

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

11 N° de publication :

2 954 582

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

21 N° d'enregistrement national :

09 59514

51 Int Cl⁸ : H 01 L 21/62 (2006.01), H 03 H 9/02

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 23.12.09.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 24.06.11 Bulletin 11/25.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

71 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-
MIQUE Etablissement public à caractère industriel et
commercial — FR.

72 Inventeur(s) : DEFAY EMMANUEL, BOISSEAU
SEBASTIEN et DESPESE GHISLAIN.

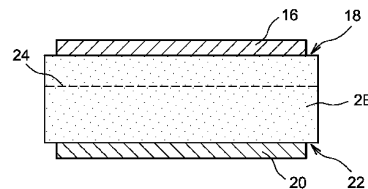
73 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMI-
QUE Etablissement public à caractère industriel et com-
mercial.

74 Mandataire(s) : BREVALEX.

54 DISPOSITIF ELECTROMECHANIQUE A BASE D'ELECTRET, ET SON PROCEDURE DE FABRICATION.

57 Dispositif électromécanique à base d'électret, et son
procédé de fabrication.

Ce dispositif comprend un empilement diélectrique com-
portant au moins une couche d'électret (2E), et deux élec-
trodes (16, 20) sur deux faces opposées (18, 22) de
l'empilement. Il s'applique notamment au domaine des télé-
communications.



FR 2 954 582 - A1



**DISPOSITIF ELECTROMECHANIQUE A BASE D'ELECTRET, ET SON
PROCEDE DE FABRICATION**

DESCRIPTION

5 DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention concerne un dispositif électromécanique (MEMS ou NEMS) tel que, par exemple, un actionneur électromécanique ou un capteur ou encore un résonateur acoustique, notamment à fort
10 facteur de qualité, ainsi qu'un procédé de fabrication de ce dispositif.

Elle s'applique notamment au domaine des télécommunications.

15 ETAT DE LA TECHNIQUE ANTERIEURE

Dans le domaine des télécommunications, il est nécessaire de disposer de bases de temps très précises, avec des fréquences allant de quelques centaines de mégahertz à quelques gigahertz.

20 Pour ce faire, on utilise la plupart du temps un oscillateur dont la fréquence d'oscillation est réglée par un résonateur piézoélectrique, résonateur dont la fréquence de résonance électromécanique présente une variation d'impédance
25 suffisante pour imposer la fréquence de l'oscillateur.

On rappelle que le facteur de mérite d'un résonateur, pour une application aux oscillateurs, est le produit du facteur de qualité Q par la fréquence de résonance F .

La valeur souhaitée du produit $Q \times F$ est de l'ordre de 10^{14} Hz pour les sources de fréquence les plus précises des systèmes nomades.

Les résonateurs les plus couramment
5 utilisés comportent des éléments massifs (en anglais, *bulk*) en quartz.

Ils présentent l'inconvénient de résonner à des fréquences F de quelques mégahertz car ils sont épais : leur épaisseur est de l'ordre de $100 \mu\text{m}$ au
10 minimum ; mais ils possèdent un facteur de qualité Q très élevé, de l'ordre de 100000 , d'où une très bonne stabilité des oscillateurs à quelques mégahertz.

Pour avoir des fréquences plus élevées, on peut multiplier la fréquence de résonance du quartz ;
15 mais alors le facteur de qualité diminue de sorte que le produit $Q \times F$ reste à peu près constant, de l'ordre de 10^{12} Hz.

De plus, la multiplication de la fréquence nécessite de l'énergie, ce qui n'est pas souhaitable
20 pour les systèmes nomades.

Finalement, une solution de remplacement des résonateurs à base de quartz est fortement souhaitable, tout particulièrement pour la technologie intégrée sur silicium.

25 Pour éviter la multiplication de la fréquence et travailler dans cette dernière technologie, on peut utiliser un résonateur qui est plus petit qu'une structure à base de quartz et dont la fréquence de résonance est déjà de l'ordre de 1 GHz , à
30 savoir une structure de type FBAR (pour *Film Bulk Acoustic Resonator*), comportant une couche mince

piézoélectrique qui est déposée sur un substrat et souvent à base de nitrure d'aluminium.

Le facteur de qualité est alors seulement de l'ordre de 1000, comme cela est par exemple décrit dans l'article de **R.C. Ruby et al.**, Thin film bulk acoustic wave resonators for wireless applications, IEEE Ultrason. Symp. pp. 813-821, 2001). Mais le produit $Q \times F$ maximum est de l'ordre de 10^{12} Hz. Toutefois, cette solution nécessite l'utilisation de nouveaux matériaux dans la technologie intégrée sur silicium, à savoir des matériaux tels que AlN, ZnO, Mo et Pt par exemple.

Une autre possibilité est d'utiliser un résonateur de type HBAR (pour *High-tone Bulk Acoustic Resonator*), comprenant une cavité résonante acoustique, autrement dit un substrat de qualité acoustique, sur lequel on dépose successivement une électrode, une couche mince piézoélectrique et une autre électrode.

Dans un tel résonateur, l'excitation électrique de la couche mince piézoélectrique par le biais des électrodes permet de générer toute une série d'harmoniques, dues à la présence de la cavité acoustique.

Au sujet des résonateurs de type HBAR, on peut se reporter à l'article de **M. Pijolat et al.**, Large Qxf product for HBAR using Smart Cut™ transfer of LiNbO₃ thin layers onto LiNbO₃ substrate, 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2008 : 201-4 IEEE, Piscataway, NJ, USA, Conference Paper.

L'utilisation d'un résonateur de type HBAR présente les avantages des deux solutions précédentes

(résonateur à base de quartz et résonateur de type FBAR) : le facteur de qualité est très élevé et les fréquences de résonance des différentes harmoniques persistent jusqu'à des fréquences de l'ordre de
5 plusieurs gigahertz.

En outre, l'utilisation de ce type de résonateur permet d'atteindre des produits $Q \times F$ de l'ordre de 10^{14} Hz (notamment dans le cas où la couche mince est en AlN et le substrat en saphir). Cependant,
10 la présence des très nombreuses harmoniques, dont les fréquences sont très proches les unes des autres, induit souvent une instabilité de l'oscillateur.

Il convient de noter que le facteur de qualité d'un résonateur de type HBAR résulte
15 principalement de la présence du substrat qui constitue la cavité acoustique et doit être fait d'un matériau monocristallin à très faibles pertes acoustiques, tel que le saphir. L'existence de résonances à des fréquences de l'ordre de 1 GHz est due, quant à elle, à
20 la présence de la couche mince piézoélectrique.

Comme cette dernière est déposée sur le substrat, elle ne présente pas un facteur de qualité intrinsèquement très élevé.

Mais comme l'énergie acoustique est
25 principalement concentrée dans la cavité, le faible facteur de qualité de la couche mince a peu d'influence sur le facteur de qualité effectif du résonateur.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

La présente invention a pour objet un
30 dispositif électromécanique, en particulier un

résonateur acoustique, qui remédie aux inconvénients précédents.

L'invention concerne un dispositif électromécanique caractérisé en ce qu'il comprend :

- 5 - un empilement diélectrique ayant deux faces opposées et comportant au moins une couche d'électret, et
- deux électrodes respectivement portées par les deux faces opposées de l'empilement.

10 On précise que l'empilement diélectrique peut comporter une seule couche qui est alors la couche d'électret, ou plusieurs couches diélectriques dont au moins une est la couche d'électret.

15 Remarquons qu'un matériau diélectrique est un matériau électrostrictif ; par contre, les matériaux diélectriques ne sont pas forcément piézoélectriques.

Dans l'invention, la couche d'électret peut comporter des charges électriques permanentes, formant un couplage électromécanique.

