

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

①① N° de publication : **3 105 876**

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

②① N° d'enregistrement national : **19 15720**

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : **H 01 L 21/301 (2019.12), H 01 L 21/50**

①②

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤④ Procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en SiC monocristallin sur un substrat support.

②② Date de dépôt : 30.12.19.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 02.07.21 Bulletin 21/26.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 26.11.21 Bulletin 21/47.

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 Société anonyme à conseil  
d'administration* — FR.

⑦② Inventeur(s) : GAUDIN Gweltaz.

⑦③ Titulaire(s) : *SOITEC Société anonyme à conseil  
d'administration.*

⑦④ Mandataire(s) : IP TRUST.

**FR 3 105 876 - B1**



## Description

### **Titre de l'invention : Procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en SiC monocristallin sur un substrat support**

#### **DOMAINE DE L'INVENTION**

[0001] La présente invention concerne le domaine des matériaux semi-conducteurs pour composants microélectroniques. Elle concerne en particulier un procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en carbure de silicium monocristallin sur un substrat support, et autorisant un alignement précis sur un axe cristallographique de ladite couche mince.

#### **ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION**

[0002] L'intérêt pour le carbure de silicium (SiC) a considérablement augmenté au cours des dernières années, car ce matériau semi-conducteur peut accroître la capacité de traitement de l'énergie. Le SiC est de plus en plus largement utilisé pour la fabrication de dispositifs de puissance innovants, pour répondre aux besoins de domaines montants de l'électronique, comme notamment les véhicules électriques.

[0003] Les dispositifs de puissance et les systèmes intégrés d'alimentation basés sur du carbure de silicium monocristallin peuvent gérer une densité de puissance beaucoup plus élevée par rapport à leurs homologues traditionnels en silicium, et ce avec des dimensions de zone active inférieures. Pour limiter encore les dimensions des dispositifs de puissance sur SiC, il est avantageux de fabriquer des composants verticaux plutôt que latéraux. Pour cela, une conduction électrique verticale, entre une électrode disposée en face avant de la structure SiC et une électrode disposée en face arrière, doit être autorisée par ladite structure.

[0004] Les substrats en SiC monocristallin de haute qualité destinés à l'industrie microélectronique restent néanmoins chers et difficiles à approvisionner en grande taille. Il est donc avantageux de recourir à des solutions de transfert de couches minces, pour élaborer des structures composites comprenant typiquement une couche mince en SiC monocristallin sur un substrat support plus bas coût, qu'il soit monocristallin ou polycristallin. Une solution de transfert de couche mince bien connue est le procédé Smart Cut™, basé sur une implantation d'ions légers et sur un assemblage par collage direct. Un tel procédé permet par exemple de fabriquer une structure composite comprenant une couche mince en SiC monocristallin (c-SiC), prélevée d'un substrat donneur en c-SiC à faible densité de défauts, assemblée en contact direct ou via une couche métallique avec un substrat support en SiC poly-cristallin (p-SiC) ou en SiC monocristallin. Une telle structure composite autorise une conduction électrique verticale.

