

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①① N° de publication : **3 042 649**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)
②① N° d'enregistrement national : **15 59993**
⑤① Int Cl⁸ : **H 01 L 41/22 (2015.01), H 01 L 41/08, H 03 H 9/00**

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ PROCÉDE DE FABRICATION D'UNE STRUCTURE HYBRIDE.

②② Date de dépôt : 20.10.15.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 21.04.17 Bulletin 17/16.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 21.06.19 Bulletin 19/25.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *SOITEC* — FR.

⑦② Inventeur(s) : *LANDRU DIDIER*.

⑦③ Titulaire(s) : *SOITEC*.

⑦④ Mandataire(s) : *IP TRUST*.

FR 3 042 649 - B1



PROCEDE DE FABRICATION D'UNE STRUCTURE HYBRIDE

DOMAINE DE L'INVENTION

5 La présente invention concerne le domaine de la fabrication de structures hybrides, notamment de structures comportant une couche de matériau piézoélectrique.

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

10

Dans le domaine des dispositifs à ondes acoustiques de surface ou de volume (respectivement « SAW » pour « Surface Acoustic Wave » et « BAW » pour « Bulk Acoustic Wave » selon la terminologie anglo-saxonne), les hétéro-structures
15 comportant une couche de tantalate de lithium (LiTaO_3) disposée sur un substrat de silicium présentent un intérêt croissant : d'une part, parce qu'elles sont compatibles avec des équipements et procédés standard de la microélectronique grâce à leur substrat support en silicium, offrant des opportunités
20 de croissance et de plus faibles coûts ; d'autre part parce qu'elles présentent des avantages techniques comme par exemple une moindre dépendance vis-à-vis de la température, de la réponse en fréquence des dispositifs SAW comme expliqué dans l'article de K.Hashimoto, M.Kadota et al., « Recent
25 development of temperature compensated SAW devices », IEEE Ultrason. Symp. 2011, pages 79 à 86, 2011.

Les hétéro-structures LiTaO_3/Si peuvent par exemple être élaborées à partir de l'assemblage par collage par adhésion moléculaire de deux substrats respectivement de LiTaO_3
30 et de Si. Pour la fabrication de dispositifs à ondes acoustiques sur ces hétéro-structures, il est avantageux de pouvoir appliquer une température supérieure à 200°C , voire 250°C , ceci pour permettre l'utilisation de matériaux et de procédés garantissant de bonnes performances des dispositifs.

La tenue de l'interface de collage entre la couche de LiTaO_3 et le substrat support de Si est un des facteurs importants qui gèrent la bonne tenue mécanique de la structure en température et notamment au-delà de 200°C .

5 Il apparaît donc important de renforcer l'énergie de l'interface de l'hétéro-structure préalablement aux étapes de fabrication du dispositif à ondes acoustiques ; dans le cas d'une hétéro-structure fabriquée par collage par adhésion moléculaire d'une couche sur un substrat support, l'interface
10 de collage peut en particulier être renforcée par application d'un traitement thermique dans une gamme de température autour de $200\text{-}300^\circ\text{C}$. Se pose donc le problème d'appliquer un tel traitement thermique à l'hétéro-structure sans endommager celle-ci du fait de la différence significative de coefficient
15 de dilatation thermique (CTE pour « Coefficient of Thermal Expansion » selon la terminologie anglo-saxonne) des deux matériaux.

Par ailleurs, lorsqu'une hétéro-structure comportant
20 une très fine couche de LiTaO_3 est requise (par exemple pour la fabrication de dispositifs à ondes acoustiques de volume), une solution est de transférer ladite couche par le procédé Smart Cut®, incluant la formation d'un plan fragile enterré dans un substrat donneur de LiTaO_3 par introduction d'espèces légères
25 telles que l'hydrogène ou l'hélium, le collage direct (par adhésion moléculaire) de ce substrat donneur sur un substrat support en silicium, et le détachement au niveau du plan fragile enterré de manière à transférer une couche
30 superficielle de LiTaO_3 sur Si. Il est connu que la couche superficielle après transfert comprend encore des défauts et des espèces légères dans son épaisseur. Il est donc avantageux, pour guérir cette couche de réaliser un recuit dans une gamme adaptée de température : pour permettre la guérison des défauts et l'évacuation des espèces légères, mais

sans endommager les qualités de la couche mince transférée ou la tenue mécanique de l'hétéro-structure. A titre d'exemple, pour une couche de LiTaO_3 , la gamme de températures adaptée est comprise entre 400° et 600°C .

5 Le problème à nouveau est que les hétéro-structures LiTaO_3/Si , compte tenu du très grand écart de coefficient de dilatation thermique entre les deux matériaux, ne supportent pas ces budgets thermiques élevés.

10 Lors de la fabrication de structures hybrides ou hétéro-structures, il est d'usage de réaliser les traitements thermiques présentant une température élevée lorsque la couche superficielle disposée sur le substrat support est la plus fine possible, de manière à limiter les contraintes et les
15 déformations (se traduisant notamment par une courbure du substrat) dans ladite structure hybride. On peut citer à titre d'exemple les structures hybrides de type silicium sur silice massive ou silicium sur saphir, qui peuvent supporter des recuits de l'ordre de 850°C lorsque l'épaisseur de la couche
20 superficielle de silicium est inférieure à environ 100nm et l'épaisseur du substrat de silice massive de l'ordre de 700 microns, sans subir de dommages prohibitifs. Pour des épaisseurs supérieures de la couche superficielle, typiquement 1 micron, la température maximale applicable sans dommage
25 diminue par exemple autour de 600°C . Pour des épaisseurs encore bien supérieures de la couche supérieure, par exemple 700 microns, la température maximale applicable sans dommage diminue par exemple autour de $100-150^\circ\text{C}$.

Pour une structure hybride composée d'une couche de
30 LiTaO_3 (par exemple de 10 microns d'épaisseur) disposée sur un substrat de silicium (par exemple de 150mm de diamètre et 625 microns d'épaisseur), la demanderesse a utilisé ces connaissances de l'état de l'art : elle a appliqué la température de recuit requise pour renforcer l'interface de

collage (soit 250°C) à la structure hybride finale (10 microns LiTaO₃ sur 625 microns Si), c'est-à-dire comportant la couche superficielle la plus fine possible. La demanderesse a alors observé des résultats inattendus : une dégradation importante de la couche par un phénomène dit de « buckling » correspondant à la déformation par flambage local de la couche de LiTaO₃, rendant la structure hybride inutilisable.

OBJET DE L'INVENTION

10

Un objet de l'invention est donc de proposer un procédé de fabrication d'une structure hybride remédiant aux inconvénients de l'art antérieur. Un objet de l'invention est notamment de proposer un procédé permettant l'application d'un traitement thermique requis sans endommager la structure hybride.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

20

L'invention concerne un procédé de fabrication d'une structure hybride comportant une couche utile de matériau piézoélectrique présentant une épaisseur utile disposée sur un substrat support présentant une épaisseur support et un coefficient de dilatation thermique inférieur à celui de la couche utile, le procédé comprenant :

25

a) Une étape de fourniture d'une structure collée comportant un substrat donneur de matériau piézoélectrique et le substrat support, la structure collée présentant une interface de collage entre ces deux substrats ;

30

b) Une première étape d'amincissement du substrat donneur pour former une couche amincie, présentant une épaisseur intermédiaire, disposée sur le substrat support ; l'ensemble formant une structure amincie ;

c) Une étape de traitement thermique de la structure amincie à une température de recuit;

d) Une seconde étape d'amincissement de la couche amincie pour former la couche utile ;

5 le procédé étant remarquable en ce qu'il comprend, préalablement à l'étape b), une étape a') de détermination d'une fourchette d'épaisseurs définie par une épaisseur seuil et une épaisseur plafond, l'épaisseur intermédiaire de la couche amincie étant choisie dans cette fourchette pour éviter
10 une dégradation de la structure amincie lors de l'étape c).

