

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication :

(A n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction).

**2 483 076**

A1

**DEMANDE  
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

**N° 80 11509**

(54) Sonde de température utilisant une lame de quartz.

(51) Classification internationale (Int. Cl.³). G 01 K 7/32.

(22) Date de dépôt..... 23 mai 1980.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du  
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 48 du 27-11-1981.

(71) Déposant : Société anonyme dite : QUARTZ ET ELECTRONIQUE, résidant en France et  
Etablissement public dit : CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
(CNRS), résidant en France.

(72) Invention de : Jean-Jacques Gagnepain, Daniel Hauden, Roger Coquerel et Claude Pegeot.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : René Vatinel, SOSPI,  
14-16, rue de la Baume, 75008 Paris.

Sonde de température utilisant une lame de quartz.

L'invention concerne la mesure et le contrôle précis de la température.

Afin d'effectuer des mesures et des contrôles précis de la température, on utilise un capteur thermométrique ayant une grande sensibilité et une bonne linéarité dans la gamme de mesures désirée. La résolution ultime du dispositif de mesure est déterminée par le principe physique du capteur et la chaîne de mesure.

Les sondes thermométriques utilisées jusqu'à maintenant ont pour principe des phénomènes physiques très variés qui leurs permettent de fonctionner dans des gammes de température plus ou moins étendues. On peut citer pour mémoire les sondes utilisant la dilatation thermique d'un corps solide, l'expansion d'un liquide (alcool, mercure) ou d'un gaz (thermomètre à hydrogène), ainsi que les sondes basées sur le rayonnement lumineux (pyromètres). D'autres dispositifs ont pour principe physique les variations de grandeurs électriques en fonction de la température comme par exemple les résistances ou les thermistances, et les thermocouples.

Actuellement, les meilleures performances, lors de mesures thermiques, sont obtenues avec des procédés basés sur les variations de fréquence d'un oscillateur en fonction de la température. En particulier, il a été constaté il y a déjà plusieurs années, que les lames de quartz utilisées comme référence de fréquence dans des oscillateurs de bonne stabilité subissent les effets de la température qui agit comme élément perturbateur.

Du fait de l'anisotropie du quartz, il a été montré qu'il était possible de trouver des orientations qui minimisent ou qui augmentent sélectivement leur sensibilité à la température.

On a prévu et vérifié (D.L. HAMMOND, C.A. ADAMS, P. SCHMIDT - A linear quartz crystal temperature sensing element - 19e Conférence annuelle de l'ISA - octobre 1964) l'existence d'une orientation du quartz permettant d'obtenir une lame ayant un coefficient de température linéaire dans une large gamme de température. Cette coupe de quartz à onde de volume, dite coupe LC (coefficient linéaire) a permis la réalisation d'un thermomètre à quartz en bouclant la lame sur un

amplificateur pour obtenir un oscillateur dont la fréquence varie linéairement avec la température (D.L. HAMMOND et A. BENJAMINSON, "Un thermomètre linéaire à quartz", Mesure - février 1966). Les mesures peuvent être effectuées automatiquement avec une résolution de  $10^{-4}^{\circ}\text{C}$  dans une gamme de températures allant de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+230^{\circ}\text{C}$ . L'inconvénient majeur d'une telle sonde est que le temps de réponse est alors de l'ordre de 10 secondes et tient au fait que la lame de quartz à onde de volume est maintenue par 3 points de fixation par lesquels se fait l'essentiel des échanges thermiques, l'hélium contenu dans le boîtier améliorant légèrement la conductibilité thermique. La sensibilité de cette sonde est de l'ordre de  $35 \cdot 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ , ce qui correspond à une variation de fréquence de  $10^3$  hertz par degré centigrade, à la fréquence de résonance de 28 MHz (partiel 3).

Un but de l'invention est de diminuer le temps de réponse d'une sonde de température.

Un autre but de l'invention est d'augmenter la précision de mesure de la température.

L'invention a pour objet une sonde de température utilisant une lame de quartz dans un dispositif générateur de fréquence, ladite lame étant taillée selon une coupe à double rotation et servant de substrat à la propagation d'une onde de surface dont la direction de propagation, dans un plan de coupe OX"Z" obtenu par double rotation d'un plan OXZ défini par un axe électrique OX et l'axe optique OZ du quartz, est différente de l'axe OX".