20 On précise que lorsque l'empilement diélectrique comporte en plus de la couche d'électret une ou plusieurs couches non piézoélectriques, l'utilisation de charges dans la couche d'électret permet de créer un couplage électromécanique,
25 utilisable pour former aussi bien un résonateur acoustique qu'un actionneur électromécanique, voire un capteur électromécanique.

30 L'empilement diélectrique en dehors de l'électret peut être ou non piézoélectrique. L'électret peut être, quant à lui, piézoélectrique ou non piézoélectrique.

L'épaisseur de la couche d'électret peut être choisie de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres ; de préférence, elle est inférieure ou égale à environ 1 μm .

5 Le dispositif électromécanique, objet de l'invention, peut comporter en outre un substrat sur une face duquel sont disposés l'empilement et les électrodes.

On précise que, quelle que soit l'épaisseur
10 de la couche d'électret, le dispositif électromécanique peut comporter un substrat.

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, le substrat est pourvu d'une cavité, ou trou, qui débouche au moins sur la face du substrat sur
15 laquelle repose l'une des deux électrodes, ladite électrode étant au moins en partie au-dessus de la cavité.

Bien entendu, entre le substrat et l'électrode, il peut y avoir une couche intermédiaire
20 notamment pour améliorer l'adhérence ou pour isoler l'électrode.

On précise que l'utilisation d'un substrat présentant un trou (borgne ou non) permet à l'empilement, muni des électrodes, de se déplacer
25 perpendiculairement aux plans des couches.

Ce mode de réalisation est particulièrement intéressant pour la réalisation de structures de type actionneur électromécanique ou capteur électromécanique ou encore résonateur acoustique tel que, par exemple,
30 un FBAR (pour Film Bulk Acoustic Resonator).

Lorsque le substrat du dispositif selon l'invention ne présente pas de trou, le dispositif correspondant est particulièrement intéressant pour la réalisation de résonateurs acoustiques et notamment de résonateurs de type HBAR (pour High overtone Bulk Acoustic Resonator).

Selon un autre mode de réalisation particulier de l'invention, le dispositif électromécanique comporte en outre un réseau de Bragg acoustique ayant deux faces opposées dont l'une repose sur une face du substrat et l'autre porte l'une des deux électrodes.

On précise que l'utilisation d'un substrat associé à un réseau de Bragg sous l'empilement et les électrodes permet notamment la réalisation d'un résonateur acoustique.

Dans l'invention, la couche d'électret peut être cristalline ou, au contraire, amorphe.

La présente invention concerne aussi un procédé de fabrication d'un dispositif électromécanique, caractérisé en ce qu'il comprend :

- la formation d'un empilement diélectrique ayant deux faces opposées, ledit empilement comportant au moins une couche en matériau diélectrique,
- le chargement électrique permanent de ladite couche en matériau diélectrique pour former une couche d'électret, et
- la formation de première et deuxième électrodes respectivement sur ces deux faces opposées.

Dans ce procédé, l'épaisseur de la couche d'électret peut être choisie de quelques nanomètres à

quelques dizaines de micromètres ; de préférence, elle est inférieure ou égale à environ 1 μm .

L'empilement diélectrique et les électrodes peuvent être réalisés au-dessus d'un substrat, soit
5 directement soit indirectement (par exemple au-dessus d'une couche intermédiaire qui peut servir de couche d'arrêt de gravure).

Selon un premier mode de réalisation particulier de ce procédé, à partir d'un substrat
10 pourvu d'une couche sacrificielle et de la première électrode qui repose au-dessus de la couche sacrificielle,

- on forme, sur la première électrode, l'empilement diélectrique comportant au moins la couche
15 en matériau diélectrique,

- on effectue le chargement électrique permanent de la couche en matériau diélectrique,

- on forme la deuxième électrode sur ledit empilement, et

20 - on élimine au moins en partie la couche sacrificielle pour former un trou, ou cavité, sous la première électrode.

Selon un deuxième mode de réalisation particulier :

25 - on forme, au niveau d'une face du substrat, éventuellement une couche d'arrêt de gravure puis la première électrode qui repose sur cette face du substrat, au-dessus de la couche d'arrêt lorsqu'elle existe,

- on forme sur la première électrode, l'empilement diélectrique comportant au moins la couche en matériau diélectrique,

5 - on effectue le chargement électrique permanent de la couche en matériau diélectrique,

- on forme la deuxième électrode sur ledit empilement, et

- on grave le substrat à partir de la face opposée à la première face jusqu'à la couche d'arrêt
10 lorsqu'elle existe, de façon à réaliser un trou, ou cavité, sous la première électrode.

Selon un troisième mode de réalisation particulier :

15 - on forme un réseau de Bragg acoustique (en anglais, *acoustic Bragg grating*) sur un substrat, au niveau d'une face de ce substrat,

- on forme ensuite, sur ce réseau, la première électrode et l'empilement diélectrique comportant au moins la couche en matériau diélectrique,

20 - on effectue le chargement électrique permanent de la couche en matériau diélectrique, et

- on forme la deuxième électrode sur ledit empilement.

Dans le procédé, le chargement électrique
25 permanent peut être effectué par une méthode choisie parmi l'implantation ionique et/ou l'implantation électronique et/ou la décharge Corona et/ou la méthode de l'électrode humide.

Dans cette méthode de l'électrode humide,
30 le chargement électrique est réalisé par contact avec

un liquide, avant la formation de la deuxième électrode.

On reviendra sur cette méthode à la fin de la présente description.

5 L'implantation électronique et la décharge Corona.

On précise que l'ordre des étapes du procédé, objet de l'invention, peut être modifié.

10 En particulier, le chargement de l'électret peut être réalisé après la formation de la deuxième électrode.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

15 La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

20 - les figures 1 à 3 illustrent schématiquement un premier mode de réalisation particulier du procédé, objet de l'invention,

- les figures 4 à 7A illustrent schématiquement un deuxième mode de réalisation particulier du procédé, objet de l'invention,

25 - la figure 7B illustre schématiquement une variante de réalisation du procédé illustré par la figure 7A,

30 - les figures 8 à 10 illustrent schématiquement un troisième mode de réalisation particulier du procédé, objet de l'invention,

- les figures 11 à 13 illustrent schématiquement un quatrième mode de réalisation particulier du procédé, objet de l'invention,
- les figures 14 à 17 illustrent schématiquement un cinquième mode de réalisation particulier du procédé, objet de l'invention, et
- les figures 18, 19 et 20 illustrent schématiquement le principe de la méthode de l'électrode humide, qui est utilisable dans l'invention.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

Au sujet de la technique « Smart CutTM », on se reportera par exemple à l'article de **M. Bruel**, Application of hydrogen ion beams to Silicon On Insulator material technology, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B Beam Interactions with Materials and Atoms, Février 1996, B 108(3) : 313-19, ou bien au brevet **FR 2 681 472**.

Ce procédé est également décrit par exemple dans l'article de **B. Aspar et al.**, « Silicon Wafer Bonding Technology for VLSI and MEMS applications », edited by S.S. Iyer and A.J. Auberton-Hervé, 2002, INSPEC, London, Chapter 3, pages 35-52.

On mentionne aussi dans la suite la mise en oeuvre d'une décharge Corona.

A ce sujet, de la décharge Corona, on pourra se reporter par exemple à l'article de **J.A. Giacometti et al.**, Corona Charging of Polymers, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 27, n°5, octobre 1992.

Selon un aspect de l'invention, on utilise un matériau diélectrique, non piézoélectrique, à très faibles pertes acoustiques, par exemple le saphir ou le STO (SrTiO_3) et l'on effectue un chargement électrique permanent de ce matériau afin de le transformer en électret.

Comme on l'a vu, ce chargement peut se faire par implantation ionique, par implantation électronique ou bien par la technique connue sous le nom de décharge Corona.

Lorsque le matériau ainsi chargé de manière permanente se trouve entre deux électrodes, une résonance électro-acoustique apparaît lorsqu'on impose un champ électrique aux électrodes.