Le procédé de fabrication selon l'invention permet ainsi d'appliquer un traitement thermique à une température de recuit requise pour consolider l'interface de collage ou pour
15 guérir tout ou partie de défauts présents dans la couche amincie (qui deviendra la couche utile), à une structure amincie pour laquelle on a préalablement déterminé la fourchette d'épaisseurs compatibles de la couche amincie. Ledit traitement thermique n'est en général pas applicable à
20 la structure hybride finale c'est-à-dire avec la couche utile à son épaisseur utile, sans générer un endommagement de la couche utile, notamment quand des zones non collées (défauts de collage ou motifs gravés préexistants sur les faces assemblées des substrats) sont présentes à l'interface de
25 collage.

Selon des caractéristiques avantageuses de l'invention, prises seules ou en combinaison :

- l'épaisseur seuil est déterminée à partir d'un premier
30 modèle de sensibilité dont des paramètres d'entrée incluent l'épaisseur support, les coefficients de dilatation thermique du substrat donneur et du substrat support, la température de recuit et une taille maximale

de zones non collées présentes à l'interface de collage de la structure collée ;

- 5 • l'épaisseur plafond est déterminée à partir d'un second modèle de sensibilité dont des paramètres d'entrée incluent l'épaisseur support, les coefficients de dilatation thermique du substrat donneur et du substrat support et la température de recuit ;
- 10 • le procédé de fabrication comprend après l'étape a') et préalablement à l'étape b), une étape a'') de recyclage de la structure collée, quand l'étape a') de détermination établit l'épaisseur seuil supérieure à l'épaisseur plafond ou l'épaisseur plafond inférieure à l'épaisseur utile ;
- 15 • l'étape a'') de recyclage comprend un décollement au niveau de l'interface de collage de la structure collée ;
- l'étape a'') de recyclage comprend la réutilisation des substrats donneur et support issus du décollement pour une nouvelle étape a) de fourniture d'une structure collée ;
- 20 • la seconde étape d'amincissement d) peut en outre comprendre une étape d'amincissement du substrat support ;
- la couche utile est composée d'un matériau choisi dans le groupe : tantalate de lithium (LiTaO_3), niobate de lithium (LiNbO_3), nitrure d'aluminium (AlN), oxyde de zinc (ZnO) ;
- 25 • le substrat support est composé d'un matériau choisi dans le groupe : silicium, semi-conducteurs III-V, carbure de silicium, verre, saphir.

30 L'invention concerne en outre une structure hybride comportant une couche utile de matériau piézoélectrique d'épaisseur utile inférieure à 50 microns assemblée à un substrat support présentant un coefficient de dilatation

thermique inférieur à celui de la couche utile, la structure hybride étant caractérisée en ce qu'une interface de collage entre la couche utile et le substrat support présente une énergie de collage supérieure à 1000 mJ/m^2 et au moins une zone non collée dont la taille est comprise entre 1 et 1000 microns.

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

10 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée de l'invention qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquelles :

- 15 - les figures 1a à 1c présentent un procédé de fabrication d'une structure hybride conforme à l'invention ;
- les figures 2a à 2c présentent trois configurations différentes de fourchettes d'épaisseurs, versus l'épaisseur utile, issues d'une étape de détermination conforme à l'invention ;
- 20 - la figure 3 présente différentes étapes du procédé de fabrication conforme à l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

25 L'invention concerne un procédé de fabrication d'une structure hybride 60 comportant une couche utile 20 de matériau piézoélectrique disposée sur un substrat support 1 présentant une épaisseur support et un coefficient de dilatation thermique inférieur à celui de la couche utile 20
30 (figure 1c).

Le procédé comprend une étape a) de fourniture d'une structure collée 6 comportant un substrat donneur 2 de matériau piézoélectrique et le substrat support 1. La structure collée 6 présente une interface de collage 5 entre

ces deux substrats 1,2 (figure 1a). A titre d'exemple, le substrat donneur 2 peut être composé d'un matériau choisi dans le groupe : tantalate de lithium (LiTaO_3), niobate de lithium (LiNbO_3), nitrure d'aluminium (AlN), oxyde de zinc (ZnO). Le substrat support peut être composé d'un matériau choisi dans le groupe : silicium, semi-conducteurs III-V, carbure de silicium, verre, saphir. L'un et/ou l'autre des substrats 1,2 pourra optionnellement comporter des composants (tout ou partie de circuits micro-électroniques) ou des motifs gravés sur leur face à assembler : les composants pourront être formés de couches empilées de différentes natures et présentant des motifs ; les motifs gravés pourront être formés par des cavités destinées à assurer une fonction dans le dispositif final élaboré sur la structure hybride 60.

L'assemblage de la structure collée 6 est avantageusement réalisé par collage par adhésion moléculaire, entre le substrat donneur 2 et le substrat support 1. Optionnellement, une couche intermédiaire, comme par exemple une couche d'oxyde de silicium, de nitrure de silicium ou autre couche favorisant un collage par adhésion moléculaire, peut être ajoutée sur l'un des deux substrats ou les deux avant assemblage. Avantageusement, les substrats 1,2 sont également soumis à des étapes de nettoyage et/ou d'activation de surface avant assemblage, pour favoriser la qualité et l'énergie de l'interface de collage 5 formée après assemblage.

On appellera par la suite « zone non collée » une zone localisée, à l'interface de collage, au niveau de laquelle les surfaces des deux substrats ne sont pas intimement en contact. Une zone non collée pourra être liée à un défaut de collage, par exemple dû à la présence d'une particule ou autre contamination (hydrocarbure ou autre) à l'interface de collage 5 de la structure collée 6. Elle pourra également être liée à la présence d'un motif gravé ou d'une topographie locale sur le substrat donneur 2 ou le substrat support 1, dû à la

présence de composants ou de cavités ou encore de marques laser (par exemple pour assurer la traçabilité des substrats) sur leurs faces respectives à assembler.

5 Après l'étape d'assemblage, le procédé comprend une
étape b) correspondant à une première étape d'amincissement du
substrat donneur 2 pour former une couche amincie 2',
présentant une épaisseur intermédiaire, disposée sur le
substrat support 1 ; l'ensemble formant une structure amincie
10 6' (figure 1b). Le substrat donneur 2 est aminci au niveau de
sa face arrière 4, par des techniques d'amincissement
mécanique, mécano-chimique et/ou de gravure chimique ou encore
par un procédé de type Smart Cut®, bien connu de l'homme du
métier. A titre d'exemple, le substrat donneur 2 peut être
15 aminci par « grinding » (amincissement mécanique) puis par
polissage mécano-chimique. Cette étape d'amincissement précède
une étape c) de traitement thermique dont la fonction peut
être de consolider l'interface de collage 5 ou de guérir des
défauts dans la couche amincie 2' qui deviendra la couche
20 utile 20. Il est ainsi important que l'étape b)
d'amincissement mène à l'obtention d'une structure amincie 6'
compatible avec le traitement thermique requis à l'étape c)
suivante.