D'autres caractéristiques et avantages ressortiront de la description qui va suivre d'exemples de réalisation de l'invention illustrés par les figures annexées dans lesquelles :

- la figure 1 représente la rotation d'un trièdre de référence du quartz dans une coupe à double rotation,
- 30 - la figure 2 représente l'orientation de la direction de propagation d'une onde de surface dans une lame à double rotation,
- la figure 3 représente un premier type d'une sonde de température de l'invention,
- la figure 4 représente un second type d'une sonde de température de l'invention,

- la figure 5 représente un troisième type d'une sonde de température de l'invention,
- la figure 6 représente un quatrième type d'une sonde de température de l'invention,
- 5 - les figures 7 à 10 représentent différents modes de montage dans un boîtier d'une lame de quartz d'une sonde de température de l'invention,
- la figure 11 représente une courbe fréquence-température d'une sonde de température.
- 10 La sonde de température objet de l'invention est basée sur les propriétés des cristaux de quartz, propriétés particulièrement intéressantes pour les applications des résonateurs ou des lignes à retard dans les oscillateurs ; les principales propriétés sont leur grande pureté et leur bonne stabilité chimique ainsi que leur 15 grande élasticité.
- La structure anisotrope du quartz permet d'agir, par un choix des orientations angulaires, sur la caractéristique "fréquence-température". Ainsi, la coupe ST est telle que la courbe de la fréquence en fonction de la température est parabolique, la température d'inversion étant 20 voisine de + 20°C. Les lames obtenues selon une telle coupe, à simple rotation, sont utilisées dans les dispositifs à ondes de surface.
- La caractéristique "fréquence-température" d'un cristal de quartz est représentée correctement sur une plage assez large de températures par un polynôme du troisième degré :

$$25 \quad f(T) = f(T_0) \left[ 1 + \alpha_f^{(1)} \cdot (T-T_0) + \alpha_f^{(2)} \cdot (T-T_0)^2 + \alpha_f^{(3)} \cdot (T-T_0)^3 \right]$$

où  $T_0$  est la température de référence

$\alpha_f^{(1)}$ ,  $\alpha_f^{(2)}$ ,  $\alpha_f^{(3)}$  sont les coefficients de température du premier, deuxième et troisième ordre de la fréquence.

On trouvera une étude des coefficients et de la variation de 20 la fréquence en fonction de la température dans l'article de D. HAUDEN, M. MICHEL, J.J. GAGNEPAIN, "High order temperature coefficients of quartz SAW oscillators", Proceedings of 32 nd annual Symposium on Frequency Control, may 1978.

Une lame de quartz présentant une réponse en fréquence idéale en fonction de la température doit être telle que les coefficients

(2)      (3)  
 $\alpha_f$  et  $\beta_f$  soient nuls ; dans ce cas, la caractéristique "fréquence-  
température" est parfaitement linéaire.

5      Les demanderesses ont trouvé que les deux degrés de liberté,  
les angles  $\phi$  et  $\theta$ , définissant une coupe à double rotation du quartz  
permettaient d'obtenir des lames dont les coefficients du second  
et troisième ordre avaient des valeurs plus faibles que pour des  
lames à simple rotation ; de plus, il est possible de diminuer encore  
10     la valeur de ces coefficients en choisissant une direction de propaga-  
tion des ondes de surface différente de celle d'un axe  $OX''$  obtenu  
par rotation d'un angle  $\phi$  d'un axe électrique du cristal autour de  
son axe optique  $OZ$ .

La figure 1 représente la rotation du trièdre de référence  $OXYZ$   
15     dans une coupe à double rotation.

le trièdre de référence est défini par l'axe optique  $OZ$  du  
cristal, par un axe électrique  $OX$  et par un axe mécanique  $OY$  faisant  
un angle de  $90^\circ$  avec l'axe  $OX$ .

20     L'angle  $\phi$  correspond à une rotation du trièdre de référence  
autour de l'axe  $OZ$  ; on obtient le trièdre  $OX'Y'Z'$ .

L'angle  $\theta$  correspond à une rotation du trièdre  $OX'Y'Z'$  autour  
de l'axe  $OX'$  ; on obtient ainsi le trièdre  $OX''Y''Z''$ , avec l'axe  $OX''$   
confondu avec l'axe  $OX'$ . Le plan de coupe, donc le plan des lames  
est le plan  $OX''Z''$ .

25     La figure 2 représente l'orientation de la direction de propa-  
gation  $D$  d'une onde de surface dans une lame  $L$  à double rotation,  
munie de deux transducteurs 1 et 2.

