12}/^\circ\text{C}^3$;
- et du quartz AT de la Société Suisse pour l'Industrie Horlogère (SSIH) dont les propriétés thermiques à 25°C sont les suivantes:
- Coefficient thermique du premier ordre: $\alpha = \pm 0,1 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$;
 - Coefficient thermique du second ordre: $\beta = -11 \pm 1 \cdot 10^{-9}/^\circ\text{C}^2$;
 - Coefficient thermique du troisième ordre: $\gamma = 90 \cdot 10^{-12}/^\circ\text{C}^3$.

Outre des propriétés thermiques inférieures à celles des quartz de coupe GT, les quartz de coupe AT ont une fréquence quatre fois plus élevées pour un encombrement comparable. D'autre part, le coefficient thermique du premier ordre est plus sensible aux différences de valeurs de l'angle de coupe. Par exemple, pour une variation $\Delta\varphi$ de l'angle φ égale à 1° , la variation correspondante $\Delta\alpha$

du coefficient thermique du premier ordre est égale à $4,7 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. En outre, le quartz AT de la société Nihon Dempa a une forme compliquée, présentant un biseautage à chaque extrémité du barreau et une inclinaison des faces latérales. Cela implique la nécessité d'une métallisation individuelle après usinage complet. Le quartz AT de la société SSIH a une longueur importante, soit d'environ 11 mm.

La présente invention se propose de remédier aux inconvénients susmentionnés des quartz de coupes connues et de réaliser un résonateur du type indiqué au début satisfaisant à l'ensemble des conditions suivantes:

a) Coefficient thermique de premier ordre α nul, contrôlé par un angle de coupe et ne dépendant pas de façon critique du rapport dimensionnel de la plaque de cristal.

b) Coefficients thermiques d'ordres supérieurs aussi faibles que possible avec, en particulier, la possibilité d'annuler le coefficient thermique du second ordre β .

c) Couplage piézo-électrique suffisant et capacité dynamique C_1 assez élevée pour assurer un niveau d'impédance acceptable.

d) Couplage piézo-électrique de tous les autres modes suffisamment faibles pour remplir la condition:

$$\frac{QC_1}{\omega} \left| \text{mode optimisé} \right. > \frac{QC_1}{\omega} \left| \text{autres modes} \right.$$

où Q représente le facteur de qualité. Cette condition garantit que seul le mode optimisé est excité par l'oscillateur.

e) Utilisation d'un substrat obtenu par une seule rotation cristallographique dont l'influence sur le coefficient thermique du premier ordre α ne doit pas être importante, par exemple inférieure à $5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{angle}$.

f) Une seconde rotation, effectuée autour de la normale à la plaque, ne doit pas être critique, des tolérances de l'ordre de $\pm 5'$ devant être acceptables.

A cet effet, le résonateur selon l'invention est caractérisé en ce que l'axe Z' normal aux grandes faces de la plaque est situé dans le plan des axes X et Z et forme avec l'axe Z un angle φ tel que

$$16^{\circ} < \varphi < 36^{\circ}$$

et en ce que l'axe Y' forme avec l'axe Y un angle ϑ tel que

$$10^{\circ} < \vartheta < 30^{\circ}$$

Le dessin annexé illustre, à titre d'exemple, différentes formes de réalisation d'un résonateur selon l'invention.

La fig. 1 est une vue en perspective montrant l'orientation d'un résonateur selon l'invention dans le système d'axes X, Y, Z;

La fig. 2 est un graphique représentant le lieu géométrique des valeurs ϑ et φ pour lesquelles le coefficient thermique de premier ordre du résonateur est nul;

Les fig. 3 à 7 sont des vues en plan de cinq différentes formes de plaques piézo-électriques pour le résonateur;

La fig. 8 est une vue en perspective d'un résonateur en forme de plaque rectangulaire montrant l'emplacement des électrodes.

