

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

11 N° de publication :

3 028 257

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

21 N° d'enregistrement national :

14 60871

51 Int Cl⁸ : B 81 C 1/00 (2016.01), B 81 B 1/00

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 10.11.14.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 13.05.16 Bulletin 16/19.

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 :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : TRONIC'S MICROSYSTEMS Société
anonyme — FR.

72 Inventeur(s) : COLLET JOEL.

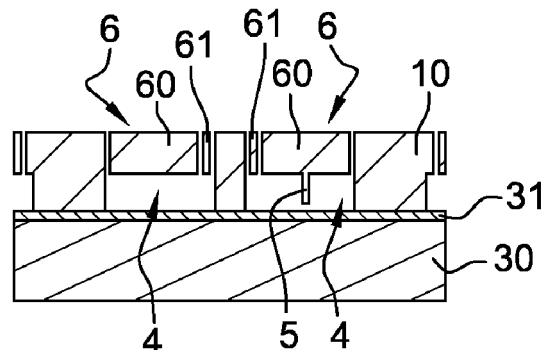
73 Titulaire(s) : TRONIC'S MICROSYSTEMS Société
anonyme.

74 Mandataire(s) : CABINET LAURENT ET CHARRAS.

54 PROCEDE DE FABRICATION D'UN DISPOSITIF ELECTROMECHANIQUE ET DISPOSITIF CORRESPONDANT.

57 Dispositif électromécanique caractérisé en ce qu'il
comprend:

- un empilement formé d'une couche isolante (31) interposée entre deux couches massives (10, 30),
- une structure micromécanique (60, 61) d'épaisseur prédéterminée en suspension au-dessus d'une cavité (4) de profondeur prédéterminée, la cavité (4) et la structure micromécanique (60, 61) formant l'une (10) des deux couches massives (10, 30) de l'empilement, et la couche isolante (31) formant le fond de ladite cavité (4).



FR 3 028 257 - A1



PROCEDE DE FABRICATION D'UN DISPOSITIF
ELECTROMECHANIQUE ET DISPOSITIF CORRESPONDANT

5 **Domaine technique**

L'invention se rapporte au domaine des systèmes électromécaniques formés d'éléments de dimensions micrométriques également appelés MEMS (acronyme pour « Micro-Electromechanical System ») et/ou d'éléments de dimensions
10 nanométriques également appelés NEMS (acronyme pour Nano-Electromechanical System »). L'invention concerne plus particulièrement un procédé de fabrication d'un tel système.

Etat de la technique antérieure

15

De manière classique, pour réduire la taille des systèmes électromécaniques tout en garantissant une bonne sensibilité des mesures, il est avantageux de combiner des éléments micro-électromécaniques et des éléments nano-électromécaniques. De tels systèmes électromécaniques sont maintenant connus
20 sous l'appellation M&NEMS pour « Micro- and Nano- ElectroMechanical Systems ».

On compte parmi ces systèmes M&NEMS, les capteurs de force, tels que les accéléromètres, les gyromètres ou encore les magnétomètres. De tels capteurs de
25 force se déclinent typiquement sous la forme de dispositifs comprenant une masse mobile maintenue mécaniquement par des éléments déformables comme des ressorts. La masse mobile est par ailleurs couplée mécaniquement à des structures déformables telles que des poutres de mesure servant à la mesure des déplacements de la masse. Ces poutres de mesures peuvent par exemple être des jauges de
30 contraintes ou encore des résonateurs. L'ensemble masse et poutre est maintenu en suspension au-dessus d'une cavité.

Par exemple, dans le cas d'un accéléromètre, lors d'un déplacement du capteur, une force inertielle s'applique à la masse mobile et induit une contrainte sur la poutre de mesure. Classiquement, dans le cas d'une poutre de mesure de
5 type résonateur, la contrainte appliquée par la masse induit une variation de la fréquence du résonateur, et dans le cas d'une poutre de mesure de type à résistance variable, la contrainte appliquée par la masse induit une variation de la résistance électrique. L'accélération est déduite à partir de ces variations.

10 On comprend donc qu'il est avantageux de combiner une masse mobile d'épaisseur micrométrique et une poutre de mesure d'épaisseur nanométrique. En particulier, une masse importante de l'élément mobile permet de maximiser la force inertielle et donc d'induire une contrainte suffisante à la poutre de mesure. En outre, en privilégiant une poutre de faible épaisseur, on maximise la contrainte
15 appliquée par la masse sur cette poutre. Un tel agencement a donc également l'avantage d'augmenter la sensibilité du capteur de force.

Le document EP 1 840 582 présente un tel capteur de force, à savoir un capteur dans lequel la masse mobile présente une épaisseur supérieure à celle de la
20 poutre, et propose en outre un procédé de fabrication d'un tel capteur basés sur une technologie SOI (« Silicon On Insulator » en anglais).

Selon le premier procédé de fabrication décrit dans ce document, la jauge de contrainte est tout d'abord gravée dans une couche superficielle d'un substrat SOI,
25 puis recouverte d'une protection. Une épitaxie de silicium est ensuite réalisée sur cette couche superficielle de manière à obtenir une couche d'épaisseur désirée pour la réalisation du corps d'épreuve. Cependant, la technique de croissance par épitaxie est lourde et coûteuse à mettre en œuvre, et ne permet pas d'obtenir des épaisseurs très importantes de couche de silicium. Du fait de cette limite, il est

difficile d'obtenir un dimensionnement optimal du corps d'épreuve, et donc de sa masse, pour maximiser la contrainte appliquée à la jauge.

Selon le deuxième procédé de fabrication décrit dans ce document, la masse mobile est tout d'abord gravée dans un substrat SOI. Une couche de silicium polycristallin d'épaisseur nanométrique est ensuite déposée en vue de la formation de la jauge de contrainte. Cependant, la faible épaisseur des couches en silicium polycristallin est encore difficile à contrôler, et ses propriétés mécaniques et électriques sont inférieures à celles d'une couche en silicium monocristallin. En outre, le dépôt d'une telle couche mince peut être soumis à des contraintes, telles que des déformations, pouvant affecter les performances de la jauge. Il est donc difficile, par ce procédé, d'obtenir une jauge présentant des caractéristiques mécaniques et électriques qui optimisent la sensibilité du capteur.