La direction de propagation  $D$  fait un angle  $\psi$  avec l'axe  $OX''$ ,  
dans le plan  $OX''Z''$ .

30     Les angles  $\phi$ ,  $\theta$  et  $\psi$  sont les notations de la convention  
IEEE de 1949.

Les demanderesses ont mis en évidence une orientation pour  
laquelle les coefficients du deuxième et troisième ordre sont nuls,  
aux imprécisions de mesure près, bien entendu ; les valeurs correspon-

dantes des angles  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  sont les suivantes :

$$\phi = 11^\circ 24'$$

$$\theta = 59^\circ 24'$$

$$\psi = 35^\circ$$

5 Une lame métallisée, dont les orientations ont les valeurs indiquées ci-dessus, présente un coefficient de température de  $30 \cdot 10^{-6} /^\circ\text{C}$  ; une telle lame métallisée sera appelée lame LST (Linéairement sensible à la température).

10 Les lames LST peuvent être soit du type ligne à retard, soit du type résonateur, ces deux types étant très connus.

La ligne à retard à onde de surface est constituée par deux transducteurs constitués chacun par deux peignes interdigités, métalliques, déposés sur une face du substrat piézoélectrique. Les transducteurs étant bidirectionnels, les ondes de surface sont émises dans les 15 directions opposées ; une matière absorbante élimine les ondes émises vers l'extérieur du substrat.

Le résonateur comporte un transducteur et un réflecteur de chaque côté du transducteur qui est généralement lui même constitué par deux peignes interdigités.

20 Les peignes sont orientés sur la lame de quartz, tant pour la ligne à retard que pour le résonateur, de manière à obtenir une direction de propagation de l'onde de surface faisant un angle  $\psi$  avec l'axe OX", comme représenté figure 2.

La réalisation d'une ligne à retard, ou d'un résonateur est 25 classique et bien connue. Les lames de quartz sont taillées et mesurées selon les techniques habituelles. On se rapportera pour l'orientation et la mesure des lames à l'article de J. CLASTRE, C. PEGEOT et P.Y LEROY : "Gonometric Measurements of the angles of cut of Doubly Rotated Quartz Plates". Proceedings of the 32 nd Annual Symposium on Frequency Control, US Army Electronic Command, Ft Monmouth, New Jersey - 1978.

30 Les peignes et réflecteurs sont ensuite obtenus par les techniques habituelles, et notamment par photogravure.

Une sonde de température de l'invention est essentiellement 35 un dispositif générateur de fréquence réalisé à l'aide d'une lame LST, celle-ci étant utilisée soit en bouclage sur un amplificateur, soit en asservissement de phase d'un générateur de fréquence, d'un synthé-

- 6 -

tiseur ou d'un oscillateur local de type VCO. La réponse en température de la sonde de température est obtenue en traçant sa caractéristique fréquence-température.

La figure 3 représente schématiquement une sonde de température de l'invention comportant une ligne à retard 3 aux bornes d'un amplificateur 4, et un amplificateur de sortie 5. Les transducteurs 1 et 2 de la ligne à retard 3 sont reliés à la sortie et à l'entrée de l'amplificateur 4, respectivement. La ligne à retard 3 et l'amplificateur 4 constituent un oscillateur de type connu.

Les conditions d'oscillation sont remplies si le gain de l'amplificateur 4 est suffisant pour compenser les pertes et si la phase totale de la boucle d'oscillation est égale à un multiple entier de  $2\pi$ .

On doit donc avoir  $\varphi_A + \varphi_L = 2k\pi$ ,  
 15  $\varphi_A$  étant le déphasage introduit par l'amplificateur 4, les circuits d'adaptation et les transducteurs.

$\varphi_L$  étant le déphasage du au retard de la ligne 3.

La stabilité relative de l'oscillateur est de l'ordre de quelque  $10^{-9}$  sur la seconde.

La figure 4 représente une sonde de température dans laquelle la ligne à retard 3 est utilisée dans une boucle d'asservissement de phase d'un générateur de fréquence 7 qui peut également être un synthétiseur ou un oscillateur du type VCO. La sortie du générateur de fréquence 7 est reliée à un amplificateur de sortie 5, au transducteur 1 de la ligne à retard et à une entrée d'un comparateur de phase 8 dont une autre entrée est reliée au transducteur 2 de la ligne à retard ; la sortie du comparateur de phase 8 est reliée à travers un amplificateur 9 à une entrée de commande du générateur de fréquence 7. Le comparateur de phase délivre un signal qui est fonction du déphasage entre le signal de sortie du générateur de fréquence 7 et ce même signal retardé par la ligne à retard 3 ; le retard apporté par la ligne à retard est lui même fonction de la température. En effet, les variations de température provoquent une modification d'une part de la distance entre les transducteurs (parcours de l'onde de surface) et d'autre part de la vitesse de propagation de l'onde par suite des variations des modules élastiques du quartz.