En référence à la fig. 1, la plaque appelée par la suite plaque de coupe ZT, s'obtient de préférence à partir d'un substrat de coupe Z, c'est-à-dire une plaque ayant pour normale l'axe optique Z du cristal de quartz. Une première rotation d'angle φ autour de l'axe Y représentant l'axe mécanique du cristal amène l'axe optique Z en Z' et l'axe électrique X en X₁. Une seconde rotation d'angle ϑ autour de l'axe Z amène les axes X₁ en X' et Y en Y'. Les directions principales X', Y', Z' correspondent respectivement à la longueur ℓ , la largeur w et l'épaisseur t de la plaque de coupe ZT. Selon les normes IRE, une telle coupe est notée (z x w t) φ, ϑ ce qui s'interprète de la façon suivante:

z: indique la direction de l'épaisseur de la plaque initiale (substrat de coupe Z);

x: indique la direction de la grande dimension de la plaque initiale;

w: signifie que la première rotation d'angle φ est effectuée autour de l'axe portant la largeur de la plaque initiale;

t: indique que la seconde rotation d'angle ϑ est effectuée autour de la direction de l'épaisseur de la plaque finale (normale à la surface des grandes faces).

Pour remplir les conditions énoncées précédemment, il convient de choisir les angles φ et ϑ tels que

$$16^{\circ} < \varphi < 36^{\circ}$$

$$10^{\circ} < \vartheta < 26^{\circ}$$

et le rapport dimensionnel w/ ℓ tel que w/ ℓ soit compris entre 0,5 et 0,8.

Les meilleurs résultats sont obtenus pour φ approximativement égal à 26° , ϑ approximativement égal à 20° et w/ $\ell \approx 2/3$. Pour des raisons de symétrie du cristal, on constate que, pour des valeurs angulaires φ égal à -26° et ϑ égal à -20° , la plaque obtenue est identique à la précédente.

L'épaisseur est un paramètre libre, comme dans tous les modes de contour. Elle doit être choisie de manière à éviter tout couplage gênant avec les modes à mouvements hors du plan. Au voisinage de cette combinaison d'angles, on constate que la relation fréquence/température est une courbe cubique dont le point d'inflexion peut être varié par le choix approprié du rapport dimensionnel. Le coefficient thermique du premier ordre au point d'inflexion dépend de l'angle φ et peut être annulé. Le coefficient thermique du second ordre dépend du rapport dimensionnel et peut être annulé pour w/ $\ell \approx 2/3$. Le coefficient thermique du troisième ordre ne vaut qu'environ $55 \cdot 10^{-12}/^{\circ}\text{C}^3$, c'est-à-dire sensiblement moins que celui d'un quartz de coupe AT. La constante de fréquence référée à la largeur est de 2823 kHz/mm. La courbe de la fig. 2, qui représente le lieu géométrique des points pour lesquels le coefficient thermique du premier ordre est nul, illustre bien le fait que ce coefficient varie fortement avec l'angle φ , mais est très peu sensible à de petites variations de l'angle ϑ .

Une analyse détaillée des propriétés de ce quartz de coupe ZT permet de faire ressortir que la déformation est pratiquement un allongement pur selon la largeur, ce qui implique qu'une juxtaposition selon l'axe Y' de n résonateurs, vibrant alternativement en contre-phase, ne modifie pas les propriétés thermiques. Le résonateur ainsi constitué vibre en fait sur le nième harmonique d'allongement selon Y'.

La forme de réalisation la plus simple d'un résonateur de coupe ZT consiste à utiliser une plaque de quartz rectangulaire, telle qu'elle est définie à la fig. 1, suspendue par l'intermédiaire de un ou deux fils placés de préférence au centre. Il existe cependant d'autres possibilités, qui évitent d'utiliser des fils de suspension.

En référence à la fig. 3, le cristal de quartz de coupe ZT représenté comprend une partie active intérieure 10 de longueur ℓ et de largeur w, entourée par un cadre 11 et fixée à ce cadre par deux pieds 12 et 13. Le cadre 11 et les pieds 12 et 13 constituent la partie passive du cristal. La partie active vibre dans le sens de la largeur comme indiqué par les flèches 15.

La fig. 4 illustre une autre forme de réalisation d'une plaque de coupe ZT qui comporte une partie active rectangulaire 20 de longueur ℓ et de largeur w, prolongée de chaque côté de sa dimension longitudinale par une évanescence de forme triangulaire 21, 22. La plaque vibre dans le sens des flèches 23 et peut, de ce fait, être aisément fixée sur deux supports fixes 24 et 25, par la pointe des triangles 21 et 22.