Une autre solution peut consister à utiliser deux substrats SOI distincts pour former séparément la masse mobile et la jauge, puis à sceller les deux substrats entre eux. Cependant, un désalignement des différents éléments, notamment entre la masse mobile, la jauge et la cavité, est susceptible de se produire lors du scellement, augmentant le risque d'altérer la sensibilité globale du capteur.

20

Exposé de l'invention

Dans ce contexte, la présente invention a notamment pour but de proposer une solution pour la fabrication de dispositifs électromécaniques exempte des limitations précédemment évoquées.

L'invention a ainsi pour objet un procédé de fabrication d'un dispositif électromécanique comprenant au moins une structure micromécanique (ou corps actif) d'épaisseur prédéterminée en suspension au-dessus d'une cavité de profondeur prédéterminée.

30

Selon l'invention, le procédé de fabrication comprend le scellement d'une première face d'un premier substrat avec un deuxième substrat. Le premier substrat est uniquement formé d'une couche massive, et le deuxième substrat est formé d'au moins une couche massive et d'une couche isolante. En outre, le scellement est réalisé de sorte que la couche isolante du deuxième substrat est interposée entre le premier substrat et la couche massive du deuxième substrat.

Ce scellement des deux substrats est suivi de la formation de la cavité ayant ladite profondeur prédéterminée dans le premier substrat. La formation de cette cavité est notamment obtenue par gravure d'une seconde face du premier substrat, cette seconde face étant opposée à la première face du premier substrat. En particulier, l'épaisseur de la portion restante du premier substrat qui est en regard de la cavité est sensiblement égale à ladite épaisseur prédéterminée. En d'autres termes, la profondeur finale de la cavité et l'épaisseur finale de la structure micromécanique sont définies par cette gravure.

La cavité est ensuite fermée par scellement de la seconde face du premier substrat avec un troisième substrat. Ce troisième substrat est formé d'une couche massive et d'une couche isolante. En particulier, la couche isolante de ce troisième substrat est mise en contact direct avec la seconde face du premier substrat pour la fermeture de la cavité, qui peut être obtenue par un autre scellement.

La couche massive et la couche isolante du deuxième substrat sont ensuite éliminées. Enfin, l'ouverture de la cavité et la formation de la structure micromécanique sont obtenues via une unique gravure de la seconde face du premier substrat.

On entend par structure micromécanique, une structure dont l'épaisseur est de dimensions micrométriques. Par ailleurs, la profondeur prédéterminée de la cavité est également de préférence de dimensions micrométriques.

5 Ainsi, le procédé de fabrication de l'invention est une solution simple et peu coûteuse qui permet de surmonter le problème d'alignement évoqué ci-avant, puisque l'ouverture de la cavité et la formation de la structure micrométrique sont obtenues simultanément à l'aide d'une seule étape de gravure. Cette unique gravure est notamment rendue possible par la formation successive de la future
10 cavité et de la future structure micromécanique dans un même substrat monocouche, communément appelé bulk. Ceci est rendu possible par l'utilisation de deux autres substrats bien distincts, l'un servant de substrat support pour délimiter le fond de la cavité, l'autre servant de substrat de manipulation (« handle substrate ») ou de support temporaire (« carriers »).

15

Un autre avantage apporté par ce procédé de fabrication est que le fond de la cavité du dispositif électromécanique ainsi obtenu est recouvert d'une couche isolante, généralement une couche d'oxyde. La présence de cette couche isolante a notamment l'avantage d'empêcher l'apparition d'irrégularités résultantes du
20 procédé chimique utilisé notamment pour libérer la cavité. En d'autres termes, du fait de cette couche isolante, le fond de la cavité ne sera pas attaqué lors du procédé de gravure mis en œuvre pour libérer la cavité. Le dispositif résultant est ainsi plus propre, c'est-à-dire contenant moins de poussières susceptibles de bloquer le corps actif ou d'interférer lors des mesures. Par ailleurs, le risque de
25 dégazage des surfaces internes de la cavité est réduit, ce qui permet d'assurer une pression stable au cours du temps dans le boîtier dans lequel le dispositif est encapsulé.

Avantageusement, le procédé de fabrication peut en outre comprendre, préalablement au scellement du premier substrat avec le deuxième substrat, la réalisation de marques d'alignement sur la première face du premier substrat.

5 Classiquement, ces marques d'alignement servent d'indicateurs pour assurer un positionnement correct des masques utilisés dans les procédés de gravure mis en œuvre pour la réalisation de la cavité et de la structure micromécanique. Ces marques d'alignements peuvent notamment se présenter sous la forme de structures prédéfinies (verniers, carrés, codes-barres...) et peuvent être obtenus de
10 façon classique, par exemple par une technique de gravure.

Le procédé peut également comprendre, préalablement à la réalisation de la cavité, la libération des marques d'alignement sur la seconde face du premier substrat.

15

En particulier, ces marques d'alignement sont recouvertes lors de l'étape de scellement du premier substrat avec le deuxième substrat, puis libérées préalablement à l'étape de gravure de la cavité de sorte à les rendre visibles du côté de la seconde face du premier substrat.

20

La récupération de ces marques d'alignement peut être obtenue par lithographie et gravure de la seconde face du premier substrat.

En pratique, le procédé de fabrication peut en outre comprendre,
25 préalablement à la réalisation de la cavité, l'amincissement du premier substrat.