A cet effet, le procédé de fabrication est remarquable
25 en ce qu'il comprend une étape a'), préalable à l'étape b)
d'amincissement, de détermination d'une fourchette
d'épaisseurs pour la couche amincie 2', visant à éviter une
dégradation de la structure amincie lors de l'étape c) de
traitement thermique. Ladite fourchette est définie par une
30 épaisseur seuil et une épaisseur plafond, l'épaisseur
intermédiaire de la couche amincie 2' est ainsi choisie dans
cette fourchette.

L'épaisseur seuil est déterminée à partir d'un premier
modèle de sensibilité dont les paramètres d'entrée incluent

l'épaisseur support (du substrat support 1), les coefficients de dilatation thermique du substrat donneur 2 et du substrat support 1, la température de recuit requise à l'étape c) de traitement thermique et une taille maximale de zones non collées présentes à l'interface de collage 5 de la structure collée 6.

Le premier modèle de sensibilité est établi à partir d'une équation traduisant la relaxation d'une couche mince en compression sur un substrat. Un phénomène de relaxation d'une couche mince tel que le « buckling » (flambage) nécessite la présence d'une zone non collée à l'interface entre la couche mince et le substrat. La contrainte critique $\sigma_{buckling}$ nécessaire pour initier cette relaxation de la couche mince, qui correspond à la déformation par flambage local de ladite couche, peut s'exprimer comme :

$$\sigma_{buckling} = \frac{\pi^2}{12} \frac{E_2}{(1 - \nu_2^2)} \left(\frac{h_2}{r} \right)^2$$

{equ.1}

avec E_2 le module d'Young de la couche mince, ν_2 le coefficient de Poisson de la couche mince, h_2 l'épaisseur de la couche mince et r le rayon de la zone non collée entre la couche mince et le substrat. La contrainte traduit une force appliquée par unité de surface sur la section (longueur x épaisseur) de la couche mince. Pour s'affranchir de la longueur de ladite section et ne considérer que l'épaisseur h_2 de la couche mince, on peut exprimer une force critique normalisée par la longueur, $F_{buckling}^{norm.}$ en N/m :

$$F_{buckling}^{norm.} = \sigma_{buckling} \cdot h_2 = \frac{\pi^2}{12} \frac{E_2 \cdot h_2}{(1 - \nu_2^2)} \left(\frac{h_2}{r} \right)^2$$

{equ.2}

Considérons que la couche mince correspond à la couche amincie 2' : E_2 , ν_2 sont donc respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson du matériau piézoélectrique

constituant la couche amincie 2' ; h_2 est l'épaisseur intermédiaire et r est le rayon maximal des zones non collées présentes à l'interface de collage 5 de la structure collée 6. La taille des zones non collées présentes à l'interface de collage 5 pourra par exemple être déterminée par imagerie en lumière blanche ou en infra-rouge selon les matériaux constitutifs de la structure collée 6, ou encore par microscopie acoustique, technique particulièrement avantageuse pour détecter les zones non collées de petite taille. Le rayon maximal des zones non collées à l'interface de collage 5 (pouvant être liées à des défauts de collage ou à des motifs préexistants sur l'une ou l'autre des faces assemblées des substrats donneur 2 et support 1) pourra ainsi être extrait pour chaque structure collée 6.

L'équation {equ.2} montre que le phénomène de « buckling » sera d'autant plus facile à initier (cad requerra une force normalisée $F_{buckling}^{norm.}$ plus faible) que l'épaisseur intermédiaire h_2 de la couche amincie 2' sera faible et que le rayon maximal r des zones non collées sera grand.

On connaît par ailleurs l'épaisseur support h_1 du substrat support 1 ainsi que ses caractéristiques mécaniques (E_1 , son module d'Young) ; on connaît également la température de recuit requise à appliquer à la structure amincie 6' au cours de l'étape c) de traitement thermique. On peut donc exprimer la force en compression normalisée $F^{norm.}$ qui s'appliquera à la couche amincie 2' au cours du traitement thermique de l'étape c) :

$$F^{norm.} = \frac{(E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3)}{6(h_1 + h_2) \cdot \rho}$$

{equ.3}

avec ρ le rayon de courbure de la structure amincie 6' :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\Delta CTE \cdot \Delta T}{K(h_1, h_2)}$$

{equ.4}

avec ΔCTE la différence entre les coefficients de dilatation thermique des matériaux respectifs de la couche amincie 2' et du substrat support 1 ; ΔT le delta de température entre température ambiante et température de recuit appliquée ; et le terme $K(h_1, h_2)$ qui s'exprime comme :

$$K(h_1, h_2) = \frac{h_1 + h_2}{2} + \frac{(E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3)}{6(h_1 + h_2)} \cdot \left(\frac{1}{E_1 \cdot h_1} + \frac{1}{E_2 \cdot h_2} \right)$$

{equ.5}

L'épaisseur seuil de la fourchette peut ainsi être déterminée en posant $F^{norm.} = F_{buckling}^{norm.}$, par résolution de l'équation {equ.5} :

$$\frac{(E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_{2seuil}^3) \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T}{6(h_1 + h_{2seuil}) \cdot K(h_1, h_{2seuil})} = \frac{\pi^2 E_2 \cdot h_{2seuil}}{12 (1 - \nu_2^2)} \left(\frac{h_{2seuil}}{r} \right)^2$$

{equ.6}

avec h_{2seuil} ladite épaisseur seuil.

L'épaisseur seuil correspond à l'épaisseur intermédiaire en-dessous de laquelle le phénomène de « buckling » a une forte probabilité d'apparaître, compte tenu des caractéristiques de la structure amincie 6' (type de matériaux la constituant, taille maximale de zones non collées présentes à l'interface de collage 5, épaisseur du substrat support) et de la température de recuit devant être appliquée au cours du traitement thermique de l'étape c). Notons que le phénomène de « buckling » peut également s'accompagner d'un élargissement de la zone non collée, préférentiellement perpendiculairement aux axes cristallographiques ayant le coefficient de dilatation le plus élevé. Cet élargissement peut être d'autant plus important que l'énergie de l'interface de collage 5 est faible. La consolidation de l'énergie de l'interface de collage 5, dans une configuration évitant l'apparition du « buckling » est donc à plus forte raison importante.

Le premier modèle de sensibilité relie ainsi l'épaisseur seuil à un ensemble de paramètres caractéristiques de la structure amincie $6'$ et aux contraintes thermiques qu'elle doit subir.

5

L'épaisseur plafond est déterminée à partir d'un second modèle de sensibilité dont les paramètres d'entrée incluent l'épaisseur support (du substrat support 1), les coefficients de dilatation thermique du substrat donneur 2 et du substrat support 1 et la température de recuit requise à l'étape c) de traitement thermique.

Le second modèle de sensibilité est établi à partir d'une équation traduisant la rupture du matériau constituant le substrat support 1, contraint en extension dans la structure amincie $6'$ au cours d'un traitement thermique. L'énergie élastique E stockée dans le substrat support 1, dans le cas d'une structure amincie $6'$ comportant une couche amincie $2'$ et un substrat support 1 de nature différente et à laquelle est appliqué un traitement thermique, s'exprime ainsi :

$$E = \frac{1}{E_1} \left(\frac{(F^{norm.})^2}{h_1} + \frac{E_1^2 \cdot h_1^3}{12 \cdot \rho^2} \right)$$

{equ.7}

La rupture du matériau constituant le substrat support 1 apparaît quand l'énergie élastique E dépasse une valeur critique donnée par :

$$E_{rupture} = \frac{K_{1c}^2}{E_1}$$

25

{equ.8}

avec K_{1c} la ténacité du matériau constituant le substrat support 1.