Il s'ensuit une variation du retard entre l'entrée et la sortie de la ligne à retard, donc de la fréquence de synchronisme de la ligne. Dans le cas d'une lame LST, cette variation suit une loi quasi linéaire en fonction de la température.

5 La figure 5 représente une sonde de température utilisant un résonateur. Cette figure est identique à la figure 3 dans laquelle la ligne à retard est remplacée par le résonateur 10, comportant deux peignes 11 et 12, interdigités, et deux réflecteurs 13 et 14 ; les peignes 11 et 12 sont représentés ici schématiquement. L'amplificateur 4 est relié en entrée au peigne 12 et en sortie au peigne 11 et à l'amplificateur de sortie 5.

La figure 6 représente une sonde de température dans laquelle le résonateur 10 est utilisé dans une boucle d'asservissement de phase d'un générateur de fréquence 7 qui peut être également un synthétiseur ou un oscillateur du type VCO. La sortie du générateur de fréquence 7 est reliée à un amplificateur de sortie 5, au peigne 11 du résonateur 10, et à une entrée du comparateur de phase 8 dont une autre entrée est reliée au peigne 12 du résonateur ; la sortie du comparateur de phase 8 est reliée à travers un amplificateur 9 15 à une entrée de commande du générateur de fréquence 7.

Les figures 7 et 8 représentent un premier mode de réalisation d'un montage dans un boîtier d'une lame de quartz d'une sonde de température de l'invention, la figure 7 étant une vue en élévation en coupe selon la coupe VII-VII de la figure 8 qui est une vue de dessus en coupe, selon la coupe VIII-VIII de la figure 7.

Une lame de quartz 3 d'une ligne à retard est collé par une face sur un boîtier 15 métallique, une autre face, opposée, portant les peignes 1 et 2. Le boîtier est fermé par un couvercle 16, également métallique, soudé sur le boîtier 15. Le couvercle comporte un trou 30 17 qui permet de faire le vide dans l'enceinte formée par le boîtier et le couvercle, et de remplir ensuite cette enceinte de gaz, tel que l'hélium par exemple ; le trou 17 est ensuite obturé, par une goutte de soudure 18, par exemple. Deux bornes 19, 20 métalliques, sont isolées électriquement du boîtier par une perle de verre 21, 35 22 respectivement, qu'elles traversent ; la borne 19 est reliée à un peigne du transducteur 2 dont l'autre peigne est relié au boîtier ;

- 8 -

la borne 20 est reliée à un peigne du transducteur 1 dont l'autre peigne est relié au boîtier. Les bornes servent au raccordement des transducteurs.

La figure 9 est une vue en élévation et en coupe, d'un deuxième mode de réalisation du montage d'une lame de quartz d'une sonde de température.

Dans cette figure un boîtier 25, métallique est muni d'un clinquant métallique 24 en cuivre au nickel, par exemple, d'épaisseur faible, de l'ordre de 0,05 millimètre, sur lequel la lame de quartz 3 d'une ligne à retard est soudée. Le boîtier comporte également, comme dans les figures 7 et 8 deux bornes isolées du boîtier, dont une seule 19 est visible.

Le boîtier comporte deux bornes auxiliaires, dont une seule 26 est visible ; elle est reliée d'une part à un peigne d'un transducteur, et d'autre part à la borne 21 par une courte liaison en fil inox qui réalise une coupure thermique entre le peigne et la borne 19. Les bornes auxiliaires 26 sont isolées du boîtier par une perle de verre 27 ; la borne auxiliaire 26 ne traverse pas la perle de verre 27, et ne communique pas avec l'extérieur. Un peigne de chacun des transducteurs est relié au boîtier qui est fermé par un couvercle 28 dont un trou 29 pour le pompage et le remplissage par un gaz, de l'hélium par exemple, est obturé par une goutte de soudure 30.

La figure 10 est une vue en élévation et en coupe d'un troisième mode de réalisation du montage d'une lame de quartz d'une sonde de température.

Dans cette figure la lame de quartz 3, qui est une ligne à retard, constitue le fond d'un boîtier 31 auquel elle est soudée par sa périphérie. Comme précédemment, figure 7, le boîtier comporte deux bornes 19, chacune reliée à un peigne d'un transducteur dont l'autre peigne est relié au boîtier fermé par un couvercle 32, dont un trou 33 est obturé par une goutte de soudure 34.

Dans les figures 7 à 10, on a supposé que la lame de quartz est une ligne à retard ; bien entendu on peut utiliser un résonateur, et dans ce cas les bornes 19, 20 du boîtier (figure 8) sont réunies chacune à un peigne, respectivement, du transducteur du résonateur,

et il n'y a bien évidemment pas de connexion entre les peignes et le boîtier.

Les sondes de température de l'invention ont une inertie thermique faible, la lame de quartz étant soit collée par une face sur un métal bon conducteur de la chaleur, tel le cuivre par exemple, (comme illustré figures 7 à 9) soit en contact direct avec le milieu dont on désire mesurer la température (figure 10). Le temps de propagation de la chaleur dans le quartz étant faible, inférieur à un dixième de seconde, le temps de réponse de la lame de quartz, donc de la sonde de température est faible et fixé essentiellement par la capacité thermique du boîtier ; cette capacité thermique est d'autant plus faible que le boîtier est plus petit ; le contact intime de la lame de quartz avec le boîtier permet d'obtenir des boîtiers notamment plus petits que les boîtiers enfermant des lames de quartz à onde de volume.

D'autre part la lame de quartz étant d'autant plus petite que la fréquence est élevée, il s'ensuit une diminution des dimensions du boîtier.

Une sonde de température conforme à l'invention, utilisant la propagation des ondes en surface d'un substrat de quartz, permet des mesures à fréquence élevée, jusqu'à 3 gigahertz, ce que ne permettent pas les sondes de température connues utilisant la propagation des ondes dans le volume du substrat.

La résolution des dispositifs de mesure de fréquence étant limitée, la précision de mesure, à une température donnée, est d'autant meilleure que la fréquence est élevée.

La figure 11 représente, à titre d'exemple, la courbe de réponse "fréquence-température d'une sonde de température pour une fréquence de l'ordre de 93 MHz.

La gamme de température est ici de - 15°C à + 100°C. La sensibilité est de l'ordre de  $28 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , soit 2720 Hz/ $^\circ\text{C}$  à 93 MHz. Le défaut de linéarité maximum mesuré est de l'ordre de 0,1°C dans la gamme des températures de 0°C à + 80°C.

Les sondes de températures décrites et représentées sont utilisables d'une part dans des thermomètres de bonnes performances pour des mesures rapides de la température, et d'autre part comme élément sensible à la température pour des thermostats de grande qualité.

- 10 -

Deux types de thermomètres peuvent être réalisés :  
un thermomètre à lecture analogique et un thermomètre à lecture numérique.

Dans l'application aux thermostats, une sonde de température  
5 de l'invention permet de réaliser un thermostat numérique à micro-  
processeur, la précision pouvant atteindre quelques micro-degrés  
centigrades, ou un thermostat analogique à asservissement de phase,  
d'un oscillateur du type VCO en étage mélangeur donnant une précision  
de l'ordre du micro-degré centigrade par variation continue.

## REVENDICATIONS

- 1/ Sonde de température utilisant une lame de quartz dans un dispositif générateur de fréquence, caractérisé par le fait que la lame de quartz est taillée selon une coupe à double rotation, qu'elle
- 5 sert de substrat à la propagation d'une onde de surface dont la direction de propagation, dans un plan de coupe OX"Z" obtenu par double rotation d'un plan OXZ défini par un axe électrique OX et l'axe optique OZ du quartz, est différente de l'axe OX", et qu'elle présente une caractéristique fréquence température quasi linéaire.
- 10 2/ Sonde de température selon la revendication 1, caractérisée par le fait que la lame de quartz est taillée selon une coupe à double rotation définie par un angle de première rotation  $\phi$  égal à  $11^{\circ}24'$  et un angle de seconde rotation  $\theta$  égal à  $59^{\circ}24'$ , et que la direction de propagation de l'onde de surface fait un angle  $\psi$  de  $35^{\circ}$  avec
- 15 l'axe OX".
- 3/ Sonde de température selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisée par le fait que la lame de quartz comporte sur une face des métallisations constituant une ligne à retard.
- 4/ Sonde de température selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisée par le fait que la lame de quartz comporte sur une face des métallisations constituant un résonateur.
- 20 5/ Sonde de température selon la revendication 1, caractérisée par le fait que la lame de quartz est enfermée dans un boîtier et qu'elle est en contact thermique étroit avec au moins une partie métallique
- 25 du boîtier elle-même en contact thermique avec le milieu dont on mesure la température.
- 6/ Sonde de température selon la revendication 1, caractérisée par le fait que la lame de quartz est enfermée dans un boîtier et que la réponse thermique de l'ensemble ainsi constitué est d'autant plus
- 30 faible que les dimensions dudit ensemble sont plus faibles lorsque la fréquence est élevée.
- 7/ Sonde de température selon la revendication 1, caractérisée par le fait que la limite supérieure de la fréquence est de 3 gigahertz.
- 8/ Sonde de température selon la revendication 7, caractérisée par
- 35 le fait que la précision de mesure à une température est d'autant meilleure que la fréquence est grande, du fait de la résolution limitée des dispositifs de mesure de la fréquence.

- 12 -

- 9/ Sonde de température selon la revendication 1, caractérisée par le fait que la lame de quartz est associée à un amplificateur pour constituer un générateur de fréquence.
- 10/ Sonde de température selon la revendication 1, caractérisée par le fait que la lame de quartz est insérée dans une boucle d'asservissement d'un générateur de fréquence.
- 5

1/4

FIG.1

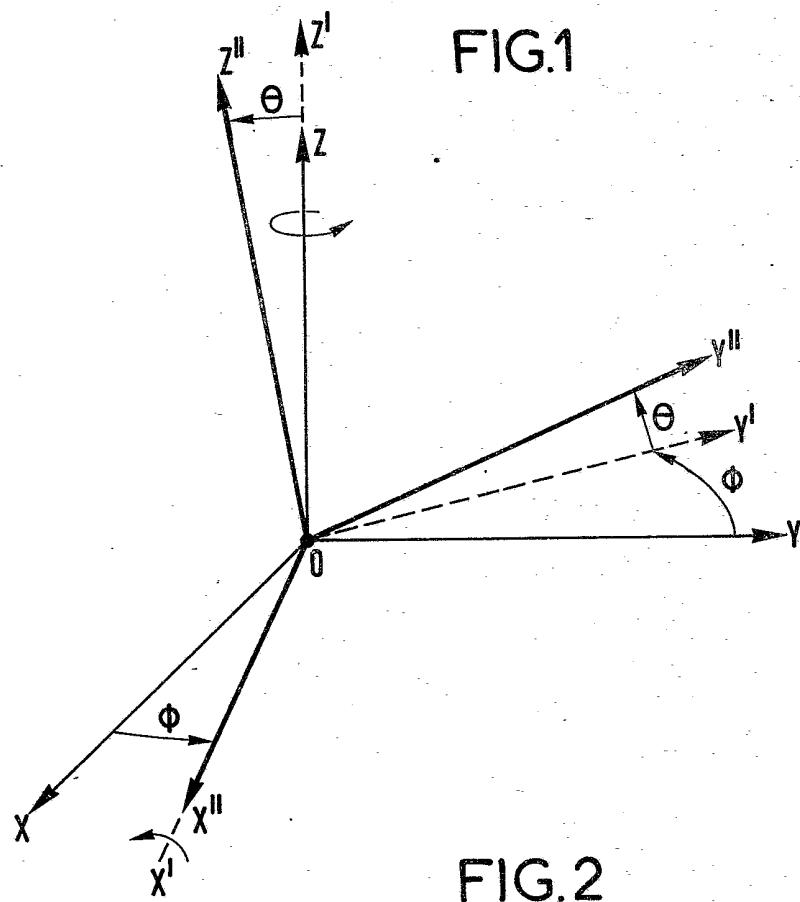
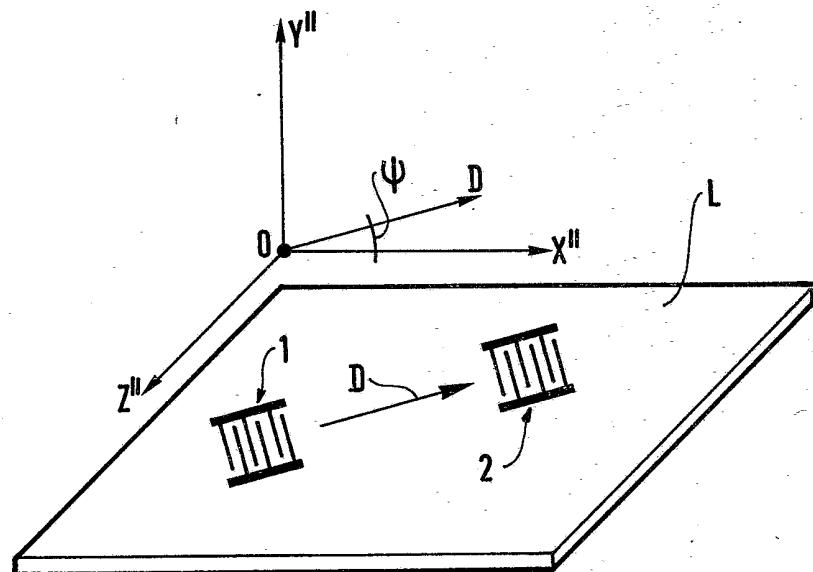


FIG.2



2/4

FIG.3

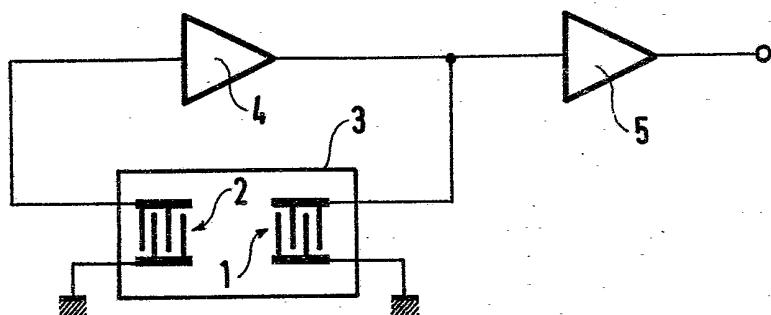


FIG.4

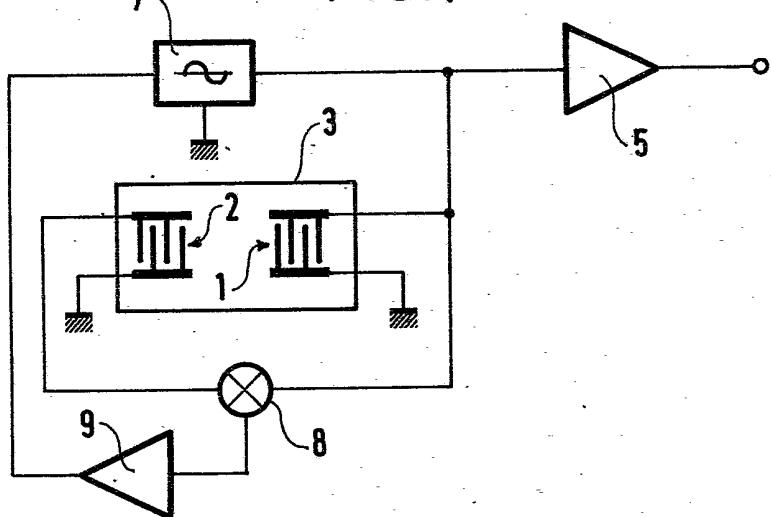


FIG.5

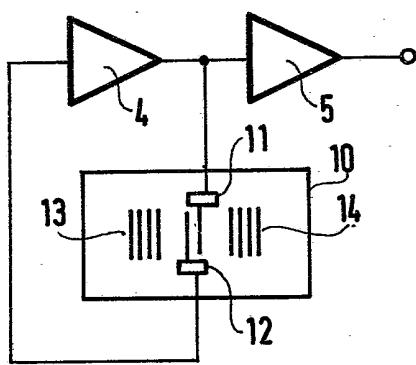
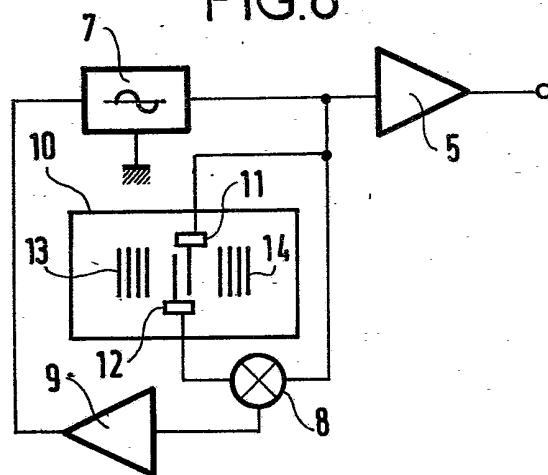


FIG.6



3/4

FIG.7

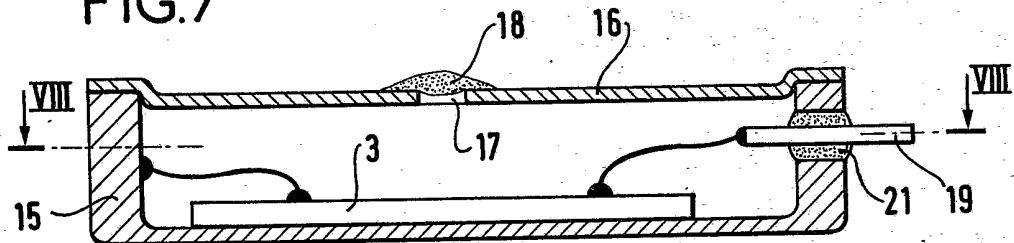


FIG.8

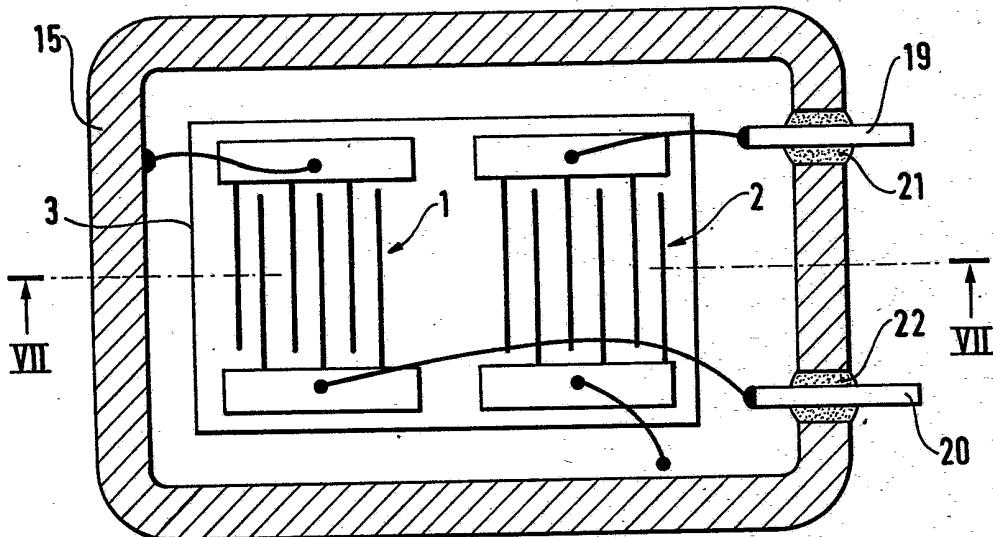


FIG.9

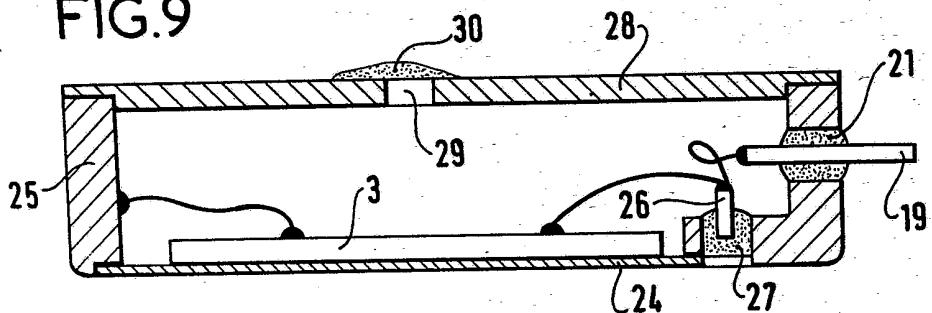
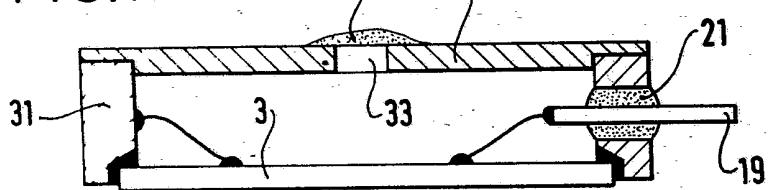


FIG.10



2483076

4/4

FIG.11