En effet, la couche massive du premier substrat utilisé peut présenter typiquement une épaisseur initiale de plusieurs centaines de micromètres, par exemple 450 μm . Par ailleurs, l'épaisseur utile de la couche massive pour la
30 réalisation de la cavité et de la structure micromécanique est par exemple inférieure à une centaine de micromètres, par exemple 50 μm . Dans ce cas, il est

alors nécessaire de prévoir une étape d'amincissement préalable de cette couche massive pour éviter des gravures trop profondes. Cet amincissement permet donc d'obtenir une épaisseur résiduelle du premier substrat qui soit sensiblement égale à l'épaisseur prédéterminée de la structure micromécanique ajoutée à la profondeur 5 prédéterminée de la cavité. Cette épaisseur résiduelle correspond typiquement à ladite épaisseur utile. En pratique, cet amincissement peut être obtenu par meulage ou gravure chimique, gravure mécano-chimique ou gravure sèche.

Selon une variante, le procédé de fabrication peut en outre comprendre, 10 simultanément à la réalisation de la cavité, la formation d'au moins une butée à l'intérieur de la cavité, la butée s'étendant du premier substrat en direction du troisième substrat.

En pratique, la réalisation de la cavité et de la butée (ou stoppeur) peut être 15 obtenue par :

- une première lithographie puis une première gravure pour graver partiellement la cavité dans le premier substrat et pour définir la hauteur de la butée. La profondeur de cette première gravure est donc sensiblement égale à la distance souhaitée (par exemple $1\mu\text{m}$) entre l'extrémité libre de la butée et la couche isolante du troisième 20 substrat délimitant le fond de la cavité ; et
- une deuxième lithographie et une deuxième gravure afin de former définitivement la butée ainsi que la cavité.

Ainsi, la butée est solidarisée, non pas avec le fond de la cavité, mais est 25 solidarisée au corps actif et notamment à la structure MEMS.

Selon un autre mode de réalisation dans lequel le dispositif électromécanique comprend également une structure nanomécanique, le procédé de fabrication peut en outre comprendre, préalablement au scellement du premier substrat avec le
5 deuxième substrat, la réalisation d'au moins un creux de profondeur prédéfinie sur la première face du premier substrat. Le fond de ce creux est notamment recouvert par une couche diélectrique. Par ailleurs, dans cet autre mode de réalisation, la réalisation de la cavité comprend en outre la réalisation d'un trou traversant reliant la cavité au creux.

10

Le creux sert notamment de marquage d'emplacement de la future structure nano-mécanique. On entend par structure nanomécanique, une structure dont l'épaisseur est de dimensions nanométriques. En pratique, le creux peut se présenter sous la forme d'un évidement et est réalisé préalablement à la réalisation
15 des marques d'alignement. Ce marquage peut être obtenu par une double lithographies de la première face du premier substrat pour :

- définir un trou peu profond, par exemple inférieur à $1\mu\text{m}$, pour chaque structure nanométrique sur la première face du premier substrat, chaque trou définissant l'emplacement d'une future structure nanomécanique qui sera réalisée ; et
- 20 - en protéger le fond de chaque trou par un diélectrique.

Avantageusement, le deuxième substrat est formé d'une couche isolante interposée entre une couche massive et une couche fine par rapport à la couche massive. En outre, la première face du premier substrat est de préférence mise en
25 contact direct avec la couche fine du deuxième substrat.

En pratique, le deuxième substrat est donc formé d'une couche isolante, par exemple une couche d'oxyde, interposée entre une couche massive, d'épaisseur micrométrique et destinée typiquement à la manipulation du dispositif en formation, et une couche fine dite couche active, typiquement en silicium, d'épaisseur nanométrique.

Ainsi, l'étape de scellement du premier substrat avec le deuxième substrat se traduit notamment par le scellement direct de la couche active nanométrique du deuxième substrat avec la couche massive micrométrique du premier substrat.

Selon une variante, la réalisation de l'unique gravure pour l'ouverture de la cavité et la formation de la structure micromécanique comprend également la formation de la structure nanomécanique dans la couche fine du deuxième substrat, cette structure nanomécanique étant en regard du trou traversant. En d'autres termes, simultanément à l'ouverture de la cavité et à la formation de la structure micromécanique, la structure nanomécanique est formée dans la couche fine du deuxième substrat.

En pratique, l'étape de gravure mise en œuvre pour simultanément ouvrir la cavité et pour former la structure micromécanique, peut également servir à former la structure nanomécanique. En d'autres termes, la cavité et les structures micro- et nano-mécaniques sont obtenues via à une seule et unique gravure.

Bien entendu, préalablement à cette étape de gravure unique, il est également possible de prévoir une étape pour éliminer la couche massive et la couche isolante du deuxième substrat pour ne laisser subsister que la couche active.

Selon une variante, il est également possible de prévoir une étape de dopage de la couche fine du deuxième substrat. En pratique, le dopage de la couche fine peut être obtenu par différentes techniques de dopage, telles que par exemple par diffusion, ou par implantation ionique par immersion plasma ou par faisceau d'ions.

L'invention a également pour objet un dispositif électromécanique comprenant :

- 10 - un empilement formé d'une couche isolante interposée entre deux couches massives,
- une structure micromécanique d'épaisseur prédéterminée en suspension au-dessus d'une cavité de profondeur prédéterminée, la cavité et la structure micromécanique formant l'une des deux couches massives de l'empilement, et la
- 15 couche isolante formant le fond de la cavité.

Selon une variante, le dispositif électromécanique peut en outre comprendre au moins une butée à l'intérieure de la cavité, la butée s'étendant de la structure micromécanique en direction de la couche isolante.

20

Selon un mode de réalisation, la couche massive comprend la structure micromécanique interposée entre la couche isolante et une couche fine par rapport à la couche massive. Par ailleurs, selon ce mode de réalisation, le dispositif peut en outre comprendre une structure nano-mécanique formée dans la couche fine et un

25 trou traversant reliant la structure nanomécanique à la cavité.