Autrement dit, le matériau devient piézoélectrique induit.

On décrit ci-après divers exemples du procédé, objet de l'invention, pour obtenir un résonateur à très faibles pertes acoustiques.

Le premier exemple concerne la fabrication d'un résonateur massif en saphir.

Dans cet exemple, on utilise une couche épaisse 2 de saphir, ayant une épaisseur d'au moins $100\ \mu\text{m}$, par exemple $500\ \mu\text{m}$ (figure 1).

On effectue ensuite le chargement électrique permanent de la couche 2 par implantation ionique, par implantation électronique ou par décharge Corona, pour la transformer en une couche d'électret.

La figure 2 illustre cette étape en prenant l'exemple de la décharge Corona.

Pour mettre en œuvre cette technique, la couche 2 repose sur une électrode 4 qui est mise à la masse.

5 Une électrode 6 en forme de pointe est placée au-dessus de la couche 2.

Une grille 8 est disposée entre l'électrode 6 et la couche 2.

10 La décharge est obtenue en portant l'électrode 6 à un potentiel positif élevé, par exemple 10 kV, au moyen d'une source de tension appropriée 10.

Comme le voit sur la figure 2, le courant de la décharge est mesuré par un ampèremètre 12 et commandé en réglant le potentiel de la grille 8 au moyen d'une source de tension appropriée 14.

15 On forme ensuite une électrode 16 sur une face 18 de la couche 2 et une autre électrode 20 sur la face opposée 22 de la couche. Pour former ces électrodes, on peut déposer un métal, par exemple l'aluminium, sur ces faces 18 et 22 (figure 3).

20 Sur la figure 3, la référence 24 désigne la zone chargée (dont l'épaisseur est non nulle).

25 Le deuxième exemple concerne la fabrication d'un résonateur à couche mince, monocristalline, en utilisant un matériau diélectrique, non piézoélectrique.

Ce résonateur ne nécessite pas l'application d'une tension continue entre ses électrodes, lors de son fonctionnement.

30 Dans cet exemple, on utilise une couche mince 24 en saphir monocristallin (figure 4). L'épaisseur de cette couche vaut par exemple 1 μm .

Par ailleurs, on forme un substrat 26 par exemple en silicium, pourvu d'une électrode 28 et d'une couche sacrificielle 30 au niveau d'une face 32 du substrat.

5 L'électrode 28 repose sur cette face, au-dessus de la couche sacrificielle 30.

L'électrode 28 est par exemple obtenue par dépôt par évaporation d'un métal, par exemple l'aluminium, au-dessus de la couche 30.

10 La couche mince 24 est alors reportée sur l'électrode 28. Pour ce faire, on peut utiliser la technique « Smart Cut » (TM) sur laquelle on reviendra à la fin de la présente description.

15 En variante, on utilise une couche épaisse de saphir monocristallin ; on la colle sur l'électrode 28, par exemple par collage moléculaire ; puis on amincit la couche épaisse, par exemple par meulage (en anglais, *grinding*), jusqu'à ce que l'on obtienne l'épaisseur souhaitée pour la couche mince.

20 Ensuite, on effectue le chargement électrique permanent de la couche 24 par implantation ionique ou électrique ou par décharge Corona (figure 5).

25 Les charges électriques envoyées dans la couche 24 portent la référence 34 sur la figure 5.

Puis on forme une autre électrode 36 sur la couche 24 (figure 6).

30 Pour ce faire, on dépose par exemple une couche d'aluminium sur cette couche 24 ; puis on procède à la structuration de la couche d'aluminium, par photolithographie et gravure.

Ensuite, on élimine la couche sacrificielle 30, par exemple par gravure chimique (figure 7A), d'où la formation d'une cavité 37 sous le résonateur.

Ainsi, on « libère » le résonateur formé :
5 il est alors entouré d'air.

La libération de la membrane constituée par le résonateur peut aussi être obtenue par une gravure du substrat 26 en silicium, par la face arrière de ce dernier. Il s'agit alors d'une gravure profonde dans ce
10 substrat.

On peut ajouter une couche intermédiaire entre l'électrode inférieure 28 et le substrat 26. Cette couche peut être utilisée comme couche d'arrêt de gravure.

Ceci est schématiquement illustré par la figure 7B où l'on voit la couche d'arrêt de gravure 37a, formée entre le substrat 26 et l'électrode 28, et un trou traversant 37b, formé à travers le substrat, sous la couche d'arrêt de gravure 37a.

On précise que la couche d'arrêt de gravure n'est pas indispensable ; son utilisation dépend du procédé de gravure et des matériaux utilisés.

Dans un troisième exemple, on fabrique un résonateur ayant une structure de type HBAR. Comme précédemment, on peut utiliser une couche mince en saphir. Et si le substrat est lui-même en saphir, on obtient une structure « tout saphir ».

Le substrat 38 est pourvu d'une électrode 40, par exemple en aluminium, qui repose sur une face
30 42 du substrat (figure 8).

Comme précédemment, on forme la couche mince 44 en saphir sur l'électrode 40 ; puis (figure 9) on effectue le chargement électrique permanent de la couche 44 (les flèches 46 symbolisant ce chargement),
5 pour transformer la couche 44 en électret ; et l'on forme une autre électrode 48 sur la couche 44 (figure 10).

Par exemple, si la couche 44 a une épaisseur de 1 μm et les électrodes 40 et 48 une
10 épaisseur de 100 nm respectivement, on peut utiliser un substrat 38 dont l'épaisseur vaut 50 μm .

Dans un quatrième exemple, on fabrique un résonateur comportant une couche mince en STO (SrTiO_3) sur un réseau de Bragg acoustique.

15 Dans ce cas, on utilise ce réseau pour confiner l'énergie acoustique du résonateur qui est constitué par la couche de SrTiO_3 et par deux électrodes.

Au sujet d'un tel réseau, on se reportera
20 par exemple à l'article de **K.M. Lakin et al.**, Development of miniature filters for wireless applications, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 43, n°12, pp. 2933-2939, 1995.

On forme le réseau de Bragg acoustique 50
25 (figure 11), par exemple en $\text{W/SiO}_2/\text{W/SiO}_2$, sur un substrat 52 par exemple en silicium. Puis on forme une électrode 53, par exemple en platine, sur le réseau de Bragg acoustique 50.

On reviendra sur un tel réseau à la fin de
30 la présente description.

Ensuite, on forme la couche mince 54 de STO sur l'électrode 53. Comme précédemment, la couche 54 peut être reportée ou affinée.

5 Puis on effectue le chargement électrique permanent de la couche 54 pour la transformer en électret, comme le montre la figure 12 où les flèches 56 symbolisent ce chargement.

10 Puis on forme une électrode 58, par exemple en platine, sur la couche 54, par dépôt puis structuration (figure 13).

Le procédé, objet de l'invention, peut également être mis en œuvre avec des matériaux diélectriques, non piézoélectriques, de moindre qualité acoustique que le saphir ou le STO, par exemple des 15 matériaux déposés par toutes les techniques possibles (notamment pulvérisation, évaporation, CVD, MOCVD, ALD, MBE), en particulier les matériaux suivants : SiO_2 , Si_xN_y , Al_2O_3 , HfO_2 , Y_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , SrTiO_3 déposé, $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$.

20 Un tel procédé est particulièrement intéressant pour la technologie intégrée sur silicium.

En effet, il s'agit d'un procédé qui peut être entièrement compatible avec des structures CMOS et qui n'utilise que des matériaux bien connus dans le 25 domaine des CMOS.

On illustre ceci par un exemple, en faisant référence aux figures 14 à 17.

Cet exemple utilise du SiO_2 amorphe, qui est déposé par CVD.

Le procédé mis en œuvre dans cet exemple est particulièrement avantageux dans le cas d'une intégration microélectronique.

5 En effet, comme on va le voir, il ne requiert que des matériaux qui sont totalement compatibles avec la technologie CMOS : Si, SiO₂ et Al ou Cu.