- [0005] Certains composants électroniques verticaux fabriqués sur une structure composite telle qu'énoncée nécessitent un alignement précis par rapport aux axes cristallographiques de la couche mince en c-SiC, pour atteindre un haut niveau de performance. La précision requise est typiquement de  $\pm 0,1^\circ$ . En pratique, il faut pouvoir aligner un élément du composant électronique (par exemple, la grille selon sa longueur) avec l'axe cristallographique (11-20) de la couche c-SiC, à mieux que  $0,1^\circ$ .
- [0006] Il est donc avantageux de fournir une structure composite sur laquelle il est possible de retrouver, de manière reproductible, au moins un axe cristallographique de la couche mince, de manière à créer des marques d'alignement cohérentes avec ledit axe et utilisables à tous les niveaux de masques nécessaires, pour l'élaboration des composants verticaux.
- [0007] Le substrat support et le substrat donneur utilisés pour la fabrication de la structure composite présentent habituellement chacun un méplat ou une encoche (appelée « notch » selon la terminologie anglo-saxonne) qui indique un axe cristallographique contenu dans le plan de la face avant du substrat, avec une précision de  $\pm 1^\circ$ .
- [0008] Une telle imprécision ne permet pas de se baser sur le méplat ou l'encoche d'un substrat pour définir des marques d'alignement représentatives d'un axe cristallographique de manière reproductible, avec une précision de  $\pm 0,1^\circ$ .
- [0009] Ajoutant à cela les imprécisions d'alignement lors de l'assemblage des substrats, pour former la structure composite, il apparaît clairement impossible de se baser sur le méplat ou l'encoche du substrat support pour définir des marques d'alignement représentatives d'un axe cristallographique de la couche mince issue du substrat donneur.
- [0010] Pour réaliser un repérage précis d'un axe cristallographique, il serait nécessaire d'utiliser des outils de diffractométrie de rayons X (DRX ou XRD selon l'abréviation anglaise de « X Ray diffraction »), ce qui complexifie grandement le procédé de fabrication de la structure composite.

## **OBJET DE L'INVENTION**

- [0011] La présente invention vise à remédier à tout ou partie des inconvénients précités. Elle concerne un procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support, ladite structure composite autorisant un alignement précis sur un axe cristallographique de ladite couche mince.

## **BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION**

- [0012] L'invention concerne un procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support. Le procédé comprend :
- [0013] - une étape a) de fourniture d'un substrat donneur en carbure de silicium mono-

cristallin présentant une face avant et une face arrière,

- [0014] - une étape b) de fourniture d'un substrat support présentant une face avant, une face arrière, une tranche et un premier motif d'alignement sur l'une desdites faces ou sur la tranche,
- [0015] - une étape c) de traitement thermique à une température supérieure ou égale à 1600°C sous atmosphère contrôlée, appliquée au moins au substrat donneur, pour provoquer une réorganisation de surface sur au moins une des faces dudit substrat, la réorganisation de surface donnant lieu à la formation de premières marches d'amplitude nanométrique, parallèles à un premier axe principal,
- [0016] - une étape d) d'assemblage du substrat donneur et du substrat support comprenant, avant la mise en contact des substrats, un alignement optique, à mieux que  $\pm 0,1^\circ$ , entre une marque de repérage indiquant le premier axe principal sur le substrat donneur et au moins un motif d'alignement du substrat support,
- [0017] - une étape e) de transfert d'une couche mince issue du substrat donneur sur le substrat support.
- [0018] Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison techniquement réalisable :
- [0019] • le premier motif d'alignement du substrat support est un méplat ou une encoche aménagé(e) au niveau de sa tranche, et l'alignement optique lors de l'étape d'assemblage utilise ledit premier motif d'alignement ;
- le substrat support est en carbure de silicium monocristallin, et l'étape de traitement thermique est appliquée également au substrat support et provoque une réorganisation de surface sur au moins une des faces dudit substrat, la réorganisation de surface donnant lieu à la formation de deuxièmes marches d'amplitude nanométrique, parallèles à un deuxième axe principal ;
- un deuxième motif d'alignement sur le substrat support est formé par les deuxièmes marches elles-mêmes, par au moins un motif défini par photolithographie et gravure sur la face avant du substrat support à partir des deuxièmes marches, ou par au moins un motif défini par photolithographie et gravure sur la face arrière du substrat support à partir des deuxièmes marches ;
- l'alignement optique lors de l'étape d'assemblage utilise ledit deuxième motif d'alignement ;
- la marque de repérage est formée par les premières marches elles-mêmes, par au moins une marque définie par photolithographie et gravure sur la face avant du substrat donneur à partir des premières marches, ou par au moins une marque définie par photolithographie et gravure sur la face arrière du substrat donneur à partir des premières marches ;
- l'étape d'assemblage comprend un polissage mécano-chimique de la face

avant du substrat donneur et/ou de la face avant du substrat support, avant la mise en contact des deux substrats ;

- l'étape d'assemblage comprend le dépôt d'une couche intermédiaire sur la face avant du substrat donneur et/ou sur la face avant du substrat support, préalablement à la mise en contact des deux substrats ;
- le procédé de fabrication comprend, avant l'étape d'assemblage, une étape de formation d'un plan fragile enterré dans le substrat donneur, délimitant la couche mince entre ledit plan fragile enterré et la face avant du substrat donneur ;
- le procédé de fabrication comprend, au cours de l'étape de transfert, une séparation le long du plan fragile enterré pour former la structure composite comprenant la couche mince disposée sur le substrat support d'une part, et le reste du substrat donneur d'autre part.

### **BREVE DESCRIPTION DES FIGURES**

[0020] 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 :

[0021] [fig.1] La figure 1 présente une structure composite élaborée selon un procédé de fabrication conforme à l'invention ;

[0022] [fig.2a]

[0023] [fig.2b]

[0024] [fig.2c]

[0025] [fig.2d]

[0026] [fig.2e] Les figures 2a à 2e présentent des étapes d'un procédé de fabrication conforme à l'invention.

[0027] [fig.3]

[0028] [fig.4]

[0029] [fig.5]

[0030] [fig.6a]

[0031] [fig.6b]

[0032] [fig.6c] Les figures 3, 4, 5, 6a, 6b et 6c présentent des étapes alternatives ou optionnelles du procédé de fabrication conforme à l'invention.

### **DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION**

[0033] Dans la partie descriptive, les mêmes références sur les figures pourront être utilisées pour des éléments de même type. Les figures sont des représentations schématiques qui, dans un objectif de lisibilité, ne sont pas à l'échelle. En particulier, les épaisseurs des couches selon l'axe z ne sont pas à l'échelle par rapport aux dimensions latérales selon les axes x et y ; et les épaisseurs relatives des couches entre elles ne sont pas né-

cessairement respectées sur les figures.

- [0034] La présente invention concerne un procédé de fabrication d'une structure composite 1 comprenant une couche mince 100 en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support 20 (figure 1).
- [0035] Le procédé comprend en premier lieu une étape a) de fourniture d'un substrat donneur 10 en carbure de silicium monocristallin (figure 2a). Dans la suite de la description, « c-SiC » sera utilisé pour parler de carbure de silicium monocristallin.
- [0036] La couche mince 100 en c-Si de la structure composite 1 sera formée, à l'issue du procédé de la présente invention, à partir du substrat donneur 10 : ainsi, l'orientation cristallographique, la qualité cristalline ainsi que le niveau de dopage du substrat donneur 10 sont choisis pour répondre aux spécifications requises des composants, par exemple verticaux, destinés à être élaborés sur la couche mince 100.
- [0037] A titre d'exemple, le substrat donneur 10 en c-SiC est de polytype 4H ou 6H, présentant une désorientation ("offcut") inférieure à  $4.0^\circ$  par rapport à l'axe cristallographique  $\langle 11\text{-}20 \rangle \pm 0.5^\circ$ , et une densité de dislocations traversantes (« Micropipes ») inférieure ou égale à  $5/\text{cm}^2$ , voire inférieure à  $1/\text{cm}^2$ . Dopé de type N (azote), il présente une résistivité préférentiellement comprise entre  $0.015 \text{ ohm.cm}$  et  $0.030 \text{ ohm.cm}$ . On pourra choisir un substrat donneur 10 présentant une faible densité de dislocation de plan basal (BPD pour « basal plane dislocation » selon la terminologie anglo-saxonne), typiquement inférieure ou égale à  $1500/\text{cm}^2$  selon la sensibilité des composants visés à ces défauts.
- [0038] Alternativement, le substrat donneur 10 peut comporter un substrat initial 10' et une couche superficielle 110 du côté de sa face avant 10a, élaborée par exemple par épitaxie, et présentant les propriétés requises pour la future couche mince 100 ; cette dernière sera formée, à l'issue du procédé de la présente invention, à partir de ladite couche superficielle 110 (figure 3). On pourra viser, dans ce cas, une densité de défauts de type BPD dans la couche superficielle 110 inférieure à celle du substrat initial 10', et avantageusement inférieure à  $5/\text{cm}^2$ , voire inférieure à  $1/\text{cm}^2$ .
- [0039] Le substrat donneur 10 se présente préférentiellement sous la forme d'une plaquette circulaire de diamètre 100mm ou 150mm voire 200mm et d'épaisseur comprise typiquement entre 300 et 800 microns. Il présente une face avant 10a, une face arrière 10b et une tranche 10c formant son pourtour circulaire. La rugosité de surface de la face avant 10a est avantageusement choisie inférieure à  $1 \text{ nm Ra}$ , rugosité moyenne (« average roughness ») mesurée par microscopie à force atomique (AFM) sur un scan de  $20 \text{ microns} \times 20 \text{ microns}$ .
- [0040] Le substrat donneur 10 comprend habituellement un méplat 11 ou une encoche (appelée « notch » selon la terminologie anglo-saxonne) aménagé(e) au niveau de sa tranche 10c. En général, le méplat 11 (ou l'encoche) repère un axe cristallographique