En pratique :

- la structure nanomécanique peut être un élément déformable de mesure tel qu'une jauge de contraintes, une membrane déformable, ou encore un résonateur
- 30 nano-mécanique ;

- la structure micromécanique peut être formée d'une masse mobile couplée à des éléments déformables tels que des ressorts, une membrane, ou des structures nanomécanique ;
- la structure nanomécanique peut présenter une épaisseur inférieure à $1\mu\text{m}$;
- 5 - la structure micromécanique peut présenter une épaisseur inférieure à $100\mu\text{m}$ et supérieure à $5\mu\text{m}$;
- le ratio des épaisseurs des structures micromécaniques et nanomécaniques est de l'ordre de 100 ;
- les couches massives et la couche fine sont de préférence en silicium et les
- 10 couches isolantes sont de préférence en oxyde.

Brève description des dessins

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront clairement de la description qui en est faite ci-après, à titre indicatif et nullement limitatif, en

- 15 référence aux figures annexées, dans lesquelles :
- les figures 1A à 1J sont des vues schématiques illustrant les étapes du procédé de fabrication d'un dispositif électromécanique intégrant une structure active de dimensions micrométriques, selon un mode de réalisation de l'invention ; et
 - 20 - les figures 2A à 2K sont des vues schématiques illustrant les étapes du procédé de fabrication d'un dispositif électromécanique intégrant une structure active de dimensions micrométriques et une structure active de dimensions nanométriques, selon un autre mode de réalisation de l'invention.

25 **Exposé détaillé de modes de réalisations particuliers**

Les figures 1A à 1J illustrent les différentes étapes d'un procédé de fabrication d'un dispositif électromécanique selon un mode de réalisation. En particulier, le dispositif électromécanique que l'on souhaite obtenir est illustré à la

30 figure 1J et intègre notamment une structure micromécanique **60**, **61** d'épaisseur

prédéterminée, par exemple 20 μm , en suspension au-dessus d'une cavité **4** de profondeur prédéterminée, par exemple 5 μm . Par exemple, la structure micromécanique **60**, **61** est un corps actif formé par exemple d'une masse mobile **60** couplée à des ressorts **61**. Dans une variante, le dispositif
5 électromécanique peut en outre comprendre une butée **5** qui s'étend de la structure micromécanique **60**, **61** en direction du fond de la cavité **4**. Par exemple, l'espacement entre l'extrémité libre de la butée **5** et le fond de la cavité **4** est sensiblement égal à 1 μm .

10 Plus précisément, la cavité et la structure micromécanique sont réalisées, par gravure, dans un même substrat monocouche qui correspond au premier substrat **1** illustré à la figure 1A. Ce premier substrat **1**, communément appelé « bulk », est donc uniquement formé d'une couche massive **10**, par exemple une couche de silicium de 450 μm d'épaisseur, et présente deux faces opposées, à savoir une
15 première face **11** et une deuxième face **12**.

Tout d'abord, pour assurer un positionnement correct des masques qui seront utilisés lors des gravures, des marques d'alignement **13** sont réalisés (figure 1B) sur la première face **11** de ce premier substrat **1**.

20

En outre, pour faciliter la manipulation de ce premier substrat **1**, un deuxième substrat **2** est scellé à ce premier substrat **1** (figure 1C). Ce deuxième substrat **2** est formé d'une couche massive **20**, par exemple une couche de silicium de 450 μm d'épaisseur, et d'une couche isolante **21**, par exemple une couche d'oxyde de 1 μm
25 d'épaisseur. En particulier, la couche isolante **21** du deuxième substrat est mise en contact direct avec la première face **11** du premier substrat **1**. A ce stade, les marques d'alignements **13** réalisées précédemment sont donc recouvertes par ce deuxième substrat **2**.

Puisque la cavité et la structure micromécanique doivent être réalisées dans ce premier substrat **1**, un amincissement de ce premier substrat **1** est tout d'abord réalisé (figure 1D). Plus précisément, l'amincissement est tel que l'épaisseur résiduelle de ce premier substrat **1** corresponde sensiblement à l'épaisseur 5 prédéterminée de la structure micromécanique **60**, **61** ajoutée à la profondeur prédéterminée de la cavité **4**. De manière classique, cet amincissement peut par exemple être obtenu par meulage ou gravure chimique.

Les marques d'alignement **13** sont ensuite libérées (figure 1E) par 10 lithographie et gravure de la seconde face **12** du premier substrat **1**. Ces marques d'alignement **13** sont ainsi rendues visibles du côté de la seconde face **12** du premier substrat **1**.

Dans le cas où une butée **5** est prévue, on réalise une lithographie puis une 15 gravure partielle (figure 1F) afin d'amorcer la gravure de la cavité **4** dans le premier substrat **1** aminci et afin de définir la hauteur de la butée **5**. En d'autres termes, la profondeur de la gravure partielle est sensiblement égale à l'espacement souhaitée entre l'extrémité libre de la butée **5** et le fond de la cavité **4**.

20 Bien entendu, lorsqu'une butée **5** n'est pas nécessaire, l'étape de gravure partielle peut être omise.

Une simple lithogravure (figure 1G) est ensuite réalisée afin de former la butée **5** et de définir la profondeur de la cavité **4** dans le premier substrat **1** aminci. 25 A ce stade, les dimensions de la cavité **4** et de la butée **5** correspondent d'ores et déjà aux dimensions finales souhaitées. Par ailleurs, l'épaisseur de la portion restante du premier substrat en regard de la cavité **4** est sensiblement égale à l'épaisseur finale souhaitée de la structure micromécanique **60**, **61**. Ainsi, la cavité **4**, la butée **5** et l'épaisseur de la structure micromécanique **60**, **61** sont 30 définies par cette unique gravure.

L'étape suivante consiste à sceller un troisième substrat **3** avec le premier substrat **1** pour fermer la cavité **4** ainsi formée (figure 1H). Ce troisième substrat est également formé d'une couche massive **30**, par exemple une couche de silicium d'épaisseur supérieure à $300\mu\text{m}$, et d'une couche isolante **31**, par exemple une couche d'oxyde de $1\mu\text{m}$ d'épaisseur. En outre, ce scellement est tel que la couche isolante **31** de ce troisième substrat **3** est mise en contact direct avec la seconde face **12** du premier substrat **1**.