10 Les étapes de cet exemple correspondent aux étapes du deuxième exemple qui a été donné plus haut en faisant référence aux figures 4 à 7 (ces dernières correspondant respectivement aux figures 14 à 17), à ceci près que la couche mince de saphir est remplacée par une couche mince de SiO₂.

15 Cette couche est chargée par implantation ionique ou électronique ou par décharge Corona.

Puis, l'électrode supérieure est déposée et structurée.

20 Plus précisément, on forme une structure comprenant un substrat 60 par exemple en silicium, une couche sacrificielle 62, une électrode 64, par exemple en aluminium ou en cuivre, sur le substrat 60, au-dessus de la couche sacrificielle ; et l'on forme la couche mince 66 en SiO₂ sur l'électrode 64 (figure 14).

25 Puis on charge électriquement la couche 66 de façon permanente, pour former la couche d'électret (figure 15).

Le chargement est symbolisé par les flèches 68.

30 Ensuite, on forme une électrode 70, par exemple en aluminium ou en cuivre, sur la couche 66 (figure 16) ; puis on élimine la couche sacrificielle

62 (d'où la formation d'une cavité 72) pour libérer le résonateur qui est ainsi entouré d'air (figure 17).

Dans ce qui précède, on a donc décrit une variante du deuxième exemple. Mais on peut également
5 mettre en œuvre des variantes comparables pour les troisième et quatrième exemples.

Et, dans le premier exemple, on pourrait aussi remplacer la couche épaisse de saphir par une couche épaisse d'un matériau diélectrique, non
10 piézoélectrique, amorphe, par exemple une couche épaisse de SiO₂ amorphe.

On revient ci-après sur la décharge Corona.

La décharge Corona est généralement utilisée dans les photocopieurs, pour la production
15 d'ozone ou encore pour améliorer la mouillabilité de certains matériaux.

Dans le cas de la présente invention, son but est d'injecter des charges dans un matériau diélectrique qui est capable de les conserver pendant
20 une longue période (typiquement plusieurs années) : il s'agit d'un électret. Il en résulte l'apparition d'un potentiel de surface et la création d'un champ électrique au sein du matériau. Il s'agit d'un dipôle électrique, au même titre que l'aimant permanent est un
25 dipôle magnétique.

Afin de contrôler la valeur du champ électrique permanent, il est généralement plus aisé de contrôler le potentiel de surface de l'échantillon. En effet, grâce au système Corona triode (pointe 6/grille
30 8/électrode 4 - voir figure 2), le potentiel de surface

de l'échantillon 2 (V_s) prend la valeur du potentiel imposé à la grille (V_g) et ainsi :

$$E = \frac{V_s}{d} = \frac{V_g}{d}$$

5

où d est l'épaisseur de l'échantillon et E le champ électrique.

La quantité des charges qui sont présentes dans le matériau de l'échantillon dépend de l'épaisseur de ce matériau (d), de sa constante diélectrique (ϵ) et de la capacité du matériau à conserver préférentiellement les charges à sa surface, en profondeur, ou, pour des systèmes multicouches, aux interfaces.

15

On estime ainsi que si un matériau conserve ses charges (Q) à la surface (S), alors la densité surfacique de charge (σ) vaut :

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{\epsilon \epsilon_0 V_s}{d} \quad (\epsilon_0 : \text{permittivité du vide}).$$

Dans le cas d'un stockage en profondeur, il est plus difficile de déterminer la densité volumique de charge (ρ) dans le matériau.

20

Un ordre de grandeur typique est une charge de 2 mC/m² qui correspond à un potentiel de surface de 200 V sur 500 nm de SiO₂.

25

Le chargement peut être réalisé sous des conditions standard de température et de pression (20°C à 10⁵ Pa) ; néanmoins, il n'est pas exclu de le réaliser sous d'autres conditions et notamment à de plus hautes températures ou de plus basses pressions et

inversement. Il n'est pas non plus exclu de chauffer l'échantillon pendant son chargement, ceci ayant généralement pour effet d'augmenter la profondeur de pénétration des charges dans le matériau ainsi que la
5 stabilité.

Le chargement est généralement réalisé à l'air ambiant (O_2 : 20%, N_2 : 80%). Néanmoins, il n'est pas exclu de changer ces ratios, voire de changer de gaz.

10 La tension de la pointe (V_p) est de l'ordre de grandeur de quelques kilovolts. La tension de la grille (V_g) peut varier entre 0 V et 500 V. Les deux valeurs peuvent être positives (Corona+) ou négatives (Corona-). Ces tensions peuvent, par exemple, être
15 obtenues à l'aide de convertisseurs DC/HT.

Généralement, l'espace entre la pointe et la grille, de même que l'espace entre la grille et l'échantillon, est de l'ordre de 1 cm. Les trous de la grille ont, quant à eux, une taille millimétrique.

20 Pour le chargement, on peut utiliser une autre technique, à savoir la méthode de l'électrode humide (encore appelée méthode de l'électrode liquide), au lieu de la décharge Corona.

Au sujet de cette méthode, on pourra se
25 reporter à l'article de **K. Ikezaki et al.**, Thermally Stimulated Currents from Ion-Injected Teflon-FEP Film Electrets, Jpn. J. Appl. Phys. 20 (1981) pp. 1741-1747.

Le principe de cette méthode est schématiquement illustré par les figures 18, 19 et 20.

30 Sur ces figures, la référence 72 désigne une électrode supérieure en platine, la référence 74 un

tampon en coton, la référence 76 une solution aqueuse d'électrolytes, la référence 78 une couche constituant un échantillon, et la référence 80 une électrode inférieure qui porte l'échantillon et qui est mise à la
5 masse.

L'électrode supérieure est chargée négativement (par des moyens appropriés, non représentés) et entourée du tampon 74. Et l'électrode supérieure se trouve sur l'échantillon.

10 Dans une première étape (figure 18), on approche l'électrode supérieure de la solution. Cette dernière et l'échantillon se chargent alors positivement par influence.

Dans une deuxième étape (figure 19), la
15 solution est absorbée par le tampon et les charges positives restent sur l'échantillon. On éloigne alors l'électrode supérieure pourvue du tampon imbibé de la solution.

Une fois l'électrode supérieure escamotée,
20 on dispose donc d'un échantillon chargé positivement sur l'électrode 80 (figure 20).

On revient maintenant sur le procédé Smart Cut™.

Afin de réaliser une couche fine de
25 matériau monocristallin, on peut avantageusement avoir recours à deux types de techniques existantes de report de couches minces, permettant de conserver le caractère monocristallin : la technologie Smart Cut™, basée sur l'implantation d'ions gazeux (typiquement des ions
30 hydrogène), et la technique de collage/amincissement.

Ces techniques sont des techniques uniques qui permettent de reporter une couche monocristalline sur un substrat hôte. Ces techniques sont parfaitement maîtrisées sur le silicium et permettent entre autres
5 la fabrication industrielle de plaquettes SOI (pour Silicon On Insulator).

Ces deux techniques se différencient par la gamme des épaisseurs de matériau que l'on cherche à reporter, le procédé Smart Cut™ permettant d'atteindre
10 de très faibles épaisseurs qui peuvent être typiquement inférieures à environ 0,5 µm.

Le procédé Smart Cut™ (voir l'article de **M. Bruel**, Silicon on insulator material technology, Electronic letters, 31 (14), p.1201-1202, 1995), permet
15 la réalisation de substrats SOI, comprenant du silicium sur un isolant.

La technologie Smart Cut™ peut être schématiquement résumée par les quatre étapes essentielles suivantes :

20 Etape 1 : L'implantation d'hydrogène est réalisée sur un substrat A de Si oxydé. La couche d'oxyde constitue alors le futur film d'isolant enterré de la structure SOI. Cette étape d'implantation génère la formation d'une zone fragilisée en profondeur,
25 laquelle est constituée de microcavités dont la croissance est à la base du phénomène de détachement.