L'épaisseur plafond de la fourchette peut ainsi être déterminée en posant $E = E_{rupture}$, par résolution de l'équation :

30

$$\left(\frac{1}{h_1} \left[\frac{(E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_{2plafond}^3) \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T}{6(h_1 + h_{2plafond}) \cdot K(h_1, h_{2plafond})} \right]^2 + \frac{E_1^2 \cdot h_1^3 \cdot (\Delta CTE \cdot \Delta T)^2}{12 \cdot [K(h_1, h_{2plafond})]^2} \right) = K_{1c}^2$$

{equ.9}

avec $h_{2plafond}$ ladite épaisseur plafond.

L'épaisseur plafond correspond à l'épaisseur
 5 intermédiaire de la couche amincie 2' au-dessus de laquelle la
 rupture du substrat support 1 a une forte probabilité
 d'apparaître, compte tenu des caractéristiques de la structure
 amincie 6' (type de matériaux la constituant, épaisseur du
 substrat support 1) et de la température de recuit devant être
 10 appliquée au cours du traitement thermique de l'étape c).

Le second modèle de sensibilité relie ainsi l'épaisseur
 plafond à un ensemble de paramètres caractéristiques de la
 structure amincie 6' et aux contraintes thermiques qu'elle
 doit subir.

15

Une structure hétérogène telle que la structure amincie
 6' subit des contraintes et des déformations lorsqu'elle est
 soumise à un traitement thermique, du fait des dilatations
 différentielles des deux matériaux la constituant. Elle se
 20 déforme en adoptant une courbure pouvant mener à différents
 modes de défaillance : la casse du substrat support 1, le
 flambage local (« buckling ») de la couche amincie 2', la
 formation de dislocations ou de plans de glissement dans la
 structure (en particulier dans la couche amincie 2'), le
 25 décollement au niveau des bords de la structure amincie 6',
 etc... Expérimentalement, la demanderesse a constaté que, dans
 le cas de structures amincies 6' comportant une couche de
 matériau piézoélectrique et un substrat support d'un matériau
 ayant un coefficient de dilatation thermique inférieur, les
 30 deux modes de défaillances prépondérants étaient d'une part,
 la casse du substrat support 1 (phénomène de rupture du
 matériau au-delà de l'énergie critique de rupture) et d'autre

part, le flambage local, au niveau de zones non-collées, de la couche amincie 2' (phénomène de relaxation d'une couche mince en compression, dit de « buckling »). Les deux modèles de sensibilité établis par la demanderesse à partir des équations {equ.6} et {equ.9} sont donc bien adaptés à la détermination de fourchettes d'épaisseurs pour la couche amincie 2', dans le cas de structures amincies hétérogènes 6' dont ladite couche amincie 2' est formée d'un matériau piézoélectrique.

10 A la suite de l'étape a'), on obtient donc une fourchette d'épaisseurs définie par l'épaisseur seuil et l'épaisseur plafond déterminées, comme illustré sur les figures 2a à 2c.

Selon une première variante de mise en œuvre du procédé de fabrication, l'épaisseur utile de la couche utile 20 attendue pour la structure hybride 60 finale est inférieure à la fourchette d'épaisseurs définie (figure 2a) : on est dans un cas de fourchette d'épaisseurs compatibles avec la structure finale envisagée. Le procédé de fabrication selon l'invention comporte, comme évoqué précédemment, l'étape b) 20 d'amincissement du substrat donneur 2 pour former la couche amincie 2', après l'étape a') de détermination de la fourchette d'épaisseurs compatible. L'épaisseur intermédiaire de la couche amincie 2' sera alors choisie de manière à être comprise dans ladite fourchette, c'est-à-dire entre 25 l'épaisseur seuil et l'épaisseur plafond. Le procédé comprend ensuite l'étape c) de traitement thermique à la température de recuit requise pour la structure amincie 6'. A titre d'exemple, cette température de recuit pourra varier entre 30 200°C et 600°C selon le type de structure hybride attendu et selon l'objectif de ce traitement thermique : consolidation de l'interface de collage 5, guérison de défauts ou exo-diffusion d'espèces légères dans l'épaisseur de la couche amincie 2' (destinée à devenir la couche utile 20), etc. Le traitement

thermique pourra comporter une entrée et une sortie du four à basse température par exemple 100°C, une rampe de montée et de descente en température, par exemple entre 0,5 et 5°/min, et un palier à la température de recuit requise, par exemple
5 entre 200°C et 600°C, pendant une durée allant de 30min à quelques heures.

Après l'étape c) de traitement thermique, le procédé comporte une étape d) correspondant à une seconde étape d'amincissement de la couche amincie 2' pour former la couche
10 utile 20 présentant une épaisseur utile, disposée sur le substrat support 1 ; l'ensemble formant la structure hybride 60 finale (figure 1c). La couche 2' est donc à nouveau amincie, au niveau de sa face arrière 4, par des techniques
15 d'amincissement mécanique, mécano-chimique et/ou de gravure chimique et/ou amincissement par le procédé Smart Cut®. A titre d'exemple, la couche 2' peut être amincie par des séquences de polissage mécano-chimique, suivies d'un nettoyage. La structure hybride 20 ainsi formée peut ensuite
20 être utilisée pour l'élaboration de dispositifs électroniques, ses propriétés (énergie de collage de l'interface de collage 5 et/ou qualité de la couche utile 20) ayant été améliorées par la réalisation du procédé selon l'invention. Habituellement, les étapes d'élaboration des dispositifs ne nécessitent pas
25 l'application de traitements thermiques à une température aussi élevée que la température de recuit de l'étape c) du procédé.

Selon une deuxième variante de mise en œuvre du procédé de fabrication, l'épaisseur utile de la couche utile 20
30 attendue pour la structure hybride 60 finale est comprise dans la fourchette d'épaisseurs définie (figure 2b) ; on est dans un cas de fourchette d'épaisseurs compatibles avec la structure finale envisagée. Le procédé de fabrication selon l'invention comporte, comme évoqué précédemment, l'étape b)

d'amincissement du substrat donneur 2 pour former la couche amincie 2', après l'étape a'). L'épaisseur intermédiaire de la couche amincie 2' sera avantageusement choisie de manière à être comprise dans la fourchette, et en particulier, elle sera choisie égale ou sensiblement supérieure à l'épaisseur utile. Le procédé comprend ensuite l'étape c) de traitement thermique à la température de recuit requise pour la structure amincie 6'. A titre d'exemple, cette température de recuit pourra varier entre 200°C et 600°C selon le type de structure hybride attendu et selon l'objectif de ce traitement thermique.

Après l'étape c) de traitement thermique, le procédé comporte une étape d) correspondant à une seconde étape d'amincissement de la couche amincie 2' pour former la couche utile 20 présentant une épaisseur utile, disposée sur le substrat support 1 ; l'ensemble formant la structure hybride finale. Selon cette deuxième variante de mise en œuvre, l'étape b) d'amincissement de la couche amincie amène déjà l'épaisseur intermédiaire sensiblement à l'épaisseur utile. L'étape d) pourra ainsi consister essentiellement en des séquences de nettoyage ou en une étape de polissage à faible enlèvement (« touch polishing » selon la terminologie anglo-saxonne), permettant d'améliorer l'état de surface de la face 4 de la couche utile 20. La structure hybride 20 ainsi formée peut ensuite être utilisée pour l'élaboration de dispositifs électroniques, en particulier de dispositifs à ondes acoustiques.