10 Le deuxième substrat **2** est ensuite éliminé (figure 1I), et une seule et unique gravure (figure 1J) du premier substrat **1** est réalisée pour simultanément ouvrir la cavité **4** et former la structure micromécanique **60**, **61**.

Le dispositif électromécanique ainsi obtenu (figure 1J) comprend donc un empilement formé d'une couche isolante **31** interposée entre deux couches massives **10**, **30**. La cavité **4** et la structure micromécanique **60**, **61** sont réalisées dans l'une **10** des deux couches massives de l'empilement, et la couche isolante **31** forme le fond de la cavité **4**.

20 Dans un autre mode de réalisation, le dispositif électromécanique illustré à la figure 2K que l'on souhaite obtenir intègre, outre la structure micromécanique **60**, **61**, la cavité **4** et la butée **5** décrites ci-avant, une structure nanométrique **7** d'épaisseur prédéterminée, par exemple 250nm , également en suspension au-dessus de la cavité **4**. Cette structure nanomécanique **7** est par exemple une jauge de contrainte. Le procédé de fabrication d'un tel dispositif est illustré aux figures 2A à 2K.

Comme précédemment, la cavité **4**, la butée **5** et la structure micromécanique **60**, **61** sont réalisés dans un même substrat monocouche (figure 2A) identique à celui utilisé précédemment.

5

Tout d'abord, pour marquer l'emplacement de la future structure nanomécanique, un creux **14** est formé (figure 2B) sur la première face **11** du premier substrat **1**, par exemple par lithogravure. Ce creux de profondeur prédéterminée, généralement inférieure à $1\mu\text{m}$, présente un fond recouvert par une
10 couche diélectrique **15**, par exemple une couche d'oxyde.

Ensuite, comme précédemment, pour assurer un positionnement correct des masques utilisés lors des gravures, des marques d'alignement **13** sont réalisés également (figure 2C) sur la première face **11** de ce premier substrat **1**.

15

Par ailleurs, pour faciliter la manipulation de ce premier substrat et pour sceller la couche fine dans laquelle sera définie la structure nanomécanique, un deuxième substrat **2** est scellé à ce premier substrat **1** (figure 2D). Ce deuxième substrat **2** est formé d'une couche isolante **21**, par exemple une couche d'oxyde
20 de $1\mu\text{m}$ d'épaisseur, interposée entre une couche massive **20**, par exemple une couche de silicium de $450\mu\text{m}$ d'épaisseur, et une couche fine **22** par rapport à la couche massive **20**. La couche fine **22** est notamment une couche dite « active », typiquement une couche de silicium d'épaisseur nanométrique, par exemple 250nm . Lors du scellement, la couche fine **22** du deuxième substrat **2** est
25 mise en contact direct avec la première face **11** du premier substrat **1**. A ce stade, les marques d'alignements **13** ainsi que le creux **14** sont recouverts par ce deuxième substrat **2**.

Tout comme précédemment, le premier substrat **1** est aminci (figure 2E) de sorte que l'épaisseur résiduelle de ce premier substrat **1** corresponde également sensiblement à l'épaisseur prédéterminée de la structure micromécanique **60**, **61** ajoutée à la profondeur prédéterminée de la cavité **4**. Par ailleurs, les marques d'alignement **13** sont également libérées (figure 2F) par lithographie et gravure de la seconde face **12** du premier substrat **1**.

De même, une lithographie puis une gravure partielle (figure 2G) sont ensuite réalisées afin d'amorcer la gravure de la cavité **4** dans le premier substrat **1** aminci et de définir l'espacement entre le fond de la cavité **4** et l'extrémité libre de la butée **5**. Bien entendu, lorsqu'une butée n'est pas nécessaire, l'étape de gravure partielle peut être omise.

Une simple lithogravure (figure 2H) est ensuite réalisée afin de former la butée **5**, de définir la profondeur de la cavité **4** dans le premier substrat **1** aminci, et de réaliser un trou traversant **16** pour relier la cavité **4** au creux **14**. En pratique, la couche diélectrique **15** posée au fond du creux **14** protège la couche fine **22** du deuxième substrat lors de cette lithogravure, puis est éliminée.

20

Un troisième substrat **3** identique au troisième substrat utilisé précédemment, est alors scellé avec le premier substrat pour fermer la cavité **4** ainsi formée (figure 2I). Ce scellement est tel que la couche isolante **31** de ce troisième substrat **3** est mise en contact direct avec la seconde face **12** du premier substrat **1**.

25

L'étape suivante consiste à éliminer la couche massive **20** et la couche isolante **21** du deuxième substrat (figure 2J) pour ne laisser subsister que la couche fine **22**, et à réaliser une seule et unique gravure (figure 2K) pour simultanément ouvrir la cavité **4** et former les structures micromécanique **60**, **61** et 5 nanomécanique **7**. En particulier, la structure nanomécanique **7** est réalisée en regard du trou traversant **16**.

Le dispositif électromécanique ainsi obtenu (figure 2K) comprend donc la cavité **4**, la structure micromécanique **60**, **61** et la butée **5** formées dans la même 10 couche massive **10**, ainsi que la structure nanomécanique **7** formée dans la couche fine **22** disposée sur la couche massive **10**. En outre, la couche isolante **31** forme le fond de la cavité **4**.

Les procédés de fabrication présentés sont donc simples et globalement peu 15 coûteux bien que trois substrats soient utilisés. Ils permettent notamment d'obtenir des dispositifs électromécaniques de type MEMS ou M&NEMS moins encombrants et plus performants, dans lesquels au moins la cavité et la structure micromécanique sont réalisées dans un unique substrat monocouche. Par ailleurs, la durée de vie d'un tel dispositif est accrue grâce à la couche isolante au fond de la 20 cavité qui évite l'apparition d'irrégularités dans le fond de la cavité lors des gravures. Enfin, la solution proposée offre également la possibilité d'adapter l'épaisseur de la structure micrométrique par simple réglage des équipements de gravure.