Etape 2 : Le collage par adhésion moléculaire permet de solidariser la plaque implantée A sur la plaque support (contre-plaque ou base) B qui
30 n'est pas forcément oxydée. Une préparation de surface

est nécessaire à l'obtention d'un collage de bonne qualité.

Etape 3 : L'étape de fracture est effectuée au niveau de la zone fragilisée au moyen d'un traitement thermique dans la gamme des 400°C-600°C. On obtient d'une part la structure SOI, et d'autre part le substrat initialement implanté A, pelé de la couche transférée. Ce dernier peut alors être recyclé pour la réalisation d'un autre transfert.

Etape 4 : Des traitements finaux sont constitués, d'une part, d'un recuit à haute température pour consolider l'interface de collage entre le film mince transféré et le substrat support et, d'autre part, d'un polissage qui permet d'obtenir l'épaisseur finale de film superficiel de silicium désirée, ainsi qu'un bon état de surface.

L'épaisseur de la couche transférée est directement reliée à l'énergie d'implantation du faisceau d'ions, et permet donc d'obtenir une bonne flexibilité au niveau des combinaisons d'épaisseurs (film mince et oxyde enterré). A titre d'exemple, l'épaisseur de silicium transférée peut aller de quelques dizaines de nanomètres à environ 2 μm en utilisant un implantateur classique (énergie inférieure à 210 keV).

Les couches transférées sont uniformes et homogènes en épaisseur car elles sont définies par une profondeur d'implantation et non par un amincissement mécanique.

Les coûts de fabrication sont réduits, d'une part, par le recyclage des substrats (les plaques

initialement implantées peuvent être réutilisées après transfert du film mince), et d'autre part, par l'utilisation d'équipements standard en microélectronique.

- 5 C'est un procédé flexible qui permet par exemple la réalisation d'hétérostructures. Ainsi, la technologie Smart CutTM permet par exemple de coupler les avantages d'un substrat support en Si massif (notamment coût, poids et caractéristiques mécaniques) et d'une couche mince active. On peut ainsi réaliser le
- 10 transfert de couches de différents matériaux tels que :
- le SiC - voir **L. DiCioccio et al.**, « Silicon carbide on insulator formation by Smart CutTM process », Master, Sci. Eng. vol. B46, pp.349-356

15 (1997) ;

 - le GaAs - voir **E. Jalaguier et al.**, « Transfer on thin GaAs film on silicon substrate by proton implantation process », Electronic letters, vol.34, n°4, pp.408-409 (1998) ;

20 - l'InP - voir **E. Jalaguier et al.**, « Transfer of thin InP film onto silicon substrate by proton implantation process », IEEE Proc.11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Davos (Suisse) (1999) ;

 - le GaN - voir **A. Tauzin et al.**, « Transfers of 2- inch GaN films onto sapphire substrates using Smart CutTM technology », Electronics Letters 2005, vol. 41, N°11 ;

25 - ou le Ga - voir **C. Deguet et al.** - « 200

30 mm Germanium-On-Insulator (GeOI) structures realized

from epitaxial Germanium wafers by the Smart Cut™ technology », Electro Chemical Society 2005.

Ces transferts peuvent être réalisés sur différents substrats, notamment quartz, Si, Ge, GaAs et saphir.

On revient à présent sur le miroir de Bragg.

Une solution pour isoler le résonateur acoustique de type BAW (pour Bulk Acoustic Wave) du substrat est fondée sur un principe très largement exploité en optique : le miroir de Bragg.

Sa transposition acoustique consiste à réaliser sous le résonateur un empilement dans lequel des couches quart d'onde de matériaux à basse impédance acoustique alternent avec des couches quart d'onde de matériaux à haute impédance acoustique. Dans cette configuration, les résonateurs sont aussi appelés SMR (pour Solidly Mounted Resonator).

Cette idée, proposée dès 1965 - voir l'article de **W.E. Newell** qui, comme les autres documents cités par la suite, est mentionné à la fin de la présente description - pour les résonateurs à quartz, a été reprise dans les résonateurs BAW SMR réalisés par **K.M. Lakin et al.** (1995).

Dans le cas du miroir de Bragg, le coefficient de réflexion dépend des matériaux et du nombre de couches utilisés et n'est pas constant sur toute la bande de fréquence. Nous allons donc préciser les paramètres-clefs et les caractéristiques de la réponse d'un miroir de Bragg.

Il est possible de calculer le coefficient de réflexion que présente un miroir de Bragg pour une onde longitudinale en utilisant un modèle de type ligne de transmission - voir l'article de **K.M. Lakin** (1991).
 5 Ce modèle permet de représenter l'impédance acoustique Z_n présentée par une couche en fonction de l'impédance acoustique de la couche inférieure Z_{n-1} par l'expression :

$$10 \quad Z_n = Z_{mat} \cdot \left(\frac{Z_{n-1} \cdot \cos(\theta_{mat}) + i \cdot Z_{mat} \cdot \sin(\theta_{mat})}{Z_{mat} \cdot \cos(\theta_{mat}) + i \cdot Z_{n-1} \cdot \sin(\theta_{mat})} \right),$$

où $\theta_{mat} = \frac{\omega \cdot e_{mat}}{V_{mat}}$ est la pulsation et Z_{mat} , e_{mat} et V_{mat} sont respectivement l'impédance acoustique, l'épaisseur et la vitesse de l'onde longitudinale de la
 15 couche.

A partir de cette expression, il est possible de déterminer l'impédance Z_{Bragg} présentée par le miroir de Bragg à l'interface entre l'électrode inférieure et le miroir de Bragg. Le coefficient de
 20 réflexion R pour l'onde longitudinale s'écrit :

$$R = \frac{Z_{elec} - Z_{Bragg}}{Z_{elec} + Z_{Bragg}},$$

où Z_{elec} représente l'impédance acoustique de
 25 l'électrode inférieure.

Le coefficient de réflexion présenté par le miroir de Bragg est fonction du nombre de couches. Le couple de matériaux SiO_2/W est couramment utilisé car

il permet, à partir de quatre couches, de remplir la fonction d'isolation acoustique.

Le nombre de couches nécessaire augmente lorsqu'on utilise des matériaux qui présentent un plus
5 faible rapport des impédances acoustiques. Ainsi, dans le cas du couple SiO_2/AlN , qui fut un des premiers à être exploité, deux couches sont nécessaires pour atteindre une réflexion suffisante - voir l'article de **M.A. Dubois**.

10 Le rapport des impédances acoustiques définit également la largeur de la bande passante de réflexion du miroir de Bragg. Plus le rapport des impédances acoustiques est élevé, plus la plage de fréquences sur laquelle le miroir de Bragg présente une
15 bonne réflexion est grande. Ainsi, cette bande de réflexion pour un miroir à six couches atteint 1,5 GHz pour le couple SiO_2/AlN et 2,8 GHz pour le couple SiO_2/W .

Le couple SiO_2/W présente donc l'avantage
20 d'utiliser peu de couches et de présenter une plage de réflexion très large. En revanche, son intégration dans des filtres BAW nécessite de graver le tungstène en dehors des zones actives afin d'éviter des couplages capacitifs parasites.

25 Les articles mentionnés plus haut sont les suivants :

W.E. Newell, Face-mounted piezoelectric resonators, Proc. of IEEE, pp. 575-581, 1965,

30 K.M. Lakin et al., Development of miniature filters for wireless applications, IEEE Trans.

Microwave Theory. Tech., vol. 43, n°12, pp. 2933-2939,
1995

K.M. Lakin, Fundamental properties of thin
film resonators, IEEE Freq. Contr. Symp., pp.201-206,
5 1991

M.A. Dubois, Aluminium nitride and lead
zirconate-titanate thin films for ultrasonics
applications : integration, properties and devices,
Thèse de l'EPFL, 1999.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif électromécanique, caractérisé en ce qu'il comprend :

- 5 - un empilement diélectrique (2E, 24E, 44E, 54E, 66E), ayant deux faces opposées et comportant au moins une couche d'électret, et
- deux électrodes (16, 20 ; 28, 36 ; 40, 48 ; 53, 58 ; 64, 70) respectivement portées par les
- 10 deux faces opposées de l'empilement.