Selon une troisième variante de mise en œuvre du procédé de fabrication selon l'invention, l'épaisseur utile de la couche utile 20 attendue pour la structure hybride finale est supérieure à la fourchette d'épaisseurs définie (figure 2c), autrement dit l'épaisseur utile est supérieure à l'épaisseur plafond. Cette configuration traduit le fait que la fourchette d'épaisseurs définie (déterminée grâce aux

modèles de sensibilité et à partir des caractéristiques de la structure collée 6 et de la température de recuit requise) est incompatible avec la structure hybride 20 finale attendue.

Cette configuration de fourchette d'épaisseurs incompatible avec la structure hybride 20 attendue (figure 2c) peut être liée au fait que l'épaisseur support est insuffisante. Le procédé de fabrication selon l'invention comporte alors une étape a'') de recyclage de la structure collée 6. L'étape a'') consiste à réaliser le décollement de la structure collée 6 au niveau de l'interface de collage 5, menant à la séparation du substrat donneur 2 et du substrat support 1. Ce décollement peut être effectué par insertion d'un outil en forme de biseau entre les bords chanfreinés des deux substrats donneur 2 et support 1 de la structure collée 6. Après le décollement, l'étape a'') de recyclage comprend en outre la réutilisation des substrats donneur 2 et support 1 décollés pour une nouvelle étape a) de fourniture d'une structure collée 6. L'étape a'') de recyclage peut être mise à profit pour utiliser un substrat support 1 d'épaisseur plus importante et fournir une nouvelle structure collée 6. Cette augmentation de l'épaisseur support permettra notamment d'augmenter la valeur d'épaisseur plafond, l'objectif étant de retrouver une fourchette d'épaisseurs compatible c'est-à-dire avec une épaisseur plafond supérieure à l'épaisseur utile attendue. La seconde étape d'amincissement d) selon le procédé comportera en outre, dans ce cas, une étape d'amincissement de la face arrière du substrat support 1, de manière à le ramener à l'épaisseur support requise pour la structure hybride 60 finale. Cette étape d'amincissement supplémentaire pourra consister en un amincissement mécanique, mécano-chimique ou chimique.

La configuration dans laquelle la fourchette d'épaisseurs est incompatible avec la structure hybride 20 attendue (figure 2c) peut également être liée au fait que la

température de recuit est trop élevée. On peut alors choisir de diminuer la température de recuit à appliquer à l'étape c) de traitement thermique. L'étape a'') de recyclage peut également être mise à profit pour appliquer une préparation de surface différente (pouvant être potentiellement plus complexe ou couteuse mais nécessaire dans ce cas de figure) aux substrats 1 et 2 avant leur assemblage, permettant par exemple de favoriser l'énergie de collage après un traitement thermique à plus basse température. Une nouvelle fourchette d'épaisseurs est alors déterminée avant de poursuivre le procédé.

Selon une quatrième variante de mise en œuvre du procédé de fabrication, l'épaisseur seuil déterminée à l'étape a') est supérieure à l'épaisseur plafond déterminée à la même étape (configuration non représentée). Dans ce cas de figure, la fourchette d'épaisseur est également considérée comme incompatible avec la structure attendue, puisqu'elle n'existe pas (la fourchette d'épaisseur étant définie par une épaisseur seuil inférieure à une épaisseur plafond). Il se peut dans ce cas que la taille maximale des zones non collées présentes à l'interface de collage 5 soit trop grande pour autoriser une fourchette d'épaisseurs compatible. Le procédé de fabrication selon l'invention comporte alors une étape a'') de recyclage de la structure collée 6. L'étape a'') consiste à réaliser le décollement de la structure collée 6 au niveau de l'interface de collage 5, menant à la séparation du substrat donneur 2 et du substrat support 1. Ce décollement peut être effectué par application d'une contrainte à l'interface entre les deux substrats donneur 2 et support 1 de la structure collée 6. Après le décollement, l'étape a'') de recyclage comprend la réutilisation des substrats donneur 2 et support 1 décollés pour une nouvelle étape a) de fourniture d'une structure collée 6. Dans l'hypothèse que la zone non collée de taille

maximale était relative à un défaut de collage, l'étape de recyclage a'') peut permettre d'éliminer ce défaut par un nouveau nettoyage et une nouvelle préparation des surfaces des substrats 1,2 à assembler.

5 Si la taille des zones non collées présentes à l'interface de collage 5 est difficile à réduire (dans le cas par exemple de motifs ou cavités préexistantes sur l'un des deux substrats assemblés et ayant une fonction particulière), l'étape a'') de recyclage peut être par exemple mise à profit
10 pour utiliser modifier les conditions d'assemblage pour permettre de limiter ultérieurement la température requise à appliquer à l'étape c) et fournir une nouvelle structure collée 6.

15 Les principales étapes du procédé selon l'invention sont illustrées sur la figure 3.

Le procédé de fabrication selon l'invention permet d'appliquer un traitement thermique à une température de recuit requise pour consolider l'interface de collage 5 ou
20 pour guérir des défauts dans la couche amincie 2' (qui deviendra la couche utile 20), à une structure amincie 6' pour laquelle on a préalablement déterminé la fourchette d'épaisseurs compatibles pour la couche amincie 2'. Ledit traitement thermique n'est en général pas applicable à la
25 structure hybride 60 finale c'est-à-dire avec la couche utile 20 à son épaisseur utile, sans générer un endommagement de la couche utile 20, notamment quand des zones non collées (défauts de collage ou motifs gravés préexistants sur les faces assemblées des substrats 1,2) sont présentes à
30 l'interface de collage 5.

Par ailleurs, l'étape a') de détermination de la fourchette d'épaisseurs compatibles permet d'identifier quand il est nécessaire de recycler la structure collée 6, et ce

avant d'engager l'étape d'amincissement b), elle permet ainsi d'augmenter les rendements de fabrication.

L'invention concerne également une structure hybride 60
5 comportant une couche utile 20 de matériau piézoélectrique
d'épaisseur utile inférieure à 50 microns assemblée à un
substrat support 1 présentant un coefficient de dilatation
thermique inférieur à celui de la couche utile 20 (figure 1c).
L'interface de collage 5 entre la couche utile 20 et le
10 substrat support 1 présente une énergie de collage supérieure
ou égale à 1000 mJ/m^2 et au moins une zone non collée dont la
taille est comprise entre 1 et 1000 microns. La couche utile
20 est composée d'un matériau choisi dans le groupe :
tantalate de lithium (LiTaO_3), niobate de lithium (LiNbO_3),
15 nitrure d'aluminium (AlN), oxyde de zinc (ZnO), etc. A titre
d'exemple son épaisseur est comprise entre 0,1 micron et 50
microns. Le substrat support 1 est composé d'un matériau
choisi dans le groupe : silicium, semi-conducteurs III-V,
carbure de silicium, verre, saphir, etc. A titre d'exemple,
20 son épaisseur est comprise entre 300 et 1000 microns.

Exemple 1 :

Un substrat support 1 en silicium (Si) de 150mm de
diamètre, d'épaisseur 725 microns, comporte des motifs gravés
25 à espacement régulier sur toute sa face à assembler. Ces
motifs pourront par exemple avoir une fonction de marques
d'alignement ou constituer des cavités servant à la
fabrication de membranes suspendues ou encore constituer des
contacts électriques dans la structure hybride 60 finale, sur
30 laquelle seront élaborés les dispositifs. Le substrat support
1 comporte également une couche d'oxyde sur sa face à
assembler. Il est collé par adhésion moléculaire avec un
substrat donneur 2 en tantalate de lithium (LiTaO_3) de même
diamètre pour fournir la structure collée 6. Une étape de

contrôle par microscopie acoustique permet de détecter et de mesurer les zones non collées à l'interface de collage 5, générées par les motifs. La taille maximale de zones non collées correspond à un rayon r de 500 microns.