REVENDICATIONS

1. Procédé de fabrication d'un dispositif électromécanique comprenant au moins une structure micromécanique (60, 61) d'épaisseur prédéterminée en suspension au-dessus d'une cavité (4) de profondeur prédéterminée, *caractérisé* en ce que le procédé comprend :
- le scellement d'une première face (11) d'un premier substrat (1) avec un deuxième substrat (2), le premier substrat étant uniquement formé d'une couche massive (10), le deuxième substrat (2) étant formé d'au moins une couche massive (20) et d'une couche isolante (21), la couche isolante (21) du deuxième substrat (2) est interposée entre le premier substrat (1) et la couche massive (20) du deuxième substrat (2) ;
 - la formation de la cavité (4) ayant ladite profondeur prédéterminée dans le premier substrat (1), par gravure d'une seconde face (12) du premier substrat (1) opposée à ladite première face (11), l'épaisseur de la portion restante du premier substrat (1) en regard de la cavité (4) formée est sensiblement égale à ladite épaisseur prédéterminée ;
 - la fermeture de la cavité (4) par scellement de la seconde face (12) du premier substrat (1) avec un troisième substrat (3), ledit troisième substrat étant formé d'une couche massive (30) et d'une couche isolante (31) en contact direct avec la seconde face (12) du premier substrat (1) ;
 - l'élimination de la couche massive (20) et la couche isolante (21) du deuxième substrat (2) ; et
 - la réalisation d'une unique gravure de la seconde face (12) du premier substrat (1) pour l'ouverture de la cavité (4) et la formation de ladite structure micromécanique (60, 61).

2. Procédé de fabrication selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend en outre, préalablement au scellement du premier substrat (1) avec le deuxième substrat (2), la réalisation de marques d'alignement (13) sur la première
5 face (11) du premier substrat (1).
3. Procédé de fabrication selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'il comprend en outre, préalablement à la réalisation de la cavité, la libération des marques d'alignement (13) sur la seconde face (12) du premier substrat (1).
- 10 4. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il comprend en outre, préalablement à la réalisation de la cavité (4), l'amincissement du premier substrat (1).
- 15 5. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce qu'il comprend en outre, simultanément à la réalisation de la cavité (4), la formation d'au moins une butée (5) s'étendant du premier substrat (1) en direction du troisième substrat (3).
- 20 6. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce qu'il comprend en outre, préalablement au scellement du premier substrat (1) avec le deuxième substrat (2), la réalisation d'au moins un creux (14) de profondeur prédéfinie sur la première face (11) du premier substrat (1), le fond dudit creux étant recouvert par une couche diélectrique ;
- 25 et en ce que la réalisation de la cavité (4) comprend en outre la réalisation d'un trou traversant (16) reliant la cavité (4) audit creux (14).

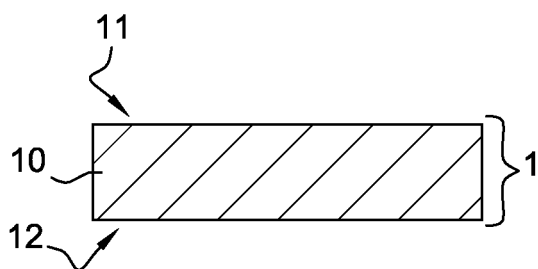
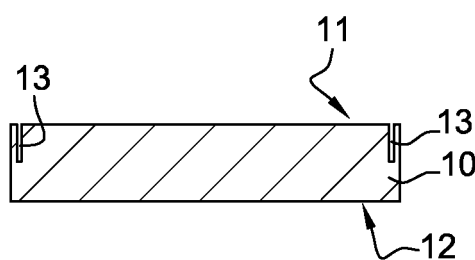
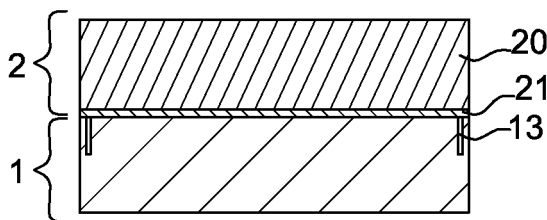
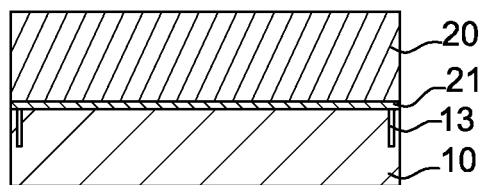
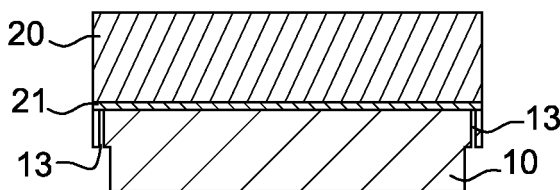
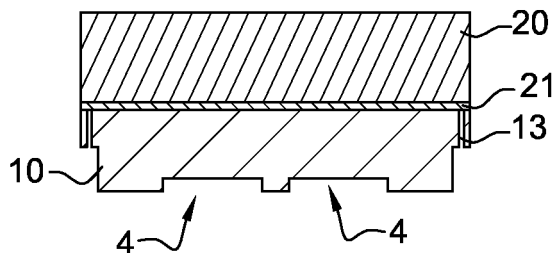
7. Procédé de fabrication selon la revendication 6, caractérisé en ce que le deuxième substrat est formé d'une couche isolante (21) interposée entre une couche massive (20) et une couche fine (22) par rapport à la couche massive (20),
5 et en ce que la première face (11) du premier substrat (1) est mise en contact direct avec la couche fine (22) du deuxième substrat (2).
8. Procédé de fabrication selon la revendication 6 ou 7, caractérisé en ce que la réalisation de ladite unique gravure pour l'ouverture de la cavité (4) et la formation
10 de la structure micromécanique (60, 61) comprend également la formation d'une structure nanomécanique (7) dans la couche fine (22) du deuxième substrat (2), ladite structure nanomécanique (7) étant en regard dudit trou traversant (16).
9. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 6 à 8, caractérisé en ce
15 qu'il comprend en outre un dopage de la couche fine (22) du deuxième substrat.
10. Dispositif électromécanique caractérisé en ce qu'il comprend :
- un empilement formé d'une couche isolante (31) interposée entre deux couches massives (10, 30),
 - 20 - une structure micromécanique (60, 61) d'épaisseur prédéterminée en suspension au-dessus d'une cavité (4) de profondeur prédéterminée, la cavité (4) et la structure micromécanique (60, 61) formant l'une (10) des deux couches massives (10, 30) de l'empilement, et la couche isolante (31) formant le fond de ladite cavité (4).
- 25 11. Dispositif électromécanique selon la revendication 10, caractérisé en ce qu'il comprend en outre au moins une butée (5) à l'intérieure de la cavité, la butée (5) s'étendant de la structure micromécanique en direction de ladite couche isolante (31).