2. Dispositif électromécanique selon la revendication 1, dans lequel la couche d'électret comporte des charges électriques permanentes, formant

15 un couplage électromécanique.

3. Dispositif électromécanique selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel l'empilement diélectrique en dehors de l'électret est

20 non-piézoélectrique.

4. Dispositif électromécanique selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel l'épaisseur de la couche d'électret (2E) est choisie de

25 quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres, et elle est de préférence inférieure ou égale à environ 1 μm .

5. Dispositif électromécanique selon l'une

30 quelconque des revendications 1 à 4, comportant en

outre un substrat sur une face duquel sont disposés l'empilement et les électrodes.

6. Dispositif électromécanique selon la
5 revendication 5, dans lequel le substrat (26, 60) est
pourvu d'une cavité (37, 72), ou trou, qui débouche au
moins sur la face du substrat sur laquelle repose l'une
(28, 64) des deux électrodes, ladite électrode étant au
moins en partie au-dessus de la cavité.

10

7. Dispositif électromécanique selon la
revendication 5, comportant en outre un réseau de Bragg
acoustique (50) ayant deux faces opposées dont l'une
repose sur une face du substrat et l'autre porte l'une
15 (53) des deux électrodes.

8. Dispositif électromécanique selon l'une
quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel la
couche d'électret (2E, 24E, 44E, 54E) est cristalline.

20

9. Dispositif électromécanique selon l'une
quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel la
couche d'électret (66E) est amorphe.

25 10. Procédé de fabrication d'un dispositif
électromécanique, caractérisé en ce qu'il comprend :

- la formation d'un empilement diélectrique
(2E, 24E, 44E, 54E, 66E), ledit empilement comportant
au moins une couche en matériau diélectrique,

- le chargement électrique permanent de ladite couche de matériau diélectrique pour former une couche d'électret (2, 24, 44, 54, 66), et

- la formation de première et deuxième électrodes (16, 20 ; 28, 36 ; 40, 48 ; 53, 58 ; 64, 70) respectivement sur ces deux faces opposées.

11. Procédé selon la revendication 10, dans lequel l'épaisseur de la couche d'électret (2E) est choisie de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres et elle est de préférence inférieure ou égale à environ 1 μm .

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 10 et 11, dans lequel l'empilement diélectrique et les électrodes sont réalisés au-dessus d'un substrat.

13. Procédé selon la revendication 12, dans lequel, à partir d'un substrat (26, 60) pourvu d'une couche sacrificielle (30, 62) et de la première électrode qui repose au-dessus de la couche sacrificielle,

- on forme, sur la première électrode, l'empilement diélectrique comportant au moins la couche (24, 66) en matériau diélectrique,

- on effectue le chargement électrique permanent de la couche (24, 66) en matériau diélectrique,

- on forme la deuxième électrode (36, 70) sur ledit empilement, et

- on élimine au moins en partie la couche sacrificielle (30, 62) pour former un trou, ou cavité, sous la première électrode.

5 14. Procédé selon la revendication 12, dans lequel

- on forme, au niveau d'une face du substrat, éventuellement une couche d'arrêt de gravure puis la première électrode qui repose sur cette face du substrat, au-dessus de la couche d'arrêt lorsqu'elle existe,

- on forme sur la première électrode, l'empilement diélectrique comportant au moins la couche en matériau diélectrique,

15 - on effectue le chargement électrique permanent de la couche (24, 66) en matériau diélectrique,

- on forme la deuxième électrode (36, 70) sur ledit empilement, et

20 - on grave le substrat à partir de la face opposée à la première face jusqu'à la couche d'arrêt lorsqu'elle existe, de façon à réaliser un trou, ou cavité, sous la première électrode.

25 15. Procédé selon la revendication 12, dans lequel

- on forme un réseau de Bragg acoustique (50) sur un substrat (52), au niveau d'une face de ce substrat,

- on forme ensuite, sur ce réseau, la première électrode et l'empilement diélectrique comportant au moins la couche en matériau diélectrique,

5 - on effectue le chargement électrique permanent de la couche (24, 66) en matériau diélectrique, et

- on forme la deuxième électrode (36, 70) sur ledit empilement.

10 16. Procédé selon l'une quelconque des revendications 10 à 15, dans lequel le chargement électrique permanent est effectué par une méthode choisie parmi l'implantation ionique et/ou
15 l'implantation électronique et/ou la décharge Corona et/ou la méthode de l'électrode humide.