5 La structure hybride 60 finale attendue comporte une couche utile 20 de 10 microns et un substrat support de 725 microns. La température de recuit à appliquer est 230°C , dans le but de consolider suffisamment l'interface de collage 5 pour que la structure hybride 60 supporte les étapes
10 subséquentes d'élaboration des dispositifs à ondes acoustiques.

L'étape a') permet de déterminer des épaisseurs seuil et plafond : $h_{2\text{seuil}} = 28 \mu\text{m}$ et $h_{2\text{plafond}} = 32 \mu\text{m}$. La fourchette d'épaisseur obtenue est compatible avec la structure hybride
15 60 attendue, l'épaisseur utile étant inférieure à ladite fourchette.

L'étape b) d'amincissement, consistant en un amincissement mécanique suivi d'un polissage mécano-chimique et d'un nettoyage chimique, permet de former une couche
20 amincie 2' dont l'épaisseur intermédiaire est de $30 \mu\text{m}$. Le traitement thermique de l'étape c) est ensuite effectué. L'entrée dans le four s'effectue à 100°C , la rampe de montée en température est de $1^{\circ}/\text{min}$ jusqu'à atteindre un palier à 230°C , d'une durée de 4h. Une rampe de descente en température
25 à $1^{\circ}/\text{min}$ est ensuite opérée jusqu'à 100°C avant de sortir la structure amincie 6' du four. La structure amincie 6' subit ensuite une seconde étape d'amincissement de la couche amincie 2' jusqu'à une épaisseur de 10 microns pour former la couche utile 20.

30 La structure hybride 60 ainsi obtenue est intègre et présente une interface de collage 5 consolidée dont l'énergie de collage est supérieure ou égale à $1000\text{mJ}/\text{m}^2$, une couche utile 20 intègre ne comportant pas de dégradation liée à des phénomènes de « buckling » et ce malgré la présence de zones

non collées à son interface, d'une taille comprise entre 100 et 500 microns. Une telle structure hybride 60 peut ensuite être utilisée pour l'élaboration de dispositifs à ondes acoustiques.

5

Exemple 2 :

Un substrat support 1 en silicium (Si) de 150mm de diamètre d'épaisseur 725 microns et comportant une couche d'oxyde sur sa face à assembler est collé par adhésion moléculaire avec un substrat donneur 2 en tantalate de lithium (LiTaO_3) de même diamètre pour fournir la structure collée 6. Une étape de contrôle par microscopie acoustique permet de détecter deux défauts de collage (zones non collées) à l'interface de collage 5, dont la taille maximale correspond à un rayon r de 700 microns.

15

La structure hybride 60 finale attendue comporte une couche utile 20 de 10 microns et un substrat support de 725 microns. La température de recuit à appliquer est 250°C , dans le but de consolider suffisamment l'interface de collage 5 pour que la structure hybride 60 supporte les étapes ultérieures d'élaboration des dispositifs à ondes acoustiques.

20

L'étape a') permet de déterminer des épaisseurs seuil et plafond : $h_{2\text{seuil}} = 28 \mu\text{m}$ et $h_{2\text{plafond}} = 25 \mu\text{m}$. La fourchette d'épaisseur obtenue n'est pas compatible avec la structure hybride 60 attendue, l'épaisseur seuil étant supérieure à l'épaisseur plafond.

25

L'étape a'') de recyclage est alors opérée, dans le but de diminuer la taille maximale des défauts de collage présents à l'interface de collage 5 : l'insertion d'un outil en forme de biseau au niveau de l'interface de collage 5 de la structure collée 6 permet de séparer les substrats donneur 2 et support 1. Une nouvelle séquence de nettoyage et d'activation de surface des deux substrats est effectuée avant un nouvel assemblage, pour fournir une nouvelle structure

30

collée 6. Une nouvelle étape de contrôle par microscopie acoustique permet de détecter dix défauts à l'interface de collage 5, dont la taille maximale correspond à un rayon r de 150 microns.

5 Sur la base des nouvelles caractéristiques de la structure collées 6, l'étape a') permet de déterminer les épaisseurs seuil et plafond suivantes : $h_{2\text{seuil}} = 20 \mu\text{m}$ et $h_{2\text{plafond}} = 25 \mu\text{m}$. La fourchette d'épaisseur obtenue est maintenant compatible avec la structure hybride 60 attendue,
10 l'épaisseur seuil étant inférieure à l'épaisseur plafond et l'épaisseur utile étant inférieure à ladite fourchette.

L'étape b) d'amincissement, consistant en un amincissement mécanique suivi d'un polissage mécano-chimique et d'un nettoyage chimique, permet de former une couche
15 amincie 2' dont l'épaisseur intermédiaire est de 23 microns. Le traitement thermique de l'étape c) est ensuite effectué. L'entrée dans le four s'effectue à 70°C , la rampe de montée en température est de $1^\circ/\text{min}$ jusqu'à atteindre un palier à 250°C , d'une durée de 4h. Une rampe de descente en température à
20 $1^\circ/\text{min}$ est ensuite opérée jusqu'à 100°C avant de sortir la structure du four. La structure amincie 6' subit ensuite une seconde étape d'amincissement de la couche amincie 2' jusqu'à une épaisseur utile de 10 microns pour former la couche utile
20.

25 La structure hybride 60 ainsi obtenue est intègre et présente une interface de collage 5 consolidée dont l'énergie de collage est supérieure ou égale à $1000\text{mJ}/\text{m}^2$, voire même supérieure à $1500\text{mJ}/\text{m}^2$; elle présente également une couche
30 utile 20 intègre ne comportant pas de dégradation liée à des phénomènes de « buckling » et ce malgré la présence de zones non collées à son interface d'une taille comprise entre 50 et 150 microns. Une telle structure hybride 60 peut ensuite être utilisée pour l'élaboration de dispositifs à ondes acoustiques.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux seuls modes de mise en œuvre et exemples décrits et on peut y apporter des variantes de réalisation sans sortir du cadre de l'invention tel que défini par les revendications.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de fabrication d'une structure hybride (60) comportant une couche utile (20) de matériau piézoélectrique présentant une épaisseur utile disposée sur un substrat support (1) présentant une épaisseur support et un coefficient de dilatation thermique inférieur à celui de la couche utile (20), le procédé comprenant :

a) Une étape de fourniture d'une structure collée (6) comportant un substrat donneur (2) de matériau piézoélectrique et le substrat support (1), la structure collée (6) présentant une interface de collage (5) entre ces deux substrats ;

b) Une première étape d'amincissement du substrat donneur (2) pour former une couche amincie (2'), présentant une épaisseur intermédiaire, disposée sur le substrat support (1) ; l'ensemble formant une structure amincie (6') ;

c) Une étape de traitement thermique de la structure amincie (6') à une température de recuit;

d) Une seconde étape d'amincissement, après l'étape c), de la couche amincie (2') pour former la couche utile (20) ;

le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend, préalablement à l'étape b), une étape a') de détermination d'une fourchette d'épaisseurs intermédiaires évitant une dégradation de la structure amincie (6') lors de l'étape c), la fourchette étant définie par une épaisseur seuil et une épaisseur plafond et l'épaisseur intermédiaire de la couche amincie (2') étant choisie dans cette fourchette.