12. Dispositif électromécanique selon l'une des revendications 10 ou 11, caractérisé

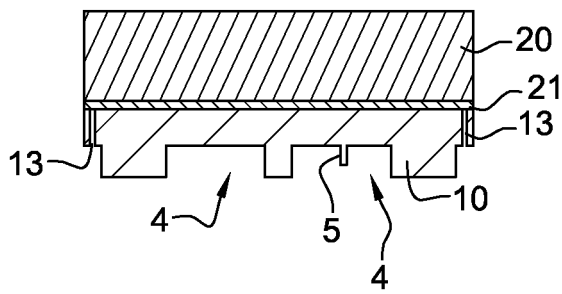
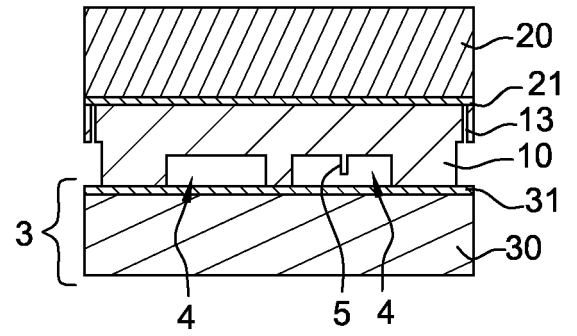
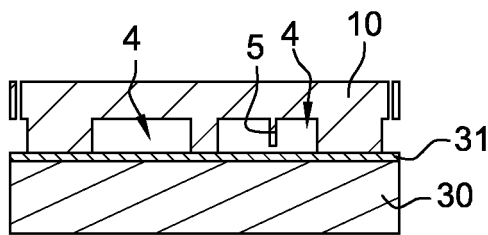
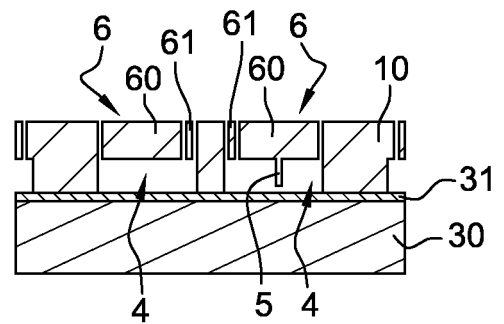
en ce que la couche massive (10) comprenant la structure micromécanique est
5 interposée entre la couche isolante (31) et une couche fine (22) par rapport à la couche massive (10),

et en ce qu'il comprend en outre une structure nanomécanique (7) formée dans la couche fine (22) et un trou traversant (16) reliant la structure nanomécanique (7) à la cavité (4).

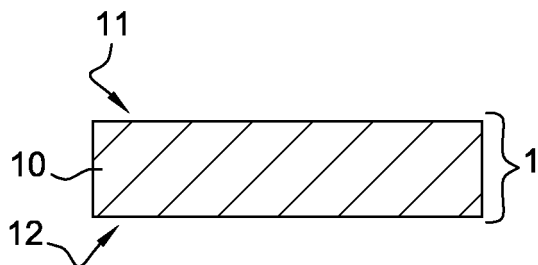
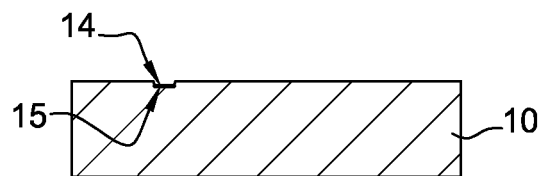
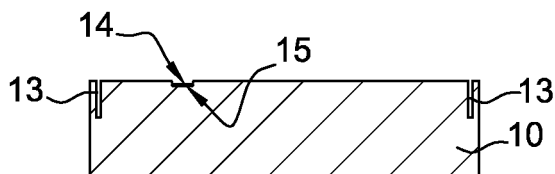
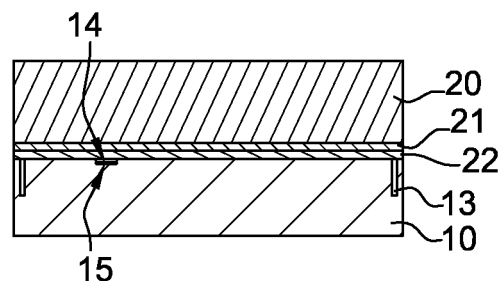
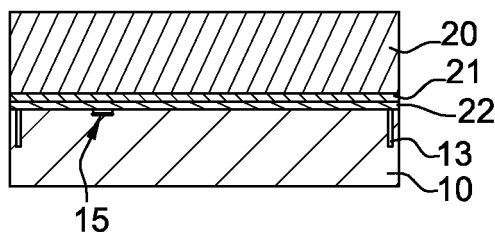
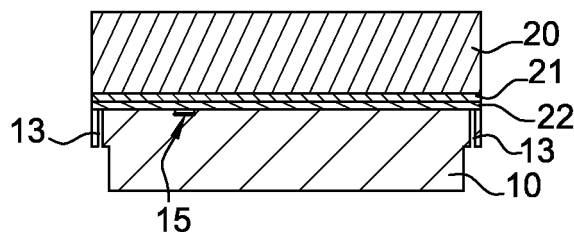
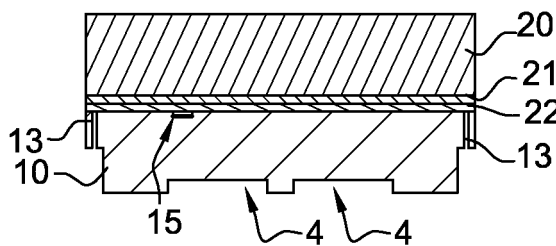
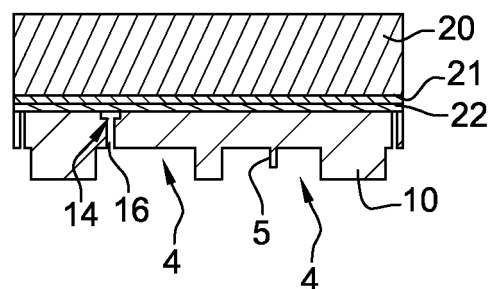
1/4