La fig. 5 illustre une plaque rectangulaire de coupe ZT dont la partie active 30 est équivalente, quant à ses dimensions, à trois plaques 31, 32, 33 ayant chacune une longueur ℓ et une largeur w telles que w/ $\ell = 0,5$ à 0,8. La plaque centrale 32, disposée entre les plaques 31 et 33 et vibrant en contre-phase, comporte par exemple deux prolongements 34 et 35 prévus pour fixer l'ensemble sur un support (non représenté).

La fig. 6 illustre une plaque de coupe ZT en forme de diapason. Elle se compose d'une partie active constituée de deux plaques 41

et 42 de longueur l et de largeur w telles que $w/l = 0,5$ à $0,8$, et fixées parallèlement sur un pied 43 qui constitue, dans ce cas, la partie passive et qui est destinée à être fixée sur un support.

La fig. 7 illustre une autre forme de réalisation d'une plaque de coupe ZT comportant une partie active 50 accolée à une partie passive 51. La partie active est constituée par une plaque rectangulaire ayant pour dimensions l et w telles que le rapport w/l soit égal à $0,5$ à $0,8$ comme dans les exemples précédents. La partie active oscille selon les flèches 52.

La fig. 8 illustre une forme de métallisation de la plaque de coupe ZT. Les oscillateurs intégrés à faible consommation présentent une résistance négative inversement proportionnelle à la fréquence. Si l'on admet un fonctionnement en régime linéaire, il est nécessaire que le résonateur à quartz satisfasse à la condition suivante:

$$\frac{QC_1}{\omega} \Big| \text{mode désiré} > \frac{QC_1}{\omega} \Big| \text{modes non désirés}$$

Le résonateur ZT possède en particulier un mode de cisaillement à fréquence plus basse, pour lequel cette condition ne paraît pas pouvoir être réalisée si la plaque est entièrement métallisée. Il sera

donc nécessaire d'avoir recours à une métallisation partielle, choisie de manière à augmenter le rapport:

$$\frac{C_1}{C_1} \Big| \text{mode ZT}$$

$$\frac{C_1}{C_1} \Big| \text{mode de cisaillement}$$

Cette métallisation est constituée par une bande longitudinale 61 et 62 qui recouvre partiellement les grandes faces de la plaque 60. L'un des bords de ces bandes peut être confondu avec le bord de la plaque. Les bandes 61 et 62 sont nécessairement décalées par rapport au plan médian perpendiculaire aux grandes faces de la plaque de telle manière que, si l'une des métallisations, par exemple la couche 61, est polarisée positivement et si d'autre, 62, est polarisée négativement, le champ électrique résultant présente une composante selon Y' qui est opposée à sa composante selon Z' .

Outre les avantages déjà décrits précédemment, la plaque de coupe ZT est de fabrication simple et ne nécessite aucun ajustement des propriétés thermiques après son montage. Un éventuel ajustement de la fréquence pourrait être réalisé simplement par un dépôt uniforme de matière, soit sur toute la surface, soit de préférence sur une bande voisine des arêtes parallèles à la longueur de la plaque, sans que les propriétés thermiques soient modifiées.