2. Procédé de fabrication d'une structure hybride (60) selon la revendication précédente, dans lequel l'épaisseur seuil est déterminée à partir d'un premier modèle de sensibilité dont

des paramètres d'entrée incluent l'épaisseur support, les coefficients de dilatation thermique du substrat donneur (2) et du substrat support (1), la température de recuit et une taille maximale de zones non collées présentes à l'interface de collage (5) de la structure collée (6).

- 5
3. Procédé de fabrication d'une structure hybride (60) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'épaisseur plafond est déterminée à partir d'un second modèle de sensibilité dont des paramètres d'entrée incluent l'épaisseur support, les coefficients de dilatation thermique du substrat donneur (2) et du substrat support (1) et la température de recuit.
- 10
4. Procédé de fabrication d'une structure hybride (60) selon l'une des revendications précédentes, comprenant après l'étape a') et préalablement à l'étape b), une étape a'') de recyclage de la structure collée (6), quand l'étape a') de détermination établit l'épaisseur seuil supérieure à l'épaisseur plafond ou l'épaisseur plafond inférieure à l'épaisseur utile.
- 15
5. Procédé de fabrication d'une structure hybride (60) selon la revendication précédente, dans lequel l'étape a'') de recyclage comprend un décollement au niveau de l'interface de collage (5) de la structure collée (6).
- 20
6. Procédé de fabrication d'une structure hybride (60) selon la revendication précédente, dans lequel l'étape a'') de recyclage comprend la réutilisation des substrats donneur (2) et support (1) issus du décollement pour une nouvelle étape a) de fourniture d'une structure collée (6).
- 25
- 30

7. Procédé de fabrication d'une structure hybride (60) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la seconde étape d'amincissement d) peut en outre comprendre une étape d'amincissement du substrat support (1).

5

8. Procédé de fabrication d'une structure hybride (60) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la couche utile (20) est composée d'un matériau choisi dans le groupe : tantalate de lithium (LiTaO_3), niobate de lithium (LiNbO_3), nitrure d'aluminium (AlN), oxyde de zinc (ZnO).

10

9. Procédé de fabrication d'une structure hybride (60) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le substrat support (1) est composé d'un matériau choisi dans le groupe : silicium, semi-conducteurs III-V, carbure de silicium, verre, saphir.