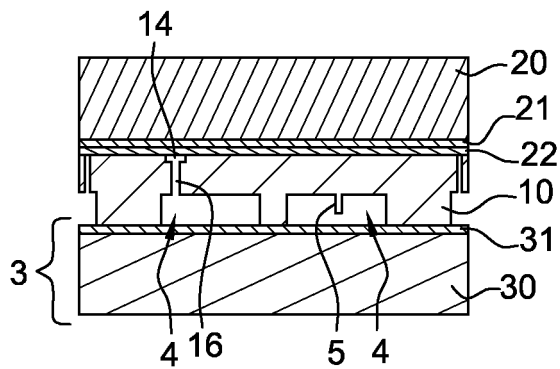
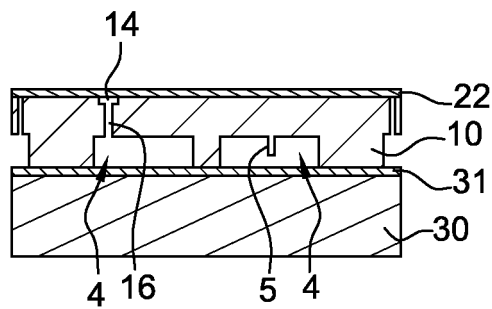
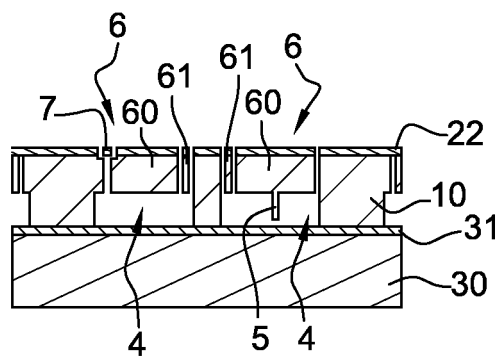
**Fig. 1A****Fig. 1B****Fig. 1C****Fig. 1D****Fig. 1E****Fig. 1F**

2/4

**Fig. 1G****Fig. 1H****Fig. 1I****Fig. 1J**

3/4

**Fig. 2A****Fig. 2B****Fig. 2C****Fig. 2D****Fig. 2E****Fig. 2F****Fig. 2G****Fig. 2H**

**Fig. 2I****Fig. 2J****Fig. 2K**



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement national

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

FA 806256
FR 1460871

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		
Y	WO 2005/028359 A1 (MATSUSHITA ELECTRIC WORKS LTD [JP]; OKA NAOMASA [JP]; HARADA HIROSHI []) 31 mars 2005 (2005-03-31) * abrégé * * figures 7,15 * * page 10, alinéa 2 - page 21, alinéa 1 * -----	1-9	B81C1/00 B81B1/00
X	JP 2005 177974 A (MATSUSHITA ELECTRIC WORKS LTD) 7 juillet 2005 (2005-07-07) * abrégé * * figure 18 * * alinéa [0088] * -----	10,11	
Y		1-9,12	
Y	FR 2 925 223 A1 (SOITEC SILICON ON INSULATOR [FR]) 19 juin 2009 (2009-06-19) * abrégé * * figures 1,3,5 * * page 9, ligne 5 - page 13, ligne 13 * -----	2,3	
Y	FR 2 972 263 A1 (TRONIC S MICROSYSTEMS [FR]) 7 septembre 2012 (2012-09-07) * abrégé * * figures 1-12 * * page 6, ligne 29 - page 8, ligne 20 * -----	6-9,12	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) B81C
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
17 septembre 2015		Guidoin, M	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		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.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1460871 FA 806256**

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 **17-09-2015**

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
WO 2005028359	A1	31-03-2005	CA 2536431 A1	31-03-2005
			CN 1856440 A	01-11-2006
			EP 1663850 A1	07-06-2006
			KR 20060087576 A	02-08-2006
			TW 1284114 B	21-07-2007
			US 2007128831 A1	07-06-2007
			WO 2005028359 A1	31-03-2005

JP 2005177974	A	07-07-2005	JP 4353039 B2	28-10-2009
			JP 2005177974 A	07-07-2005

FR 2925223	A1	19-06-2009	FR 2925223 A1	19-06-2009
			WO 2009077538 A2	25-06-2009

FR 2972263	A1	07-09-2012	CN 103518138 A	15-01-2014
			EP 2681568 A1	08-01-2014
			FR 2972263 A1	07-09-2012
			JP 2014512518 A	22-05-2014
			KR 20140074865 A	18-06-2014
			US 2014024161 A1	23-01-2014
			WO 2012117177 A1	07-09-2012