1 / 8

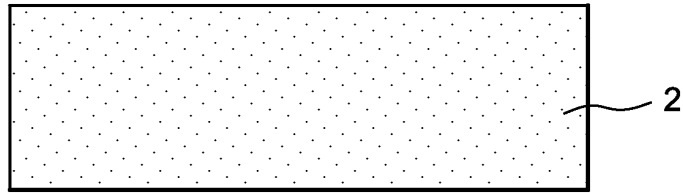


FIG. 1

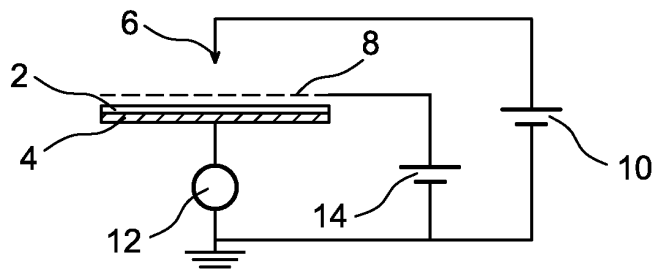


FIG. 2

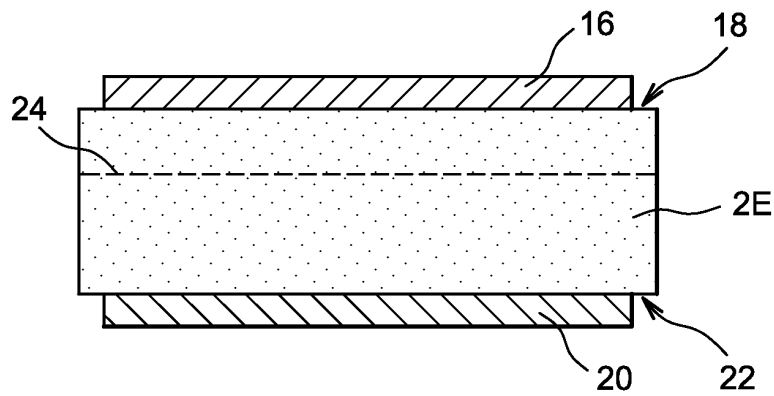


FIG. 3

2 / 8

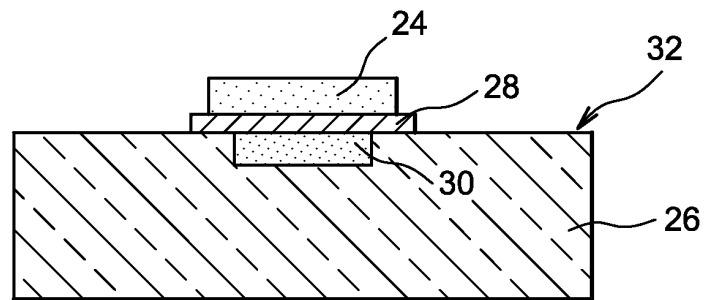


FIG. 4

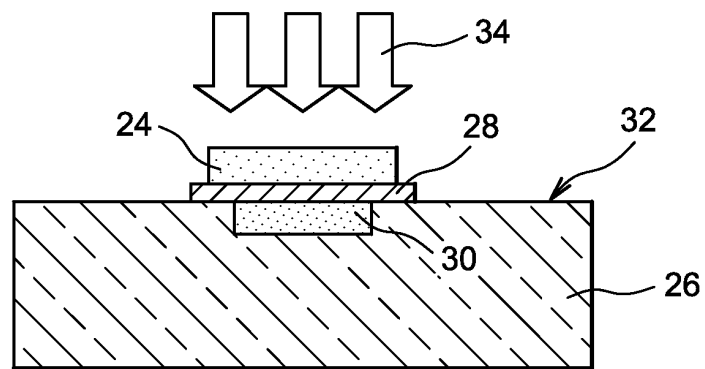


FIG. 5

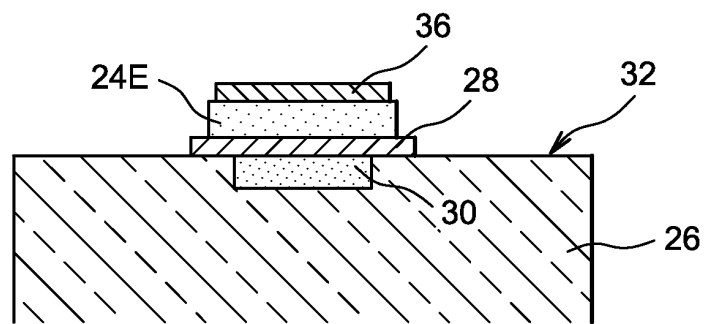


FIG. 6

3 / 8

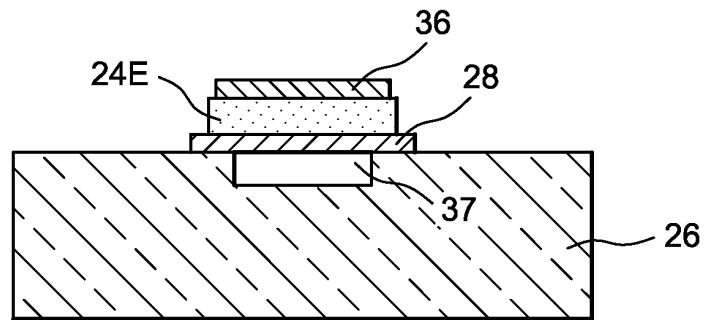


FIG. 7A

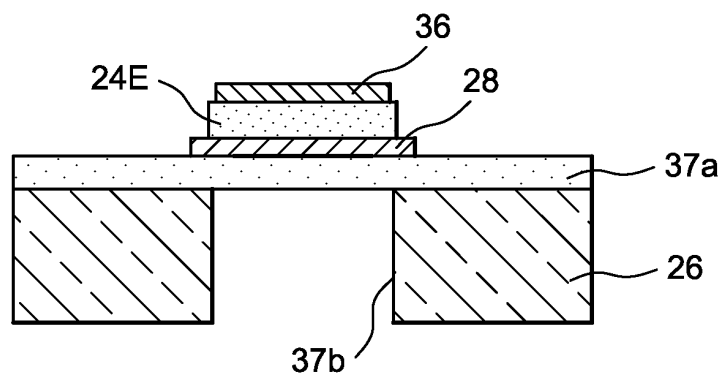


FIG. 7B

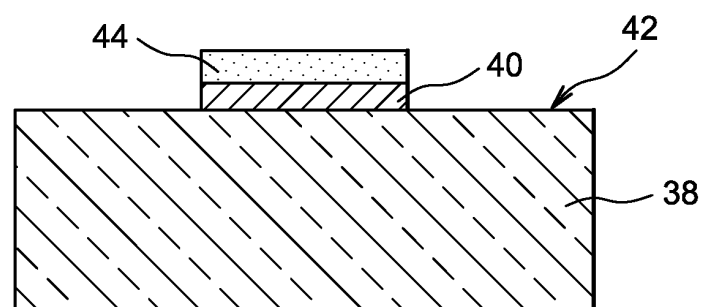


FIG. 8

4 / 8

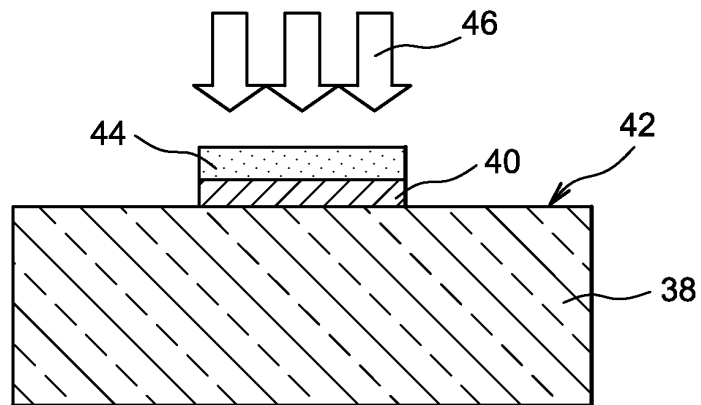


FIG. 9

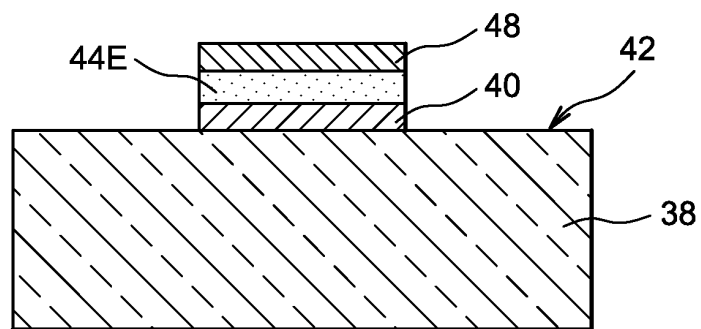


FIG. 10

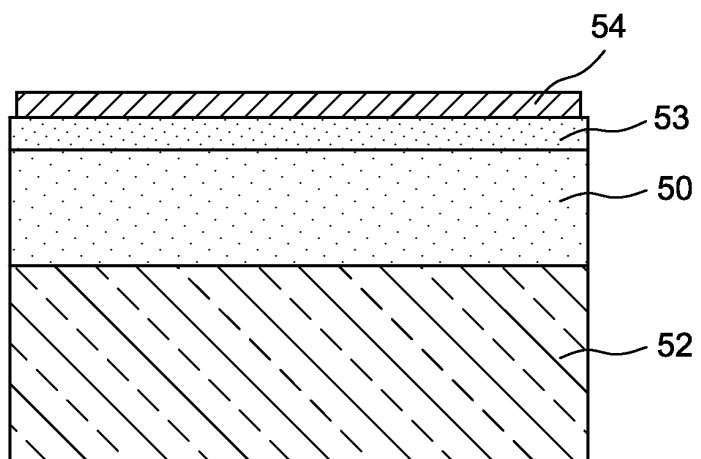


FIG. 11

5 / 8

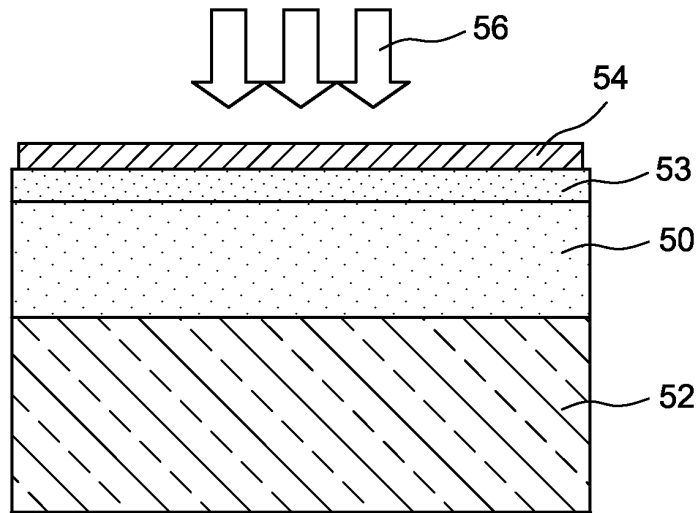


FIG. 12

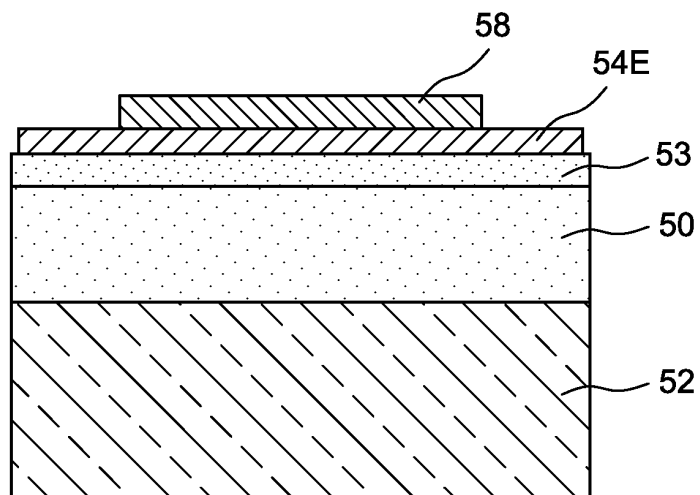


FIG. 13

6 / 8

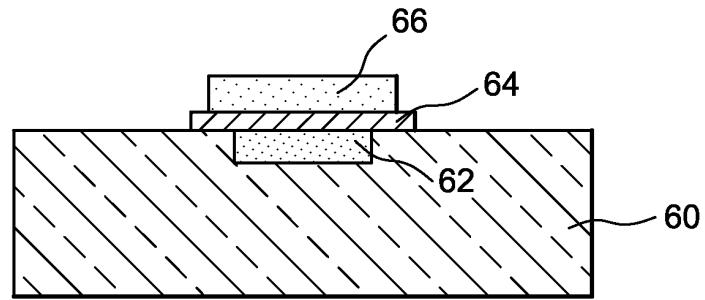


FIG. 14

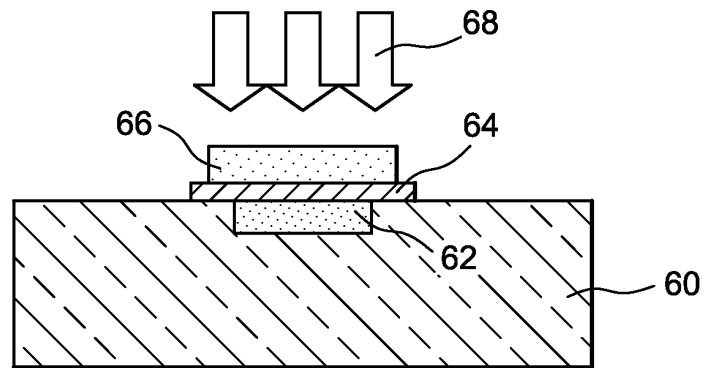


FIG. 15

7 / 8

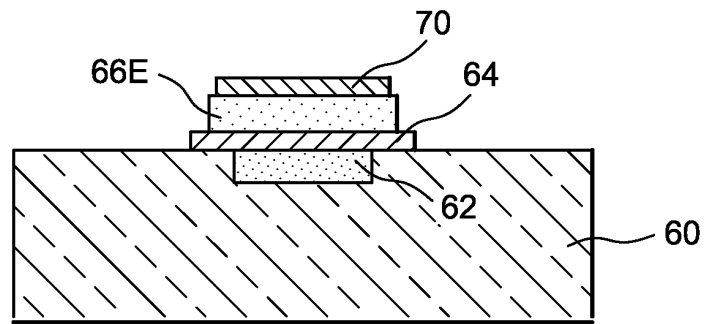


FIG. 16

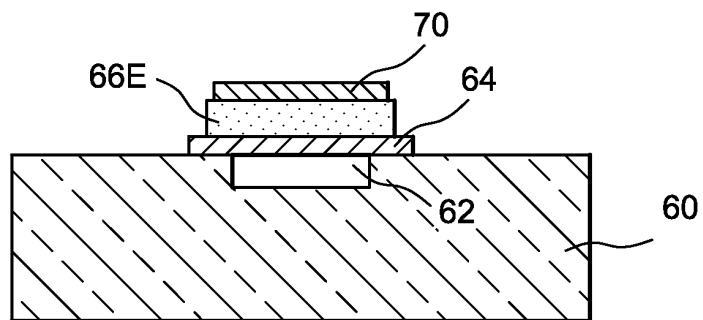


FIG. 17

8 / 8

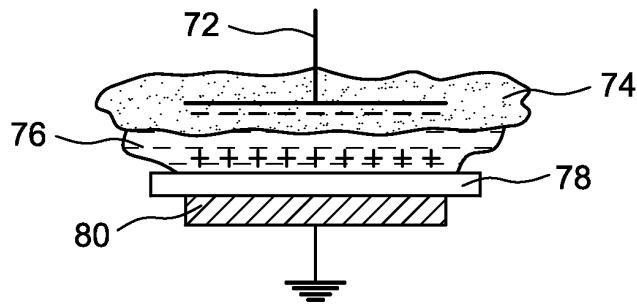


FIG. 18

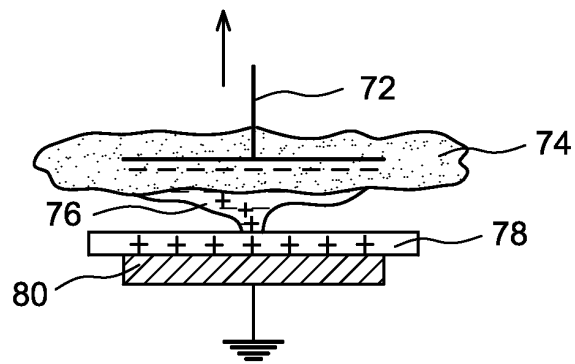


FIG. 19