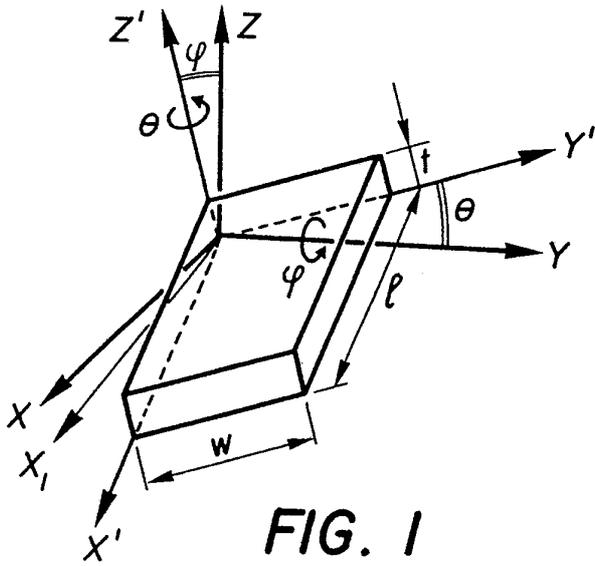


FIG. 1

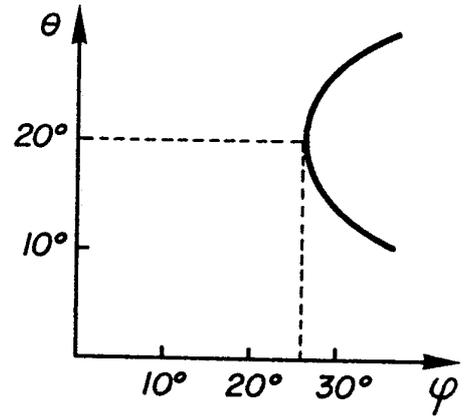


FIG. 2

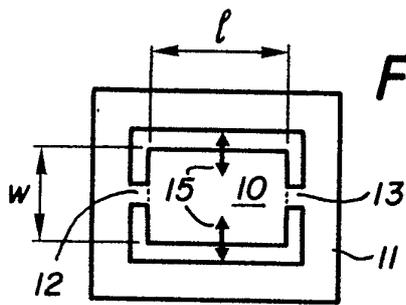


FIG. 3

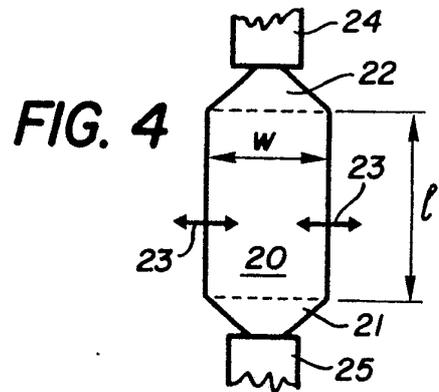


FIG. 4

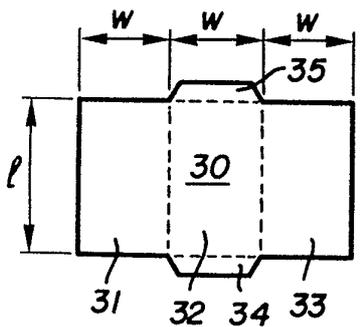


FIG. 5

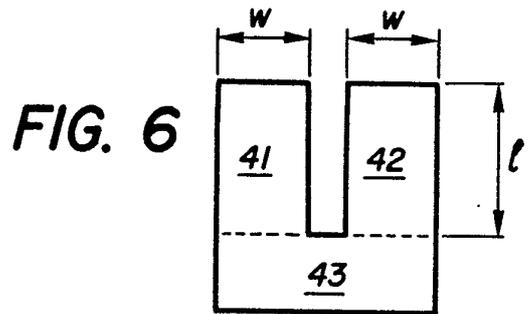


FIG. 6

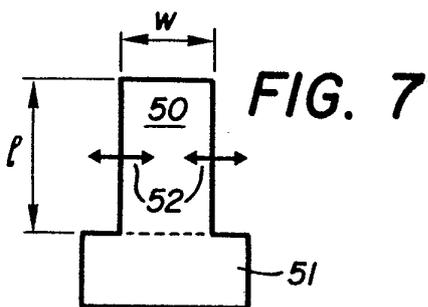


FIG. 7

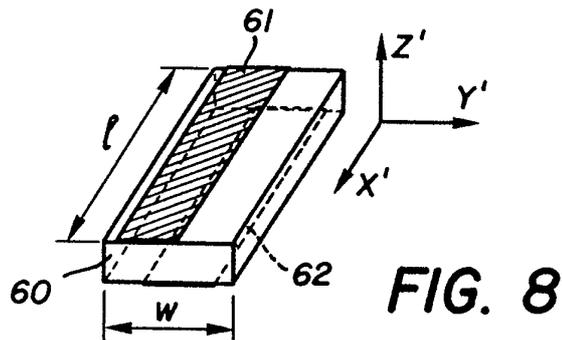


FIG. 8