15

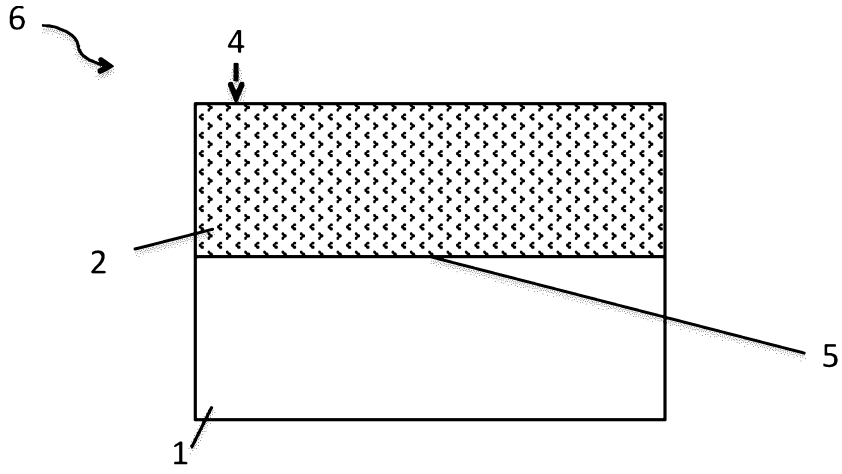


FIG. 1a

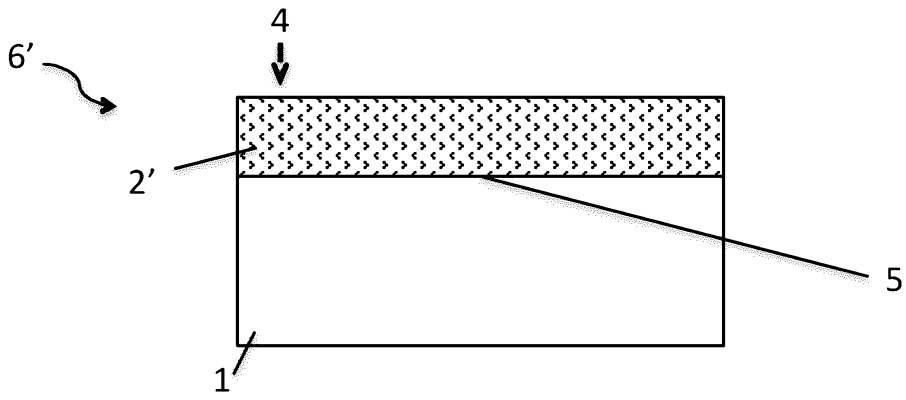


FIG. 1b

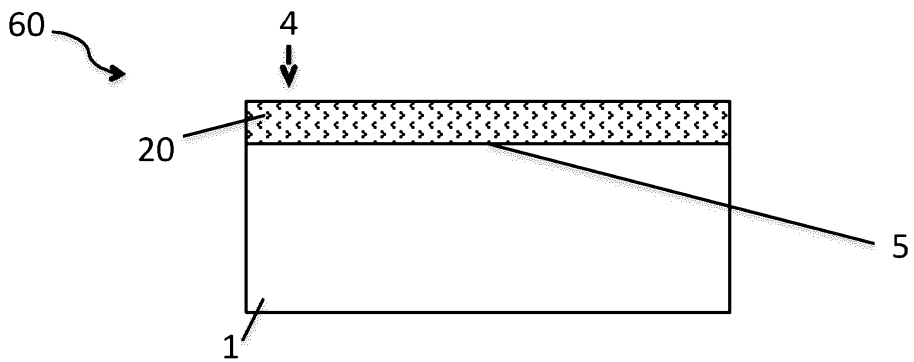


FIG. 1c

2/3

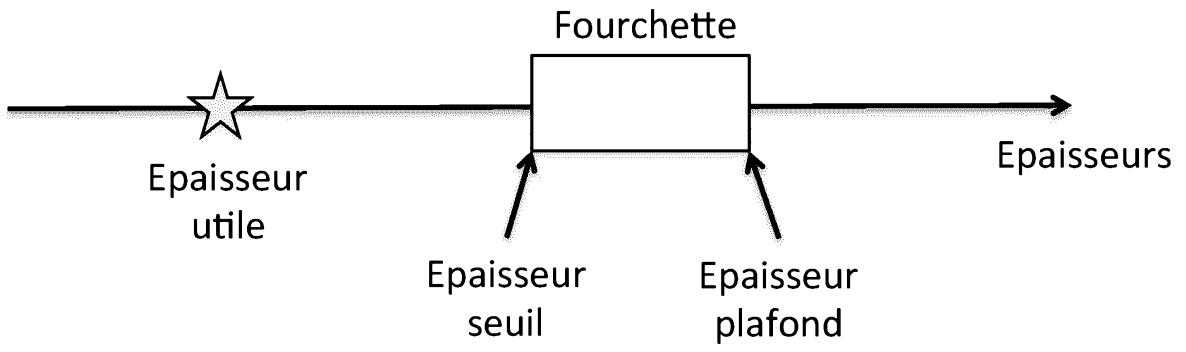


FIG.2a

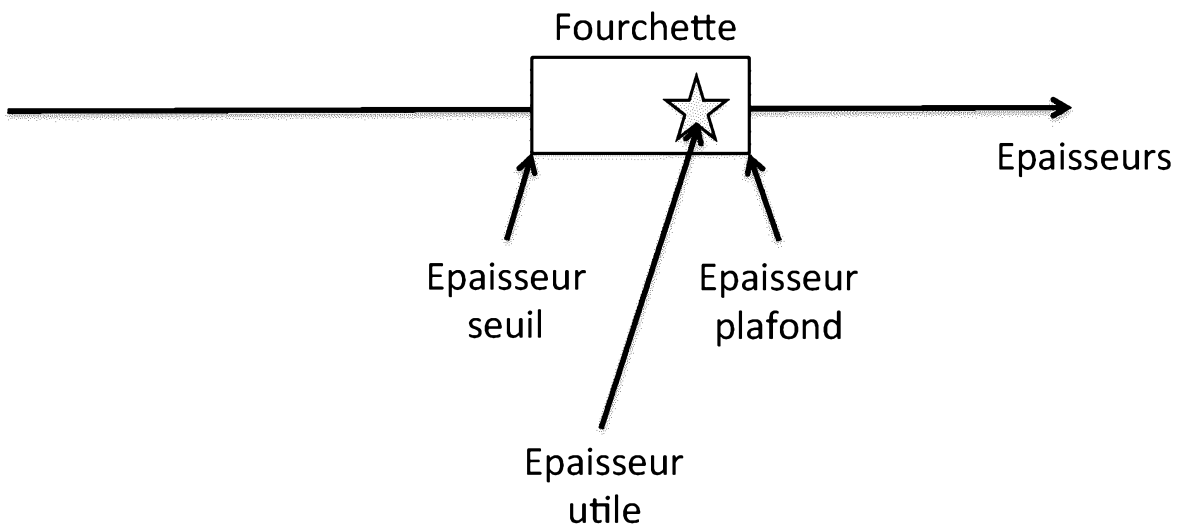


FIG.2b

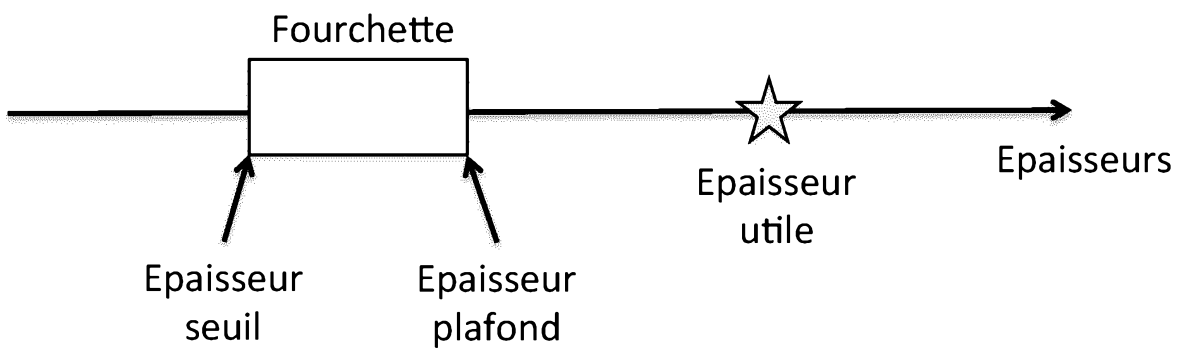


FIG.2c

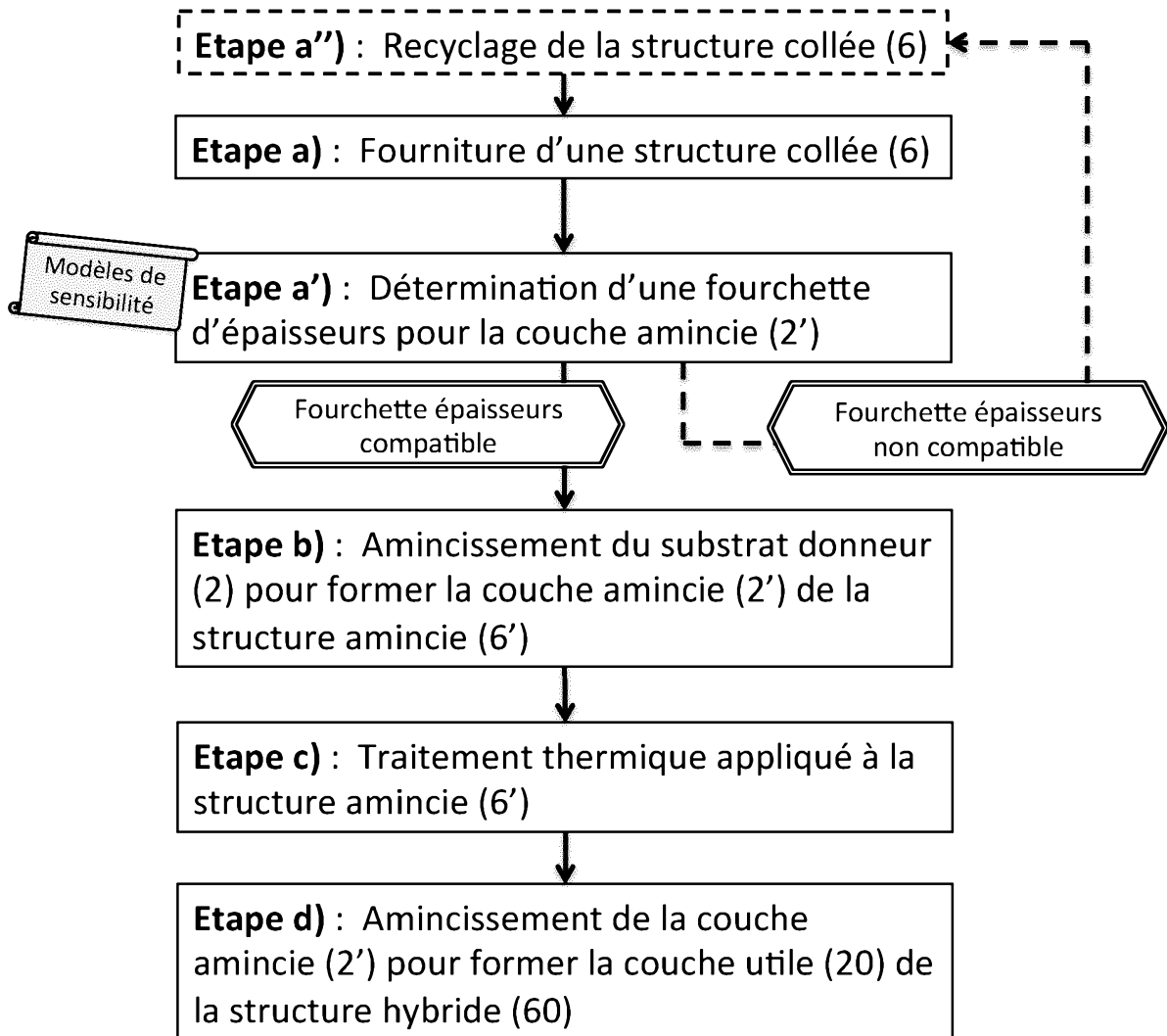


FIG.3

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

WO 2015/012005 A1 (NGK INSULATORS LTD [JP]; NGK CERAMIC DEVICE CO LTD [JP]) 29 janvier 2015 (2015-01-29) -& US 2016/133823 A1 (TAI TOMOYOSHI [JP] ET AL) 12 mai 2016 (2016-05-12)

US 2015/042207 A1 (HORI YUJI [JP] ET AL) 12 février 2015 (2015-02-12)

US 2014/210317 A1 (TAI TOMOYOSHI [JP] ET AL) 31 juillet 2014 (2014-07-31)

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

NEANT

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT