

⑫ **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

⑲ Numéro de dépôt: **82401394.0**

⑤① Int. Cl.<sup>3</sup>: **H 04 R 17/00**

⑳ Date de dépôt: **27.07.82**

③① Priorité: **11.08.81 FR 8115507**

⑦① Demandeur: **THOMSON-CSF, 173, Boulevard Haussmann, F-75379 Paris Cedex 08 (FR)**

④③ Date de publication de la demande: **16.02.83**  
**Bulletin 83/7**

⑦② Inventeur: **Ravinet, Pierre, THOMSON-CSF SCPI 173, bid Haussmann, F-75379 Paris Cedex 08 (FR)**  
Inventeur: **Micheron, François, THOMSON-CSF SCPI 173, bid Haussmann, F-75379 Paris Cedex (FR)**

⑥④ Etats contractants désignés: **DE IT NL SE**

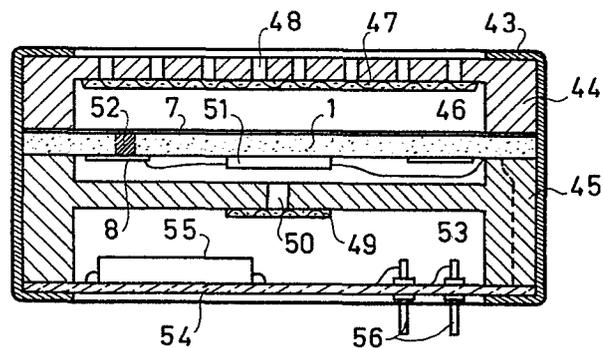
⑦④ Mandataire: **Wang, Pierre et al, THOMSON-CSF SCPI 173, Bld Haussmann, F-75379 Paris Cedex 08 (FR)**

⑥④ **Transducteur électroacoustique à condensateur à diélectrique solide polarisé.**

⑥⑦ L'invention se rapporte aux microphones à condensateur à diélectrique solide polarisé. La structure vibrante soumise à la pression acoustique comporte des électrodes (7, 8) recueillant les charges électriques induites sur les faces du diélectrique polarisé. Ces électrodes sont reliées à un circuit électrique adaptateur d'impédance (51).

L'invention a pour objet un microphone dont la structure vibrante (1) est une plaque plane travaillant en flexion faible et attachée par son bord à un support (44, 45).

L'invention s'applique notamment aux microphones à pression et à gradient de pression pour les applications téléphoniques.



TRANSDUCTEUR ELECTROACOUSTIQUE A CONDENSATEUR  
A DIELECTRIQUE SOLIDE POLARISE

L'invention se rapporte aux microphones et hydrophones dans lesquels la pression acoustique agit directement sur une structure vibrante du type condensateur à diélectrique solide polarisé électriquement. Les microphones à condensateur utilisant un diélectrique solide polarisé électriquement sont  
5 généralement constitués par un ou plusieurs films diélectriques revêtus d'électrodes. En fonction des tensions mécaniques de traction ou de compression résultant de la déformation élastique induite par la pression acoustique incidente, des charges électriques sont créées par effet piézo-électrique ou par excès de charge électrique. Pour obtenir un effet  
10 transducteur linéaire, il faut que la charge électrique induite varie exactement comme la pression acoustique incidente. L'utilisation d'une membrane plane résistant à la déformation du seul fait des tensions d'extension produites par l'accroissement de sa surface à l'intérieur d'un contour rigide de montage ne permet pas d'obtenir une réponse linéaire en amplitude, sauf  
15 lorsque la membrane est une structure bimorphe. En effet, la déformée d'un film homogène en dehors du plan crée des tensions d'extension quel que soit le côté du film sur lequel s'exerce la poussée. Pour pallier cet inconvénient, on peut donner à un film homogène une forme enveloppante qui en se dilatant et en se contractant sous l'effet de la pression acoustique produira  
20 des tensions alternées. Cependant, la mise en forme d'un film présente aussi des inconvénients, notamment en ce qui concerne la stabilité dans le temps de la forme ce qui a des repercussions sur les caractéristiques électro-acoustiques.

La compliance mécanique d'une structure vibrante de microphone  
25 intervient dans le fonctionnement, car elle fixe la fréquence de résonance et de ce fait la limite supérieure de la bande de fréquence reproduite à niveau constant. Dans le cas d'un microphone omnidirectionnel, on doit faire en sorte que la face arrière de la membrane ne soit pas soumise à la pression acoustique et à cet effet, on monte la membrane dans un boîtier rigide de  
30 façon à lui faire comprimer un certain volume d'air. La rigidité de la structure vibrante est donc renforcée par la présence du volume d'air, mais

comme le travail de déformation est en partie emmagasiné dans un milieu dépourvu de propriétés transductrices, la sensibilité du microphone est moindre que si sa membrane était le seul organe résistant à la pression acoustique. L'influence d'un coussin d'air chargeant une membrane est  
5 prépondérante lorsque celle-ci est très souple, lorsque sa surface est importante et lorsque le volume d'air comprimé est réduit.

A cela il faut ajouter qu'une membrane souple de grande surface est généralement mince, si bien que le condensateur formé par cette membrane équipée d'électrodes présente une capacité électrique élevée. Selon les lois  
10 de l'électrostatique, la différence de potentiel d'un condensateur chargé est proportionnelle aux charges portées par les plateaux et inversement proportionnelle à la capacité. La tension à vide délivrée par un microphone à membrane mince est donc relativement faible, d'où la nécessité de prévoir une amplification de tension et un blindage efficace contre les champs  
15 électriques perturbateurs.

Les phénomènes de piézoélectricité ont fait l'objet d'études nombreuses montrant que parallèlement à la piézoélectricité intrinsèque définie comme on le sait par un tenseur de rang trois et impliquant que le matériau considéré n'ait pas la structure centrosymétrique, il existe une piézo-  
20 électricité de flexion. La polarisation électrique induite par la piézoélectricité de flexion est déterminée par les coefficients piézoélectriques d'un tenseur de rang quatre et se manifeste lorsqu'il existe un gradient de contrainte au sein du matériau soumis à déformation. A l'inverse de la piézoélectricité intrinsèque, la piézoélectricité de flexion n'implique pas  
25 d'anisotropie structurelle ou électrique préalable du matériau sollicité mécaniquement car c'est la sollicitation inhomogène qui crée le défaut de structure donnant naissance macroscopiquement à la polarisation électrique induite. Néanmoins l'expérience montre que les manifestations de la piézoélectricité de flexion sont sensiblement accrues lorsque le matériau consi-  
30 déré a reçu une anisotropie électrique de type polaire ou par excès de charge.

La simple reconnaissance de la piézoélectricité de flexion et sa mesure font partie intégrante de l'état de la technique tel qu'illustré par l'article de BREGER et al ayant pour titre "BENDING PIEZOELECTRICITY

IN POLYVINYLIDENE FLUORIDE" et paru aux pages 2239 et 2240 de la revue : "Japan J. APPL. PHYS. Vol. 15 (1976), N° 11."

En vue de pallier aux inconvénients énumérés ci-dessus, la présente invention vise à appliquer la piézoélectricité de flexion à une structure de  
5 microphone à condensateur à diélectrique solide polarisé.

Plus précisément, l'invention a pour objet un transducteur électro-acoustique à condensateur à diélectrique solide polarisé comprenant au moins deux électrodes collectrices, une structure vibrante faite dudit diélectrique et soumise à la pression acoustique incidente et un support  
10 auquel ladite structure vibrante est attachée par ses bords ; lesdites électrodes collectrices étant portées par ladite structure vibrante et reliées respectivement à deux bornes de sortie, caractérisé en ce que ladite structure vibrante est une structure plane en forme de plaque suffisamment épaisse pour que le feuillet moyen ne subisse aucune déformation signifi-  
15 cative pendant la flexion de ladite plaque.

L'invention sera mieux comprise au moyen de la description ci-après et des figures annexées parmi lesquelles :

Les figures 1 à 6 sont des figures explicatives.

La figure 7 est une coupe méridienne d'une première variante de  
20 réalisation d'un microphone selon l'invention.

La figure 8 est une vue isométrique partielle d'une seconde variante de réalisation d'un microphone selon l'invention.

La figure 9 est un schéma électrique de circuit amplificateur.

La figure 10 est une coupe méridienne d'une troisième variante de  
25 réalisation d'un microphone selon l'invention.

La figure 11 représente un détail de réalisation de microphone à plaque vibrante selon l'invention.

La figure 12 représente un détail de réalisation de microphone à plaque vibrante selon une autre variante de l'invention.

30 La figure 13 représente un détail de réalisation de microphone à plaque vibrante selon encore une autre variante de l'invention.

La figure 14 est une vue en coupe d'un microphone à circuit adaptateur d'impédance intégré.

Sur la figure 1, on peut voir deux coupes méridiennes (a) et (b)

correspondant respectivement à des structures élastiques encastrées sur leur pourtour 2. La structure représentée en (a) est une plaque 1 plane d'épaisseur  $e_1$  tandis que la structure représentée en (b) est une membrane plane 3 d'épaisseur  $e_2$  sensiblement inférieure à  $e_1$ .

5 En supposant ces structures de même rayon  $R$  soumises à la même pression acoustique  $p$ , on voit que la flèche  $\Delta Z_1$  prise par la déformée 4 de la plaque 1 est inférieure à l'épaisseur  $e_1$  alors que la flèche  $\Delta Z_2$  prise par la déformée 5 de la membrane 3 est nettement supérieure à  $e_2$ .

10 Une remarque immédiate s'impose en ce qui concerne la résistance mécanique à la pression. En effet, si la pression  $p$  augmente la plaque pourra se comporter comme une membrane et si la pression  $p$  diminue c'est la membrane qui pourra avoir le comportement d'une plaque.

Dans le cadre de la présente invention, cette indétermination est levée, car on va faire appel à une plaque déformable soumise directement à la pression acoustique. Or, la valeur la plus forte de la pression acoustique qu'a à subir l'élément récepteur d'un microphone correspond à un niveau d'intensité sonore de 125 dB au-dessus du seuil d'audibilité fixé à  $2 \cdot 10^{-5}$  Pascal, soit une pression maximale de l'ordre de 35 Pascal. La flèche  $w_0$  au centre d'une plaque circulaire encastrée de hauteur  $h$  et de rayon  $R$  soumise à une pression  $p$  est donnée par la théorie approchée des plaques à flexion faible par la formule :

$$\frac{w_0}{h} = \frac{3}{16} \cdot p \cdot \frac{1 - \nu^2}{E} \left(\frac{R}{h}\right)^4$$

25 avec comme condition de validité :  $\frac{w_0}{h} \leq 0,1$ .

On peut donc évaluer le rapport  $\frac{R}{h}$  à ne pas dépasser pour un matériau élastique déterminé.

30 En prenant par exemple un matériau relativement peu rigide comme le polyfluorure de vinylidène (PVF<sub>2</sub>) qui présente un module d'élasticité  $E = 3,5 \cdot 10^9 \text{ N.m}^{-2}$  et un coefficient de Poisson  $\nu = 0,3$ , on trouve que la pression  $p = 35 \text{ Pa}$  fixe un rapport  $\frac{R}{h} \leq 100$ .

Ainsi, une structure encastrée circulaire de rayon  $R = 10 \text{ mm}$  satisfait au critère de flexion faible si son épaisseur  $h$  est au moins égale à

100  $\mu\text{m}$ . Un matériau céramique piézoélectrique du type PZT vingt fois plus rigide que le  $\text{PVF}_2$  conduit à une épaisseur minimale moitié moindre selon le même critère. Cependant, il faut signaler que la permittivité de la céramique PZT, est cent fois plus élevée que celle du  $\text{PVF}_2$  ce qui signifie que la tension à vide d'une capsule microphonique en céramique est, toutes choses égales par ailleurs, cent fois plus faible.

Les céramiques piézoélectriques et les cristaux intrinsèquement piézoélectriques sont plutôt réservés à la détection microphonique de pressions acoustiques très élevées ou à fréquence ultrasonique.

10 L'analyse de l'effet piézoélectrique qui va suivre revient à considérer le travail de déformation élastique au sein d'un matériau polarisé, à déduire des contraintes engendrées par la pression acoustique les densités de charge électriques induites en surface et à voir comment ces densités de charge sont collectées par des électrodes.

15 En ce qui concerne le travail de déformation élastique, les notions de plaque et de membrane sont nettement distinctes, même s'il faut faire appel à un critère de classement basé sur la flexion faible. En effet, le travail de déformation d'une structure élastique se décompose en plusieurs termes qui font intervenir les tensions de dilatation, de flexion et de cisaillement. Si  $W$  est le travail de déformation total et si  $W_T$  représente la fraction de ce travail correspondant aux seules tensions de dilatation, on peut caractériser

la structure représentée en (a) sur la figure 1 par un rapport  $\frac{W - W_T}{W_T}$  très

25 supérieur à l'unité, car les tensions de dilatation jouent peu de rôle dans la résistance de la plaque à la pression acoustique. Au contraire, la structure

représentée en (b) sur la figure 1 présente un rapport  $\frac{W - W_T}{W_T}$  voisin de

30 l'unité si la flèche  $\Delta Z_2$  est proche de l'épaisseur  $e_2$  et qui tend vers zéro lorsque la membrane 5 devient infiniment mince, car alors elle est dépourvue de rigidité à la flexion.

Un autre moyen d'établir une distinction entre plaque plane et membrane plane consiste à remarquer que les tensions de dilatation ne

changent pas de signe lorsque la poussée sur une membrane s'inverse en présence d'une pression acoustique alternative. Par contre, les autres tensions qui correspondent au travail  $W - W_T$  changent de signe en accord avec la sollicitation alternée. Il en résulte une plus ou moins grande non  
5 linéarité de l'effet transducteur électroacoustique qui fixe la part prise par les diverses tensions mécaniques dans la résistance élastique à la pression acoustique incidente.

La piézoélectricité peut se manifester sous deux formes distinctes qui sont la piézoélectricité intrinsèque et la piézoélectricité de flexion. La  
10 piézoélectricité intrinsèque implique que le matériau soumis à déformation ait des propriétés assimilables à celle d'un corps cristallin d'une classe non centrosymétrique. C'est le cas des matériaux polymères polaires tels que le polyfluorure de vinylidène polarisé. Par contre, la piézoélectricité de flexion peut exister dans tout corps diélectrique, car elle est imputable à la  
15 formation de moments dipolaires en présence de gradient de tension mécanique. L'intensité avec laquelle la piézoélectricité de flexion peut se manifester est notablement accrue lorsque le matériau est électriquement polarisé par excès de charge (électret) ou par création d'une phase polaire à l'échelle macroscopique.

20 Sur la figure 2, on peut voir un dispositif expérimental permettant de défalquer l'une de l'autre les deux formes de piézoélectricité. Ce dispositif comporte une poutre 6 à section prismatique par exemple en polyfluorure de vinylidène polarisé parallèlement à l'axe Z. Cette poutre est portée à une extrémité par un encastrement 2 et on peut la faire fléchir en lui appliquant  
25 à l'autre extrémité une force F de direction parallèle à l'axe Z. L'axe longitudinal de la poutre OX forme avec un axe OY et l'axe OZ un trièdre trirectangle ; les chiffres entre parenthèses désignent ces axes selon l'usage en cristallographie. Les faces de la poutre 6 normales à l'axe Z portent deux électrodes 7 et 8 formant condensateur. Ces électrodes sont reliées à des  
30 bornes 9 et 10 entre lesquelles apparaît une tension électrique V. L'état de tension dans la section droite 13 de la poutre est représenté par une distribution triangulaire à centre nul 12 qui représente les tensions de flexion. La longueur de la poutre encastree 6 est L et le système d'électrodes 7 et 8 se situe à l'abscisse variable  $x = -l$ . Les faces de la poutre 6

portant les électrodes 7 et 8 ont pour équations :  $Z = h$  et  $Z = -h$  et leur largeur est égale à  $b$ .

En un point courant  $C$  de coordonnées  $X, Y, Z$  de la poutre 6, les composantes non nulles du tenseur de contrainte sont :

5

$$X_1 = \frac{3}{2} \frac{F}{bh^3} X \cdot Z \quad \text{et} \quad x_5 = - \frac{3}{4} \frac{F}{bh} \left( 1 - \frac{Z^2}{h^2} \right)$$

$X_1$  décrit la distribution 12 à moyenne nulle sur la hauteur  $2h$  de la poutre et  $X_5$  décrit la distribution 11 dont la moyenne  $\bar{X}_5$  sur la hauteur  $2h$  de la poutre est nécessairement égale à  $-\frac{F}{2bh}$ . Aucune tension de dilatation selon  $OX$  n'existe puisque la force  $F$  est perpendiculaire à l'axe de la poutre. La charge électrique  $Q$  induite sur les électrodes 7 et 8 de surface  $S$ , à l'abscisse  $x = -\ell$  correspond à la densité de charge :

15

$$\frac{Q}{S} = d_{35} \bar{X}_5 + f_{3113} \left( \frac{\delta X_1}{\delta Z} \right)_{x = -\ell}$$

Le terme  $d_{35} \bar{X}_5$  représente la densité de charge relative à la piézoélectricité intrinsèque dont on sait que la polarisation induite  $P_i$  est donnée par l'expression tensorielle :

20

$$P_i = d_{ijk} X_{jk}$$

où  $d_{ijk}$  sont les modules piézoélectriques appartenant à un tenseur de rang trois.

25

Le terme  $f_{3113} \left( \frac{\delta X_1}{\delta Z} \right)_{x = -\ell}$  varie en fonction de l'abscisse des électrodes et représente la densité de charge relative à la piézoélectricité de flexion dont on sait que la polarisation induite  $P_i'$  est donnée par l'expression tensorielle :

30

$$P_i' = f_{ijkl} \frac{\delta X_{jk}}{\delta x_l}$$

où  $f_{ijkl}$  sont les modules piézoélectriques appartenant à un tenseur de rang 4 et  $x_l$  la  $l^{\text{ième}}$  coordonnée. Sachant que les coordonnées sont au nombre de trois, le tenseur exprimant la piézoélectricité de flexion renferme 81

modules piézoélectriques non tous nuls quel que soit le matériau diélectrique considéré. Le dispositif de mesure de la figure 1 permet aisément de défalquer l'une de l'autre les deux formes de piézoélectricité.

5 A titre d'exemple, voici quelques valeurs mesurées des modules piézoélectriques de flexion.

Matériau	$f_{3113}$	$f_{3223}$
PVF <sub>2</sub> polarisé	$2 \cdot 10^{-16}$ C.m/N	$0,5 \cdot 10^{-16}$ C.m/N
PVF <sub>2</sub> non polarisé	$0,5 \cdot 10^{-18}$ C.m/N	-

10 Il apparaît donc que toute structure constituée d'un matériau isolant et en état de contraintes inhomogènes est apte à délivrer un signal électrique entre des électrodes qui soit une mesure de sollicitation subie par cette structure.

15 On peut regarder la poutre fléchie de la figure 2 comme illustration des phénomènes qui existent de façon prépondérante dans la plaque 1 de la figure 1.

20 La figure 3 représente un volume élémentaire  $dx, dy, dz$  de plaque au repos (forme cubique) et sous contraintes de flexion pure. Le volume 15 d'épaisseur  $e$  comporte à mi-hauteur un feuillet neutre 16 dont la surface ne varie pas entre l'état de repos et l'état déformé. Moyennant cette hypothèse, on peut calculer pour un feuillet 14 de hauteur  $dZ$  à la distance  $Z$  du feuillet neutre 16  
25 quelles sont les tensions élastiques induites par les courbures  $\rho_x$  et  $\rho_y$  prises par la plaque fléchie. En exprimant l'équilibre du volume de la figure 3, on peut, suivant un raisonnement mathématique connu, aboutir à l'équation différentielle régissant la flexion faible des plaques chargées transversalement.

30 L'hypothèse de flexion faible peut mieux se comprendre au moyen de la figure 4 qui représente la déformation en calotte sphérique de rayon  $\rho$  d'une plaque circulaire plane subissant à sa périphérie un couple de flexion uniforme  $M$ . L'arc  $Ab$  a pour longueur le diamètre  $2a$  de la plaque et son point le plus haut correspond à la flèche  $\delta$ . Ceci est vrai si l'on suppose que

le feuillet moyen ne subit aucune déformation méridienne. On peut donc calculer le rayon  $a_1$  de la flèche circulaire subissant le plus fort raccourcissement circonférentiel. Ce rayon vaut :

$$a_1 = \rho \sin \phi \quad \text{avec} \quad \phi = \frac{a}{\rho}$$

5 la dilatation circonférentielle est donc égale à :  $\epsilon = \frac{a - a_1}{a}$

soit approximativement  $\epsilon = \frac{\phi^2}{6}$

En introduisant la valeur de  $\delta$  qui est approximativement  $\frac{\rho \phi^2}{2}$ ,  
on trouve :  $\epsilon = \frac{\delta}{3\rho}$ .

10 Ceci représente une limite supérieure pour la dilatation du feuillet moyen 16 de la figure 3 qu'il faut comparer aux dilatations au niveau des faces égales à  $\frac{e}{2} \cdot \frac{1}{\rho}$ .

La notion de flexion faible revient alors à supposer négligeable la dilatation du feuillet moyen à mi-hauteur de la plaque par rapport aux dilatations de flexion des faces, ce qui revient à écrire que  $\delta \ll e$ .

15 En pratique, on se limite à  $\delta \leq 0,1 e$ , comme déjà indiqué précédemment.

L'exposé théorique du calcul de la sensibilité d'un microphone à condensateur à diélectrique solide polarisé est beaucoup trop complexe pour  
20 figurer in extenso dans cette description, mais on peut en rappeler les grandes lignes pour le cas d'espèce représenté sur la figure 5. Il s'agit d'une plaque circulaire plane 1 à encastrement périphérique 2 également plan. Des électrodes 7 et 8 recouvrent complètement les faces libres de rayon R de la plaque 1. Sur la coupe méridienne de la figure 5 où l'axe Z est un axe de  
25 révolution, le feuillet moyen de la plaque est représenté par un trait interrompu rectiligne à l'état non déformé. Lorsque la pression acoustique exerce une poussée transversale uniformément répartie, la plaque se déforme selon une courbe à point d'inflexion représentée en pointillé sur la figure 5. Le point courant  $P_0$  du feuillet moyen se déplace en  $P_1$  et le centre de la  
30 plaque présente une flèche  $w_0$  donnée par la formule :

$$w_0 = \frac{3}{16} \cdot p \cdot \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{R^4}{h^3}$$

Le déplacement  $w$  à la distance  $r$  du centre est donné par l'expression :

$$w = w_0 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]^2$$

Sur le diagramme normalisé de la figure 6, on a porté en abscisse le paramètre  $\rho = \frac{r}{R}$  et en ordonnée une échelle normalisée. La courbe 17  
5 représente en fonction de  $\rho$  la loi des déplacements  $w/w_0$  définis par les formules qui précèdent.

Pour calculer la contribution en charges électriques induites, il est nécessaire de connaître les contraintes mécaniques  $X_r$  et  $X_\theta$  présentes dans la plaque déformée. La courbe 18 du diagramme de la figure 6 donne  
10 les valeurs de l'expression  $X_\theta / \frac{k E Z}{1 - \nu^2}$  où  $k$  est donné par l'expression

$$k = \frac{3}{4} p \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{R^2}{h^3} \quad \text{et } \nu = 0,3.$$

$X_\theta$  est la contrainte circonférentielle dans un système de coordonnées cylindriques  $(\theta, r, z)$ .

La courbe 19 du diagramme de la figure 6 donne les valeurs de l'expression  $X_r / \frac{k E}{1 - \nu^2} \cdot z$ .  
15

$X_r$  est la contrainte méridienne.

Il est intéressant de constater qu'en raison de l'hypothèse de flexion faible, les contraintes augmentent linéairement avec  $z$  de part et d'autre du feuillet moyen.

20 En outre, on peut noter que  $\frac{dw}{dr}$  est nul à l'abscisse  $R$ , que la

contrainte  $X_r$  s'annule à l'abscisse  $R \sqrt{\frac{1 + \nu}{3 + \nu}}$  et que la contrainte  $X_\theta$   
s'annule à l'abscisse  $R \sqrt{\frac{1 + \nu}{1 + 3 \nu}}$ .

A partir de la connaissance des contraintes  $X_r$  et  $X_\theta$  qui sont fonction des coordonnées cylindriques  $(\theta, r, z)$ , il faut calculer feuillet par  
25 feuillet la polarisation induite par piézoélectricité intrinsèque et piézoélectricité de flexion. Après intégration suivant  $z$ , on dispose sur les faces

de la plaque d'une densité surfacique de charges qu'il faut encore intégrer dans toute l'étendue des électrodes 7 et 8 pour obtenir la charge totale induite par la pression acoustique.

5 Après des calculs relativement fastidieux qu'il serait inutile de reproduire ici, on peut montrer que les contributions à la charge induite par la piézoélectricité intrinsèque et par la piézoélectricité de flexion sont globalement nulles.

10 L'expérience confirme ce résultat surprenant qu'une plaque plane circulaire à encastrement plan en matériau homogène polarisé transversalement et complètement recouverte sur ses deux faces d'électrodes a une sensibilité quasi nulle comme transducteur piézoélectrique soumis à la pression acoustique.

15 Le déroulement des calculs montre cependant que les charges électriques induites sur les faces de la plaque changent de signe avec la position radiale et que l'annulation globale est le résultat d'une compensation exacte liée à la localisation précise des charges + et - dans l'étendue des faces.

20 Les considérations qui précèdent se traduisent en pratique par l'existence d'une sensibilité exploitable lorsqu'on adopte la configuration en plaque faiblement fléchie. En effet, il existe concrètement des anomalies structurelles qui empêchent que les charges collectées par les électrodes s'annulent exactement. Un léger gondolement d'une plaque, un encastrement imparfait ou une inhomogénéité de structure sont autant de facteurs qui contribuent à l'obtention d'une sensibilité effective.

25 Cette sensibilité naturelle peut se comparer à celle des systèmes microphoniques à membrane mais la supériorité de la plaque se situe dans la possibilité d'être associée à un boîtier de fermeture de volume réduit et dans une meilleure linéarité de fonctionnement. Un gain substantiel de sensibilité a pu être observé dans le cadre des plaques transductrices encastrées à électrodes recouvrant complètement les faces. Ce gain est obtenu en créant  
30 une incurvation systématique de la plaque grâce à un encastrement non plan. La forme bombée ou ondulée conférée à la plaque par l'encastrement modifie l'état de contrainte en donnant aux deux formes de piézoélectricité l'occasion de se manifester de façon précise.

Cependant, ce moyen n'est pas le seul susceptible d'accroître la sensibilité acoustique.

Sur la figure 7, on peut voir une coupe méridienne d'une capsule microphonique selon l'invention dans laquelle on a renoncé à encastrier la plaque vibrante. Selon cette variante de réalisation, la plaque 1 revêtue  
5 complètement sur ses deux faces d'électrodes 7 et 8 est simplement appuyée au lieu d'être encadrée. A la différence de l'encastrement représenté à la figure 5, l'appui simple de la figure 7 n'engendre pas de couple de flexion au point d'attache de la plaque fléchie par la pression acoustique  $p$ . La  
10 déformée représentée en pointillé sur la figure 7 présente une forme simplement bombée dépourvue du point d'inflexion. Il en résulte un état de tension mécanique très différent de celui de la figure 6, mais qui reste régi par la résistance à la flexion. Les charges globalement collectées par les électrodes 7 et 8 ne se compensent pas exactement et la sensibilité de la  
15 capsule microphonique est sensiblement relevée.

Pour réaliser les conditions d'appui simple, la coupe de la figure 7 montre que le fond du boîtier 21 comporte une collerette annulaire dans laquelle a été formé une portée 22 à sommet pointu sur laquelle repose l'ensemble plaque 1, 7, 8. L'application de cet ensemble contre la portée 22  
20 est assuré par un joint d'étanchéité 23 en matière isolante compressible qui garnit la couronne 20 emboîtée sur le fond du boîtier 21. Lorsque la plaque 1 vibre, son pourtour pivote autour de la crête en couteau de la portée 22 ce qui n'engendre pas de couple de flexion au point d'attache. Ce pivotement provoque un basculement de la face d'appui du joint 23, mais pour éviter la  
25 création d'un couple résistant ce joint est réalisé en mousse de polymère ou d'élastomère. Ce joint peut être rendu conducteur, afin de réaliser la prise de contact avec l'électrode 7. L'électrode 7 joue le rôle d'électrode de masse reliée aux pièces métalliques 20 et 21 du boîtier et l'électrode 8 est arrêtée à faible distance de la portée 22. Bien entendu, rien ne s'oppose à réaliser  
30 les pièces 21 et 22 du boîtier en matière isolante et à réaliser le blindage électrostatique par sertissage dans une enveloppe extérieure métallique comme illustré par exemple sur la figure 14.

Le renforcement de sensibilité qui concerne le dispositif de la figure 7 repose essentiellement sur le mode d'attache de la plaque vibrante au

boîtier. En comparant la déformée de la figure 7 à celle de la figure 5, on voit qu'elles ont une allure semblable à condition de négliger la couronne proche de l'encastrement qui présente une inversion de courbure.

Cette remarque conduit tout naturellement à définir quelle est la charge  $Q_F$  induite par piézoélectricité de flexion sur des électrodes recouvrant complètement une plaque circulaire encastree.

L'expression mathématique de cette charge est :

$$Q_F = \int_0^R \pi (f_{3113} + f_{3223}) \left( \frac{\delta X_r}{\delta z} + \frac{\delta X_\theta}{\delta z} \right) r dr$$

Les contraintes  $X_r$  et  $X_\theta$  peuvent s'exprimer en fonction du rapport  $\rho = \frac{r}{R}$  par les expressions (a) ou (b) qui suivent :

$$(a) \quad \begin{cases} X_r = \frac{kE}{1-\nu^2} z \left[ (1-\nu) - (3+\nu)\rho^2 \right] \\ X_\theta = \frac{kE}{1-\nu^2} z \left[ (1+\nu) - (1+3\nu)\rho^2 \right] \end{cases}$$

$$(b) \quad \begin{cases} X_r = -\frac{E}{1-\nu^2} z \left( \frac{\delta^2 w}{\delta r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\delta w}{\delta r} \right) \\ X_\theta = -\frac{E}{1-\nu^2} z \left( \frac{1}{r} \frac{\delta w}{\delta r} + \frac{\delta^2 w}{\delta r^2} \right) \end{cases}$$

la valeur de  $k$  est donnée ci-dessus en relation avec la description de la figure 6.

Ces expressions permettent d'exprimer la charge induite  $Q_F$  :

Avec les relations (b), on trouve :

$$Q_F = -\frac{E}{1-\nu} \pi (f_{3113} + f_{3223}) \int_0^R \frac{\delta}{\delta r} \left( r \frac{\delta w}{\delta r} \right) dr$$

qui peut s'écrire :

$$Q_F = - \frac{\pi E}{1-\nu} (f_{3113} + f_{3223}) R \left( \frac{\delta w}{\delta r} \right)_{r=R} \dots\dots(c)$$

Avec les relations (a), on trouve :

$$5 \quad Q_F = \frac{2kE}{1-\nu} (f_{3113} + f_{3223}) \pi R^2 \int_0^1 \rho (1 - 2\rho^2) d\rho \dots\dots(d)$$

le changement de signe de l'intégrant  $(1 - 2\rho^2)$  a lieu pour

$$\rho' = \frac{\sqrt{2}}{2} \dots\dots(e).$$

10 La relation (c) montre que la charge induite est nulle si la plaque est attachée par un encastrement plan, car  $\left( \frac{\delta w}{\delta r} \right)_{r=R} = 0$ .

La relation (d) montre que si  $R' = \frac{\sqrt{2}}{2} R$ , la couronne comprise entre les rayons  $R$  et  $R'$  collecte une charge égale et de signe contraire à la charge collectée par le cercle intérieur ayant le rayon  $R'$ .

15 A partir de ce qui vient d'être dit, un gain de sensibilité important du dispositif de la figure 5 peut être obtenu par subdivision d'une des électrodes 7 ou 8 selon une coupure circulaire de rayon  $R'$ .

Cette variante de réalisation est illustrée par la vue isométrique partielle de la figure 8. Le fond de boîtier 21 et la collerette 20 forment ici un encastrement plan pinçant une plaque plane 1. L'électrode 27 recouvre complètement la face de la plaque 1 tournée vers l'extérieur. La face intérieure de la plaque 1 porte deux électrodes concentriques 26 et 25. L'électrode centrale est un disque 25 dont le rayon est voisin de la valeur  $R'$  définie ci-dessus. L'électrode périphérique 26 est un anneau de rayon intérieur voisin de  $R'$ . La coupure circulaire qui sépare les deux électrodes 25 et 26 se situe au rayon  $R'$ , c'est à dire à 70 % du centre par rapport à la zone non encastree de la plaque 1. Si l'on prend pour électrode de référence l'électrode 27, les tensions microphoniques délivrées par les électrodes 25 et 26 sont de signes contraires et supérieures à la tension qui serait délivrée par les électrodes 25 et 26 réunies l'une à l'autre. On peut envisager plusieurs modes d'exploitation des tensions fournies par les électrodes. La solution la plus simple consiste à ne prévoir sur la face interne de la plaque 1 qu'une seule des électrodes 25 et 26. Dans ce cas un circuit adaptateur

d'impédance à entrée unique est approprié.

La sensibilité microphonique  $s = \frac{v}{p}$  où  $v$  est la tension à vide délivrée et  $p$  la pression acoustique peut se déduire de l'expression

$$5 \quad v = \frac{Q'_F}{c}$$

où  $c$  est la capacité interélectrode donnée par  $c = \frac{\epsilon \cdot \pi R'^2}{h}$  et  $Q'_F$  la charge collectée calculée en intégrant l'expression (d) de la charge  $Q_F$  entre les limites d'intégration 0 et  $R'/R$ .

$$10 \quad \text{On obtient : } s = \frac{3}{8} \frac{1+v}{\epsilon} (f_{3113} + f_{3223}) \left( \frac{R}{h} \right)^2$$

A titre d'exemple non limitatif, on peut évaluer cette sensibilité en tension dans le cas d'une plaque de polyfluorure de vinylidène polarisé.

Les valeurs  $R$  et  $h$  sont fixées pour obtenir une première fréquence de résonance de 3 kHz soit :  $R = 7,5$  mm et  $h = 240$   $\mu$ m. On trouve une sensibilité  $s = 1$  mV/Pa.

Comme la capacité interélectrodes est la même pour l'électrode centrale 25 et pour l'électrode annulaire 26, on obtient la même sensibilité dans les deux cas. Il va sans dire que l'électrode 27 n'a pas besoin de s'étendre au-delà de la zone en vis-à-vis de celle des électrodes 25 et 26 qui sert à recueillir la charge induite.

On peut cependant doubler la sensibilité de la capsule microphonique en utilisant comme bornes de sortie les électrodes 25 et 26. Dans ce cas, l'électrode 27 couvre toute la plaque 1 et il faut la blinder efficacement contre les influences électrostatiques extérieures, car elle est flottante. Le montage électrique de la figure 9 illustre ce mode de raccordement en liaison avec un amplificateur différentiel comprenant deux transistors unipolaires à grille isolée  $T_1$  et  $T_2$ . Les sources des transistors  $T_1$  et  $T_2$  sont reliées au pôle négatif 30 d'une alimentation symétrique ayant pour pôle commun le pôle 29. Le drain du transistor  $T_1$  est relié directement au pôle positif 28 de l'alimentation tandis que le drain du transistor  $T_2$  y est relié via une résistance de charge  $R_1$  aux bornes de laquelle apparait la tension amplifiée. Les électrodes 25 et 26 sont respectivement reliées aux grilles des transistors  $T_2$  et  $T_1$ . Grâce au montage différentiel, on peut sans

inconvenient relier l'électrode 27 au pôle commun 29 par la connexion 31. Bien entendu d'autres circuits amplificateurs et/ou adaptateurs d'impédance peuvent être envisagés, par exemple ceux qui utilisent des transistors bipolaires. La limitation de la réponse du côté des basses fréquences s'obtient par une résistance de forte valeur mise en parallèle sur les 5 capacités actives 25, 27 ou 26, 27. Cette résistance peut être intégrée à la plaque 1 ou mieux réalisée en rendant conducteur le diélectrique constituant la plaque 1.

Dans les exemples qui précèdent, on a supposé que la plaque vibrante 10 est uniformément polarisée depuis le centre jusqu'au point d'attache avec le boîtier. Cependant, la charge induite par une contrainte déterminée dépend en grandeur et en signe de l'excès de charge ou de la polarisation dipolaire créée en permanence dans le diélectrique formant la plaque vibrante. On peut donc jouer sur ce facteur pour accroître la sensibilité microphonique 15 d'une plaque à encastrement plan telle que celle représentée sur la figure 5.

La figure 10 est une coupe méridienne d'une capsule microphonique utilisant une plaque 1 à polarisation inhomogène. Cette plaque 1 est revêtue sur ses deux faces d'électrodes 7 et 8 allant du centre jusqu'à l'encastrement plan du boîtier 34. La polarisation dipolaire  $P$  créée dans la couronne de rayon supérieur à  $R'$  est égale et en sens contraire de la polarisation  $P'$  créée 20 dans le disque central de rayon inférieur ou égal à  $R'$ . Lorsqu'on intègre les diverses contributions de la piézoélectricité de flexion avec les limites d'intégration  $(O, R')$  et  $(R', R)$ , on voit que les charges se cumulent au lieu de se neutraliser. La tension délivrée  $v$  est plus importante que celle que 25 fournirait la capsule microphonique si une seule des deux polarisations existait, solution qui figure aussi dans le cadre de la présente invention, mais elle n'est pas le double de ce que fournit la capsule de la figure 9 entre l'électrode 27 et l'une des électrodes 25 ou 26. Toutes autres choses égales par ailleurs, la capsule de la figure 10 offre une impédance électrique quatre 30 fois moindre que celle de la figure 8 ce qui peut être utile si l'excitation du circuit amplificateur se fait par le courant de court-circuit et non pas par la tension à vide développée. Il est utile de noter que le courant de court-circuit à charge induite constante est une fonction proportionnelle à la fréquence acoustique et que si l'on utilise un amplificateur de courant à

impédance d'entrée faible et à forte impédance de sortie il faut prévoir une charge capacitive en sortie pour redresser la courbe de réponse.

Dans les applications décrites qui utilisent un rayon  $R'$  pour départager les zones électrodes ou les zones polarisées, on peut considérer que la valeur  $\frac{\sqrt{2}}{2} R$  est optimale. Si l'on s'écarte quelque peu de cette valeur un gain de sensibilité subsiste.

En général, lorsque la polarisation du diélectrique n'existe que dans une partie de la plaque il y a intérêt à employer des électrodes qui ne dépassent pas l'étendue polarisée. La polarisation localisée peut être obtenue facilement par les procédés classiques de polarisation entre électrodes ou par effet Corona avec anneau de garde.

La réalisation d'une inhomogénéité radiale n'est qu'un aspect de ce que l'on peut faire pour obtenir une meilleure sensibilité microphonique.

La figure 11 est une vue en coupe partielle d'une plaque vibrante stratifiée comprenant une couche 35 inerte du point de vue piézoélectrique à laquelle adhère une couche 34 piézoélectriquement active mais ayant des propriétés élastiques identiques. Le diagramme des tensions de flexion conserve la forme triangulaire avec un sommet sur la fibre médiane 36, mais seules les tensions existant dans la couche 34 contribuent à développer en surface une charge induite. La piézoélectricité intrinsèque peut donc fournir une contribution non-nulle à laquelle s'ajoute la contribution de la piézoélectricité de flexion.

La figure 12 est une vue en coupe partielle d'une plaque vibrante stratifiée comprenant une couche 38 inerte du point de vue piézoélectrique qui adhère à une couche piézoélectriquement active 34 présentant une plus forte compliance. Le fléchissement de la couche 38 entraîne un étirement assez uniforme de la couche 34 qui est représenté par le diagramme de contrainte 39.

Pour réaliser les plaques stratifiées des figures 11 et 12 qui peuvent d'ailleurs comporter plus de deux couches superposées on peut mettre en oeuvre l'assemblage par collage. La plaque de la figure 11 peut être constituée par exemple par deux couches de  $PVF_2$  l'une seulement étant polarisée électriquement. La plaque stratifiée de la figure 12 peut être constituée par exemple par une couche 34 de  $PVF_2$  polarisé collée ou

greffée sur une lame métallique 38 de plus grande rigidité. Dans ce cas, la lame métallique fait office d'électrode.

Au lieu d'utiliser une plaque vibrante partiellement polarisée en épaisseur comme illustré sur les figures 11 et 12, on peut réaliser une plaque  
5 monolithique telle que la plaque 40 de la figure 13. En créant suivant l'axe z un profil 42 de conductivité  $\sigma$  ayant une valeur faible au-dessus d'une fibre 41 et beaucoup plus forte en dessous de cette fibre, on peut réaliser un écrantage du champ électrique dans la région sous-jacente de la fibre 41. Ainsi bien que piézoélectriquement active en épaisseur, cette plaque est en  
10 partie passivée par le renforcement de conductivité. Une telle plaque peut être obtenue par un dopage du matériau selon une profondeur de pénétration limitée à une fraction de l'épaisseur totale. A cet effet, on peut faire appel à une technologie de bombardement électronique permettant avec une énergie de quelques dizaines de keV de pénétrer à une profondeur de  
15 quelques dizaines de microns dans un matériau polymère. On peut également obtenir un profil de conductivité par diffusion d'ions alcalins portés par un solvant.

Sur la figure 14, on peut voir une coupe méridienne d'une capsule microphonique pour application téléphonique.

20 La plaque vibrante plane 1 est serrée dans un encastrement périphérique constitué par les bords plans d'un couvercle métallique 44 et d'un fond de boîtier 45 également métallique. La face de la plaque 1 tournée vers le couvercle 44 est complètement recouverte d'une électrode 7 mise à la masse du boîtier ce qui se produit à la fin de l'assemblage par le sertissage  
25 d'une enveloppe métallique 43. Le fond du couvercle 44 est percé d'orifices 48 formant une grille perméable au son ; l'intérieur du couvercle est garni d'un revêtement textile 47 également perméable au son. Le couvercle 44 et la plaque 1 délimitent une première cavité acoustique 46. Une seconde cavité acoustique est formée par un évidement supérieur du fond du boîtier  
30 45 qui possède une paroi intérieure percée d'un orifice 50. Un évidement inférieur du fond du boîtier 45 forme une troisième cavité acoustique 53 avec une plaque de circuit imprimé 54. L'orifice de communication 50 entre la seconde cavité acoustique et la troisième cavité acoustique est obturé par un tampon textile amortisseur 49. La face inférieure de la plaque 1 porte

une électrode annulaire 8 reliée électriquement à un circuit amplificateur 51 porté par le centre de la plaque 1. Des circuits d'alimentation 55 portés par le circuit imprimé 54 sont reliés par des connexions en pointillé au circuit 51. Des bornes de sortie 56 portées par le circuit imprimé 54 sont également reliées au circuit adaptateur d'impédance 51. Une résistance de fuite 52 est réalisée entre l'électrode 7 et l'électrode 8 par rebouchage avec une pâte conductrice, d'un trou pratiqué au travers de la plaque 1. Cette résistance sert à limiter la réponse électroacoustique vers les basses fréquences. Les moyens amortisseurs 47 et 49 contribuent à amortir la fréquence de résonance de la plaque 1.

Il va de soi que l'on peut combiner entre eux les différents moyens par lesquels la sensibilité d'une plaque vibrante plane peut être améliorée. La description de la figure 14 montre que l'utilisation d'une plaque plane est relativement aisée à mettre en oeuvre et qu'elle permet d'atteindre un degré élevé d'intégration des composants électroniques tout en conservant des formes simples pour les pièces de montage. La stabilité dans le temps des caractéristiques électroacoustiques est remarquable et la compacité de la capsule microphonique n'altère en aucune façon ses performances électroacoustiques. Le dispositif de la figure 14 illustre plus particulièrement un microphone à pression recevant la pression acoustique sur l'une des faces de la plaque. Cependant, l'invention s'applique également aux microphones à gradient de pression qui se révèlent particulièrement efficaces dans les ambiances bruyantes pour privilégier les sources sonores rapprochées.

Lorsqu'on plonge dans l'eau un microphone tel que décrit précédemment, on voit qu'il constitue un bon hydrophone. La fréquence de résonance est abaissée du fait de la charge d'eau. Il y a également lieu de signaler que les plaques peuvent être réalisées non seulement en polyfluorure de vinylidène, mais aussi dans l'un de ses copolymères.

REVENDICATIONS

1. Transducteur électroacoustique à condensateur diélectrique solide polarisé comprenant au moins deux électrodes collectrices (7,8), une structure vibrante (1) faite dudit diélectrique et soumise à la pression acoustique incidente (p) et un support (20, 21) auquel ladite structure vibrante est  
5 attachée par ses bords; lesdites électrodes (7,8) étant portées par ladite structure vibrante et reliées respectivement à deux bornes de sortie, caractérisé en ce que ladite structure vibrante est une structure plane en forme de plaque (1) suffisamment épaisse pour que le feuillet moyen (16) ne subisse aucune déformation significative pendant la flexion de ladite plaque  
10 (1).

2. Transducteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le moyen d'attache (22,23) reliant le bord de ladite plaque (1) audit supports (20,21) assure sa liberté de pivotement lorsqu'elle incurve alternativement sous l'effet de ladite pression acoustique incidente (p).

15 3. Transducteur selon la revendication 2, caractérisé en ce que l'appui de ladite plaque comporte une saillie pointue (22) au sommet de laquelle le bord de ladite plaque peut pivoter librement.

4. Transducteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le bord de ladite plaque (1) est serré dans un encastrement (2) à faces planes  
20 ménagé dans ledit support (20,21).

5. Transducteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite plaque (1) présente une polarisation électrique (P,P') inhomogène dans son étendue.

6. Transducteur selon la revendication 5, caractérisé en ce que une  
25 région centrale de ladite plaque (1) possède une polarisation électrique (P') dont le signe est inversé par rapport à la polarisation électrique (P) existant dans une région s'étendant entre le bord de ladite plaque (1) et ladite région centrale.

7. Transducteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que la  
30 polarisation électrique de ladite plaque (1) est inhomogène selon une direction (Z) perpendiculaire à ses faces.

8. Transducteur selon la revendication 7, caractérisé en ce que ladite plaque (1) est une structure stratifiée (34,35,38) composée d'au moins deux couches superposées adhérant l'une à l'autre ; l'une desdites couches (34) étant faite d'un diélectrique polarisé.

5 9. Transducteur selon la revendication 8, caractérisé en ce que l'autre desdites couches (38) est métallique.

10. Transducteur selon la revendication 8, caractérisé en ce que l'autre desdites couches (35) est faite du même diélectrique non polarisé.

10 11. Transducteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que la conductivité électrique (T) de ladite plaque (40) est inhomogène.

12. Transducteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que lesdites électrodes (7,8) recouvrent respectivement les faces de ladite plaque (1).

15 13. Transducteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que l'une au moins desdites électrodes (25,26) recouvre partiellement l'une des faces de ladite plaque (1).

20 14. Transducteur selon la revendication 13, caractérisé en ce que lesdites électrodes (25,26) sont situées sur l'une des faces de ladite plaque (1) ; l'autre face de ladite plaque (1) étant recouverte par une contre électrode (27).

25 15. Transducteur selon la revendication 13, caractérisé en ce que ladite plaque est une plaque circulaire encastré (1) et en ce que ladite électrode (25,26) recouvre une partie de ladite face limitée par un cercle de rayon ( $R'$ ) proche de 0,7 fois le rayon (R) de la partie non encastrée de ladite plaque (1).

16. Transducteur selon la revendication 14, caractérisé en ce que lesdites électrodes (25,26) sont reliées aux entrées différentielles d'un circuit électronique amplificateur ( $T_1$ ;  $T_2$ ).

30 17. Transducteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite plaque (1) porte un circuit électronique amplificateur (51) relié auxdites électrodes (7,8).

18. Transducteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que une seule face de ladite plaque (1) est accessible à la pression acoustique (p).

19. Transducteur selon la revendication 1, caractérisé en ce que les deux faces de ladite plaque (1) sont accessibles à la pression acoustique (p).

20. Transducteur selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que la polarisation de ladite plaque (1) est dipolaire.

21. Transducteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 19, caractérisé en ce que la polarisation de ladite plaque (1) est constituée par un excès de charge.

22. Transducteur selon la revendication 20, caractérisé en ce que ladite plaque (1) est faite en polyfluorure de vinylidène ou l'un de ses copolymères.

23. Transducteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la réponse est limitée vers les basses fréquences par une résistance (52) reliant lesdites électrodes (7,8).

24. Transducteur selon la revendication 23, caractérisé en ce que ladite résistance (52) est intégrée à ladite plaque (1).

FIG. 1

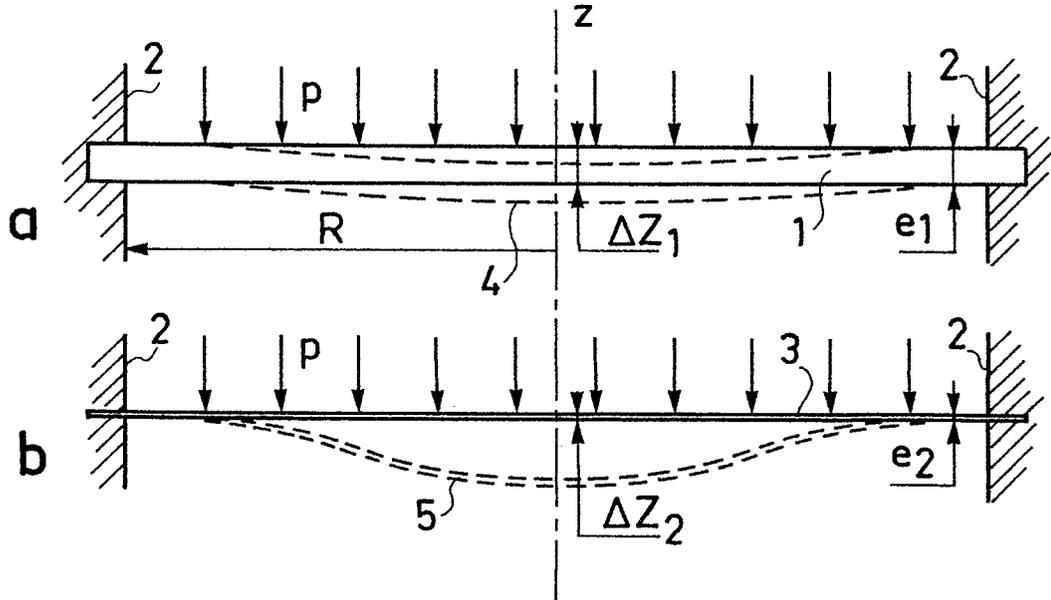


FIG. 2

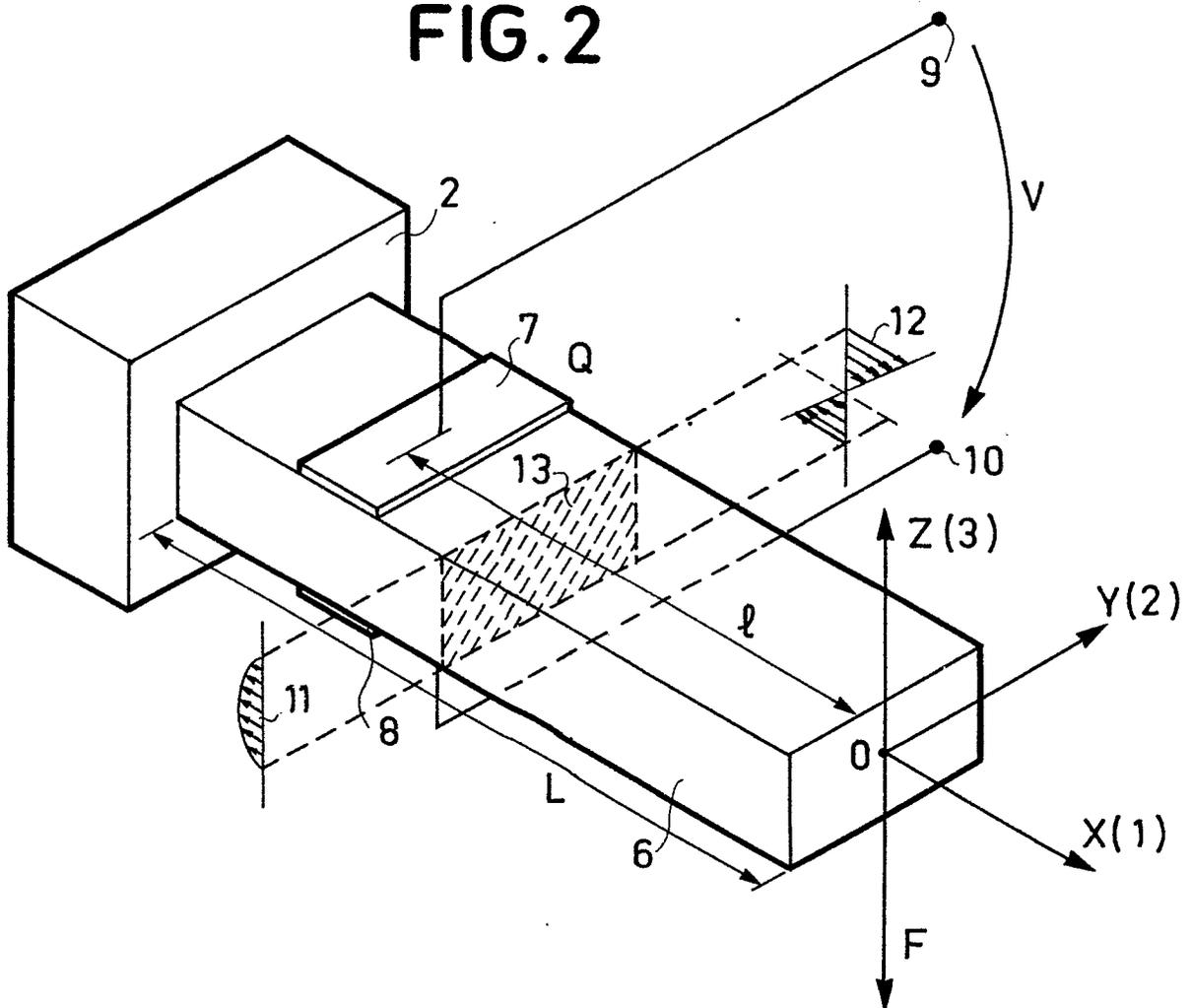


FIG. 3

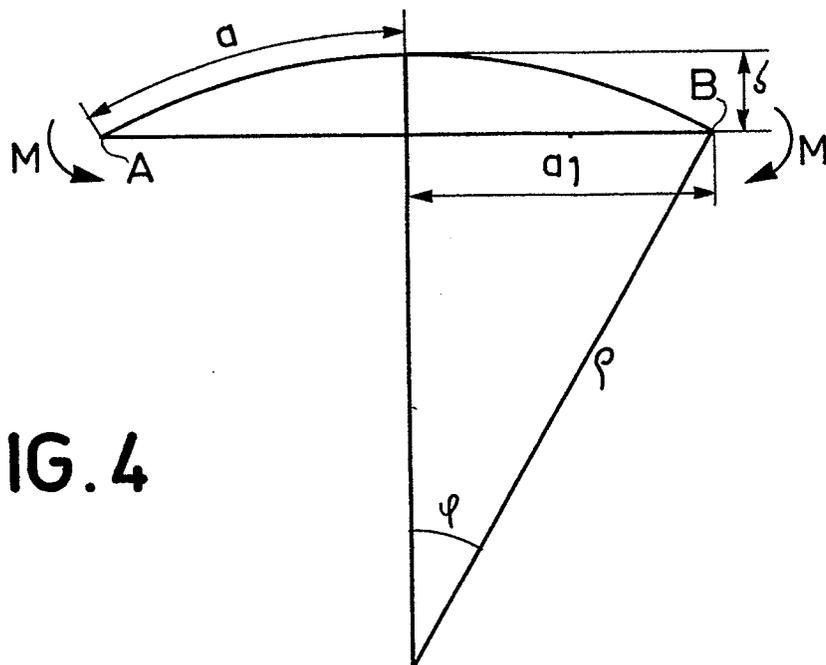
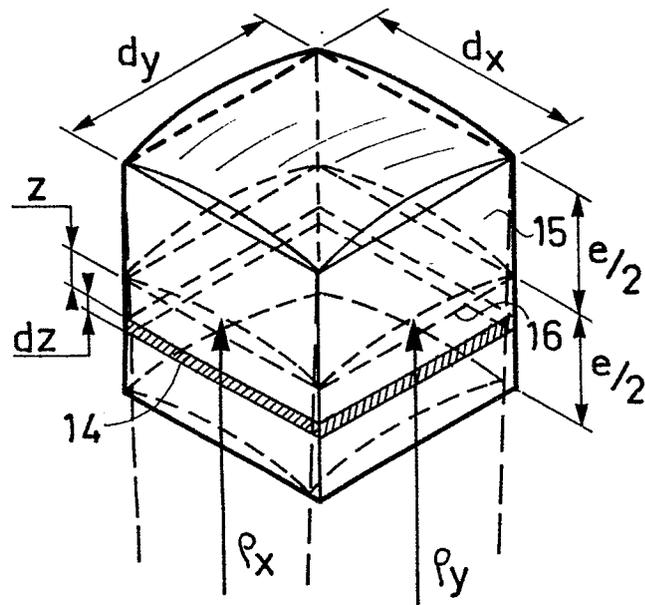


FIG. 4

FIG. 5

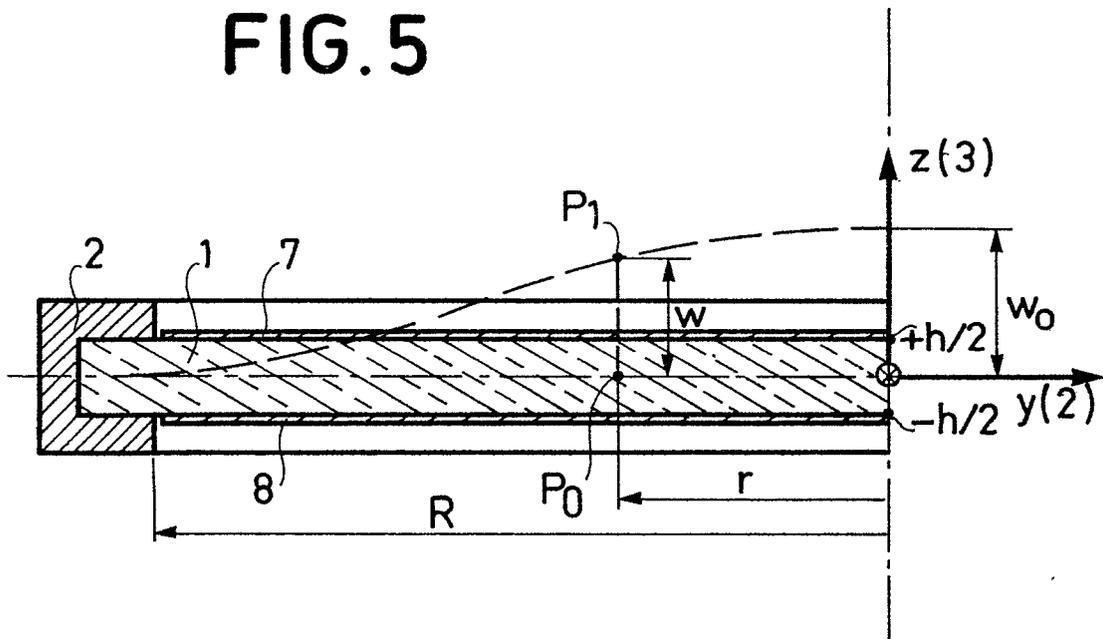


FIG. 6

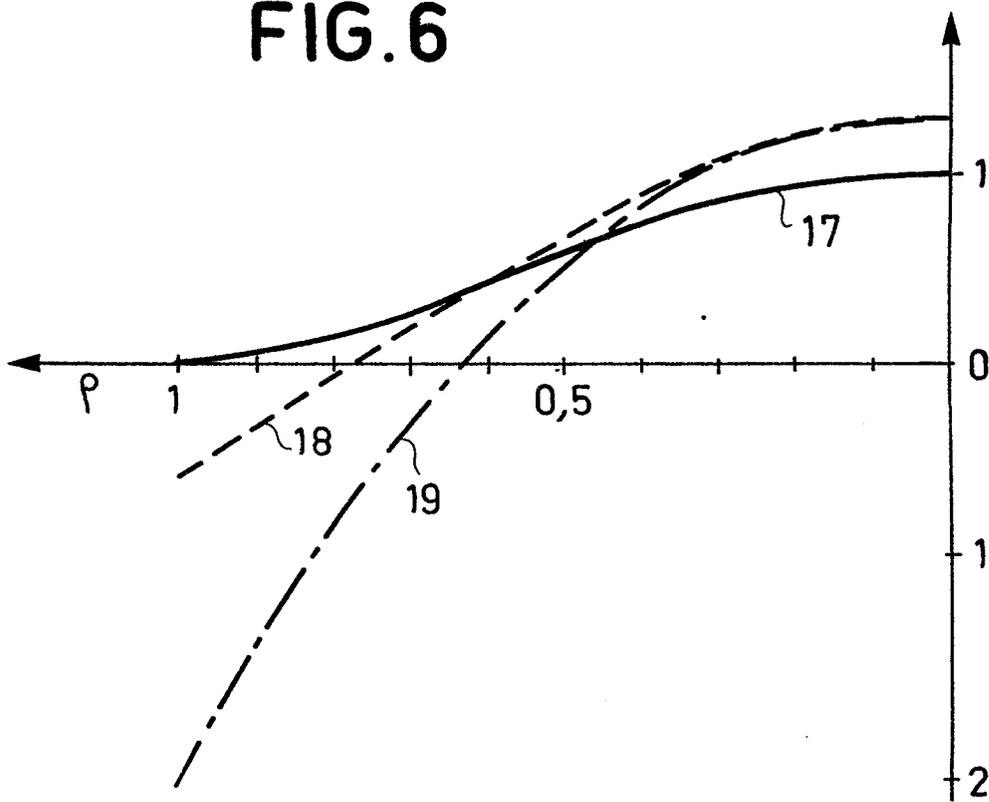


FIG. 7

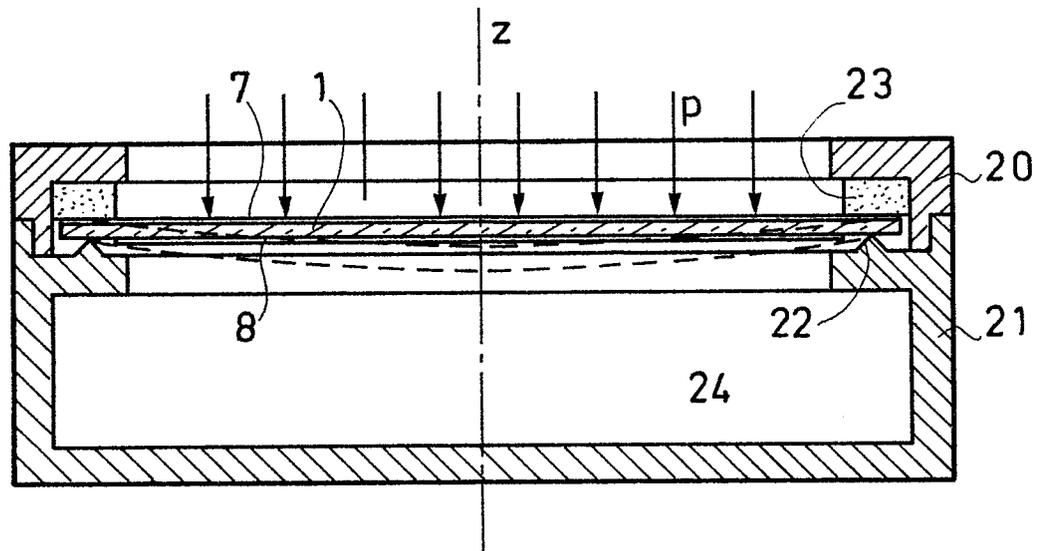


FIG. 8

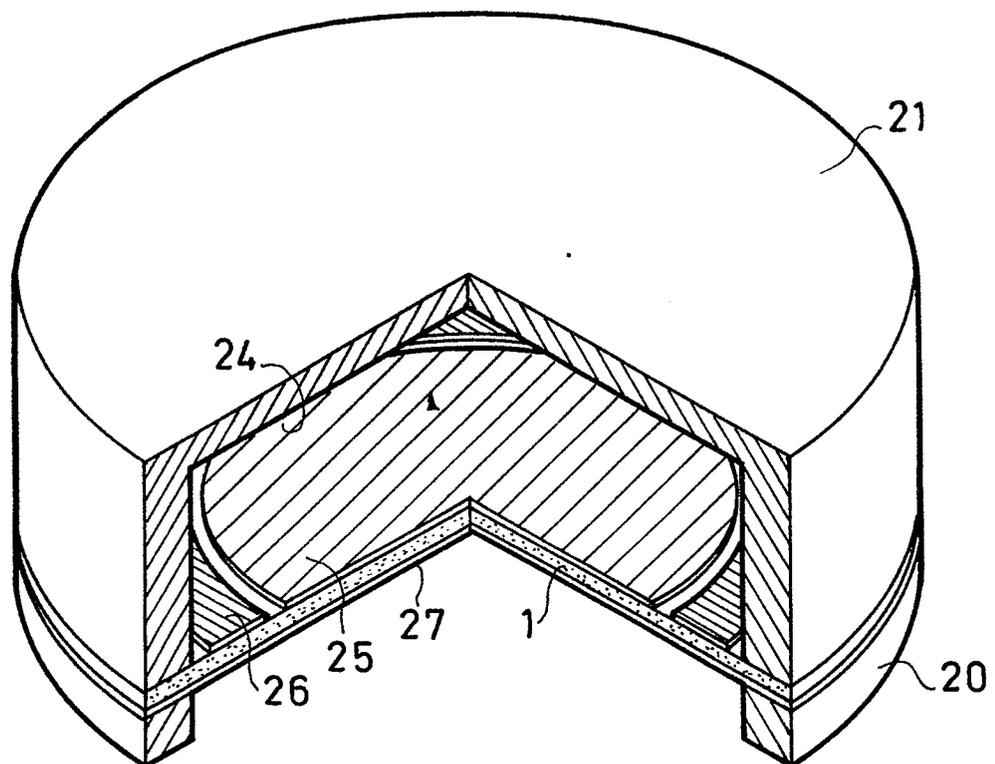


FIG. 9

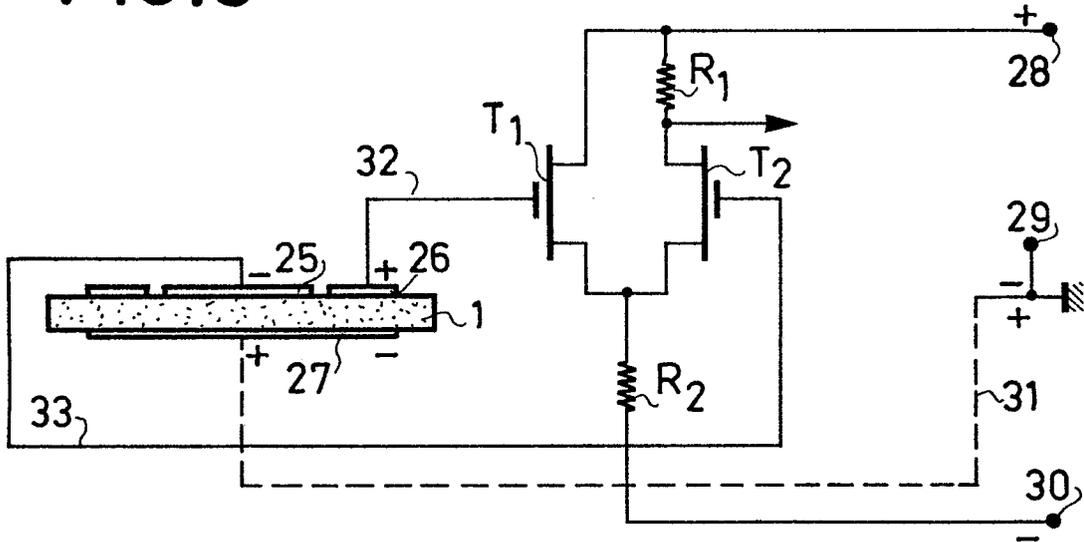


FIG. 10

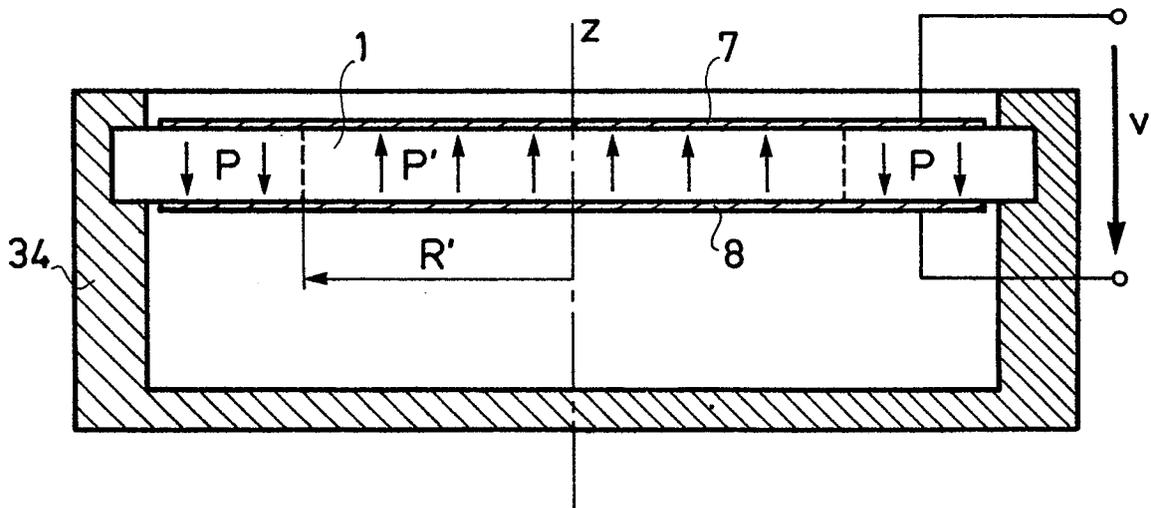


FIG. 11

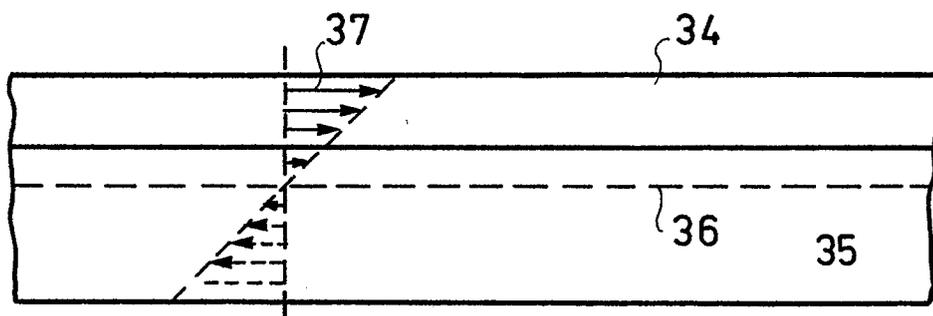


FIG. 12

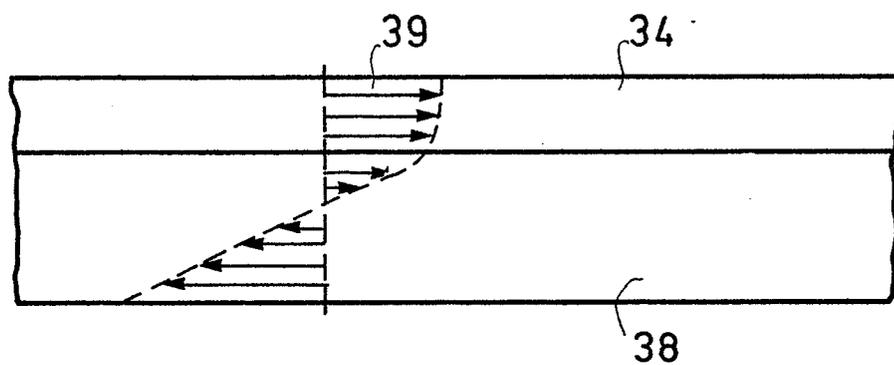


FIG. 13

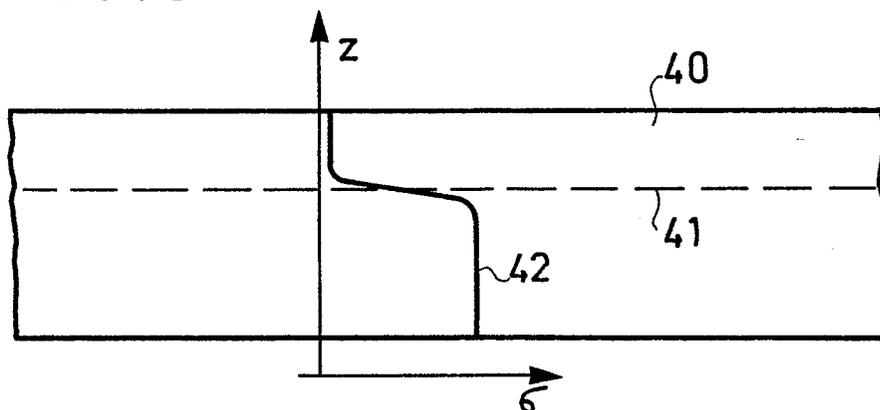


FIG. 14