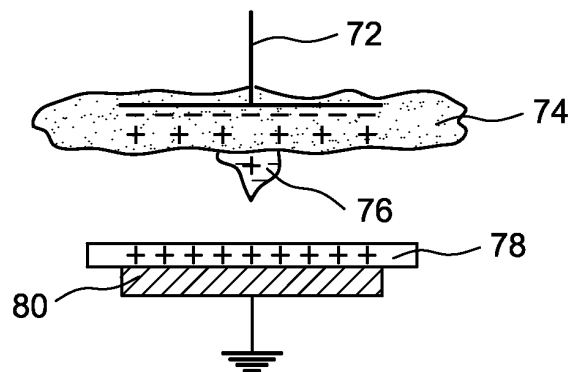


FIG. 20



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 736344
FR 0959514

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 2007/063793 A1 (JANG SEI-JOO [KR] ET AL JANG SEI-JOO [KR] ET AL) 22 mars 2007 (2007-03-22) * figure 9 *	1-16	H01L21/62 H03H9/02
A	----- GERHARD-MULTHAUPT R: "Electrets: Dielectrics with Quasi-Permanent Charge or Polarization" IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRICAL INSULATION, IEEE, US, vol. EI-1, no. 5, 1 octobre 1987 (1987-10-01), pages 531-554, XP011162936 ISSN: 0018-9367 * le document en entier * -----	16	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H03H
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
14 septembre 2010		Lecoutre, Renaud	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p>		<p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0959514 FA 736344**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **14-09-2010**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2007063793 A1	22-03-2007	US 7486003 B1	03-02-2009
		US 7741754 B1	22-06-2010
		US 2008104813 A1	08-05-2008