particulier, contenu dans le plan (x,y) de la face avant 10a : pour un substrat en c-SiC, l'axe cristallographique (11-20) est par exemple parallèle au méplat 11. La précision de ce repérage est néanmoins faible, puisque le méplat 11 garantit la direction de l'axe cristallographique à +/-1°.

- [0041] Selon une autre option, le substrat donneur 10 peut comporter un ou plusieurs motifs micrométriques ou millimétriques réalisés par les techniques connues de lithographie, gravure et dépôt, sur sa face avant 10a ou sur sa face arrière 10b, et susceptibles d'indiquer une direction cristallographique particulière.
- [0042] Le procédé comprend également une étape b) de fourniture d'un substrat support 20 (figure 2b). Ce dernier peut être choisi en tout matériau compatible avec les procédés microélectroniques habituellement mis en œuvre pour élaborer des composants à base de SiC. Avantageusement, le substrat support 20 est en carbure de silicium polycristallin (p-SiC) ou en carbure de silicium monocristallin. Dans ce dernier cas, on peut tolérer un niveau de défauts et de dislocations plus élevé que pour le substrat donneur 10 (et la couche mince 100 qui en sera issue). Préférentiellement, le substrat support 20 présente une résistivité comprise entre 0.015 ohm.cm et 0.030 ohm.cm pour répondre aux exigences de conduction électrique des composants verticaux susceptibles d'être élaborés sur la future structure composite 1.
- [0043] Le substrat support 20 se présente préférentiellement sous la forme d'une plaquette circulaire de diamètre 100mm ou 150mm voire 200mm et d'épaisseur comprise typiquement entre 300 et 800 microns. Il présente une face avant 20a, une face arrière 20b et une tranche 20c formant son pourtour circulaire. La rugosité de surface de la face avant 20a est avantageusement choisie inférieure à 1 nm Ra, comme pour le substrat donneur 10.
- [0044] Le substrat support 20 comprend en général un motif d'alignement 21 (appelé premier motif d'alignement 21 par la suite), qui est disposé sur l'une des faces avant 20a et arrière 20b ou sur la tranche 20c. Sur la figure 2b, le premier motif d'alignement 21 est un méplat aménagé au niveau de la tranche 20c du substrat support 20. Alternativement, le premier motif d'alignement peut consister en une encoche également aménagée au niveau de la tranche 20c. Selon encore une autre option, le premier motif d'alignement 21 peut consister en un ou plusieurs motifs micrométriques ou millimétriques réalisés par les techniques connues de lithographie, gravure et dépôt, sur la face avant 20a ou sur la face arrière 20b du substrat support 20, et susceptibles d'indiquer une direction particulière ou de servir de repère pour aligner des niveaux de masques lithographiques ultérieurs.
- [0045] Dans la cas d'un substrat support 20 monocristallin, le premier motif d'alignement 21 repère un axe cristallographique contenu dans le plan (x,y) parallèle à la face avant 20a du substrat 20, comme expliqué précédemment pour le substrat donneur 10, avec

une précision de  $\pm 1^\circ$ .

- [0046] Le procédé selon l'invention comprend ensuite une étape c) de traitement thermique à une température supérieure ou égale à  $1600^\circ\text{C}$  sous atmosphère contrôlée, appliquée au substrat donneur 10 et éventuellement au substrat support 20. La température est typiquement choisie entre  $1600^\circ\text{C}$  et  $1800^\circ\text{C}$ , par exemple  $1700^\circ\text{C}$ , et l'atmosphère est avantageusement neutre ou réductrice, à base d'argon et/ou d'un mélange d'argon et d'environ 2% d'hydrogène.
- [0047] Appliqué à un substrat de c-SiC, un tel traitement thermique provoque une réorganisation de surface sur au moins une des faces dudit substrat ; la réorganisation de surface donne lieu à la formation de marches (« step bunching » selon la terminologie anglo-saxonne) parallèles entre elles et présentant une amplitude nanométrique, par exemple de l'ordre de quelques nanomètres jusqu'à 500nm.
- [0048] Ainsi, comme illustré sur la figure 2c, après l'étape de traitement thermique, le substrat donneur 10 présente des marches 13 (appelée premières marches par la suite) sur sa face avant 10a et/ou sur sa face arrière 10b, toutes parallèles à un axe principal P1 (appelé premier axe principal) : cet axe principal P1 indique un axe cristallographique bien défini. En l'occurrence, si le substrat donneur 10 est en c-SiC de polytype 4H ou 6H, l'axe principal P1 est parallèle à l'axe cristallographique (1-100).
- [0049] La présence des premières marches 13, sur la face avant 10a et/ou sur la face arrière 10b du substrat donneur 10 peut constituer une marque de repérage 12 indiquant l'axe principal P1, et par conséquent l'axe cristallographique associé dans le plan (x,y).
- [0050] Selon une autre option, la marque de repérage 12 est formée par au moins une marque définie par les techniques conventionnelles de photolithographie et gravure, sur la face avant 10a du substrat donneur 10, à partir des premières marches 13 (figure 4).
- [0051] Selon encore une autre option, au moins une marque est définie sur la face arrière 10b du substrat donneur 10 à partir des premières marches 13, formant ainsi la marque de repérage 12 au niveau de la face arrière 10b. Cette option est avantageuse en ce qu'elle évite une structuration locale de la face avant 10a du substrat donneur 10, ce qui est favorable à une étape ultérieure d'assemblage.
- [0052] Si le substrat support 20 est en c-SiC, l'étape c) de traitement thermique peut également lui être appliquée : des marches 23 (appelées deuxièmes marches) sont ainsi générées sur sa face avant 20a et/ou sur sa face arrière 20b, toutes parallèles à un axe principal P2 (appelé deuxième axe principal) : cet axe principal P2 indique un axe cristallographique bien défini du substrat support 20.
- [0053] Comme illustré sur la figure 2c, la présence des deuxièmes marches 23, sur la face avant 20a et/ou sur la face arrière 20b du substrat support 20 peut constituer un deuxième motif d'alignement 22 indiquant l'axe principal P2, et par conséquent l'axe



cristallographique associé dans le plan (x,y).

- [0054] Selon une autre option, le deuxième motif d'alignement 22 est formé par au moins un motif (défini par les techniques conventionnelles de photolithographie et gravure), sur la face avant 20a du substrat support 20, à partir des deuxième marches 23 (figure 4).
- [0055] Selon encore une autre option, au moins un motif est défini sur la face arrière 20b du substrat support 20 à partir des deuxième marches 23, formant ainsi le deuxième motif d'alignement 22 au niveau de la face arrière 20b.
- [0056] Notons qu'il est possible de privilégier l'apparition des marches 13,23 sur l'une ou l'autre des faces du substrat 10,20 auquel le traitement thermique est appliqué. En particulier, le c-SiC de polytype 4H est polaire et peut présenter, en tant que face avant, une face Si ou une face C : compte tenu des niveaux d'énergie différents de ces deux faces, la reconstruction de surface d'une face Si génèrera beaucoup plus de marches, d'amplitude plus importante, que la reconstruction d'une face C, dans certaines conditions de recuit.
- [0057] Le procédé comprend ensuite une étape d) d'assemblage du substrat donneur 10 et du substrat support 20, via leurs faces avant 10a,20a respectives. Cette étape comprend la mise en contact intime des deux substrat 10,20, pour opérer un collage direct, par adhésion moléculaire. Comme cela est bien connu en soi, un tel collage nécessite que les surfaces assemblées soient préalablement nettoyées, pour retirer les contaminations (particulaires, organiques, ...), et potentiellement activées, pour privilégier des terminaisons chimiques de surface favorables à la propagation de l'onde de collage et à la bonne tenue de l'interface de collage.
- [0058] Selon l'invention, avant la mise en contact des substrats 10,20, un alignement optique, à mieux que  $\pm 0,1^\circ$ , est effectué entre une marque de repérage 12 indiquant le premier axe principal P1 sur le substrat donneur 10 et au moins un motif d'alignement 21,22 du substrat support 20. L'alignement entre la marque de repérage 12 et le motif d'alignement 21,22 est visé avec une précision meilleure que  $\pm 0,1^\circ$ , voire meilleure que  $\pm 0,05^\circ$ .
- [0059] L'objectif de cet alignement est d'assurer que le premier axe principal P1 (correspondant à un axe cristallographique particulier du substrat donneur 10, et donc de la couche mince 100 qui en sera issue) soit précisément repéré par le premier 21 ou le deuxième 22 motif d'alignement du substrat support 20.
- [0060] Rappelons que l'alignement optique peut être réalisé indifféremment entre des marques ou motifs disposés sur les faces avant 10a,20, les faces arrières 10b,20b ou les tranches 10c,20c des substrats donneur 10 et support 20.
- [0061] Selon une première variante, l'alignement optique est effectué entre la marque de repérage 12, quelle qu'elle soit, et le premier motif d'alignement 21 du substrat support 20 (figure 2d). Dans un tel cas, il n'est pas nécessaire que le substrat support 20 ait

subi l'étape c) de traitement thermique, car un deuxième motif d'alignement 22, basé sur les deuxièmes marches 23 n'est pas utilisé. La première variante est avantageusement mise en œuvre lorsque le substrat support 20 comprend du p-SiC, ou autre matériau amorphe ou poly-cristallin.

[0062] Selon une deuxième variante, l'alignement optique est effectué entre la marque de repérage 12, quelle qu'elle soit, et le deuxième motif d'alignement 22 du substrat support 20, quel qu'il soit (figure 5). Dans un tel cas, le traitement thermique de l'étape c) a été appliqué au substrat support 20, de manière à générer les deuxièmes marches 23 requises pour former un deuxième motif d'alignement 22. Cette deuxième variante est avantageusement mise en œuvre lorsque le substrat support 20 comprend du c-SiC. Elle est également préférée dans le cas où la future structure composite 1 est destinée à l'élaboration de composants verticaux. En effet, pour ces composants, il est avantageux d'assembler directement les surfaces semi-conductrices en c-SiC de chacun des substrats 10,20 (par exemple via un collage direct hydrophobe) ; on note cependant qu'un désalignement de plus de  $0,2^\circ$  entre les axes cristallographiques contenus dans le plan (x,y) du substrat donneur 10 et les axes cristallographiques contenus dans le plan (x,y) du substrat support 20 augmente la résistivité de l'interface d'assemblage, ce qui n'est pas favorable à la conduction électrique verticale des composants. Il est donc avantageux de pouvoir aligner les axes cristallographiques des deux substrats 10,20 à  $\pm 0,1^\circ$  lors de l'assemblage, comme le prévoit le procédé selon l'invention.

[0063] L'étape d) d'assemblage des substrats 10,20 peut comprendre un traitement de surface pour lisser l'une ou l'autre des faces avant 10a,20a des substrats donneur 10 et support 20, préalablement à leur mise en contact. En effet, la présence de marches 13 sur au moins la face avant 10a du substrat donneur 10 peut affecter la qualité du collage direct. Les principes évoqués ci-après en référence au substrat donneur 10 s'appliquent de manière similaire lorsque des deuxièmes marches 23 sont présentes sur la face avant du substrat support 20.

[0064] Ainsi, un polissage mécano-chimique de la face avant 10a du substrat donneur 10 peut par exemple être opéré avant l'alignement optique et la mise en contact des deux substrats 10,20. Le polissage ayant pour conséquence de faire disparaître les premières marches 13, il est nécessaire qu'une marque de repérage 12 sur le substrat donneur 10 (ou un deuxième motif d'alignement 22 sur le substrat support 20) ait été réalisée à partir des marches 13 avant ledit polissage. Alternativement, même si les premières marches 13 sont éliminées sur la face avant 10a, des marches 13 présentes sur la face arrière 10b du substrat donneur 10 peuvent être utilisées pour élaborer une marque de repérage 12 ou directement pour l'alignement optique.

[0065] Toujours préalablement à l'alignement optique et à la mise en contact, l'étape d) d'assemblage peut également comprendre le dépôt d'une couche intermédiaire sur la

face avant 10a du substrat donneur 10 et/ou sur la face avant 20a du substrat support 20. La couche intermédiaire peut être une couche isolante ou électriquement conductrice, par exemple métallique, selon le type de composant qui sera élaboré sur la structure composite 1 à l'issue du procédé selon l'invention. La couche isolante peut comprendre un matériau choisi parmi l'oxyde de silicium, le nitrure de silicium, etc ; la couche conductrice peut comprendre un matériau choisi parmi le tungstène (W), les siliciures de tungstène (WSi<sub>2</sub>), le titane (Ti), le nickel (Ni), les carbonitrures de silicium (SiCN<sub>x</sub> avec x=10% par exemple), etc. La couche intermédiaire peut également être lissée, par exemple par polissage mécano-chimique, pour faciliter le collage direct des substrats 10,20. Les marches 13,23 sur les faces avant 10a,20a des substrats donneur 10 et support 20 sont ainsi encapsulées et ne gênent pas l'assemblage.

- [0066] Lors de l'étape d) d'assemblage, la mise en contact des substrats 10,20 peut être faite sous atmosphère ambiante ou sous atmosphère contrôlée, par exemple sous gaz neutre et/ou sous vide. Elle peut également être opérée à une température contrôlée, comprise par exemple entre 20°C et 300°C.
- [0067] Comme cela est bien connu en soi, la mise en contact des substrats 10,20 s'accompagne de la propagation d'une onde de collage, créant une interface de collage 30 et aboutissant à un ensemble collé 1' (figure 2d).
- [0068] Le procédé de fabrication selon l'invention comprend enfin une étape e) de transfert d'une couche mince 100 issue du substrat donneur 10 sur le substrat support 20 (figure 2e).
- [0069] Selon un premier mode de réalisation, le transfert de la couche mince 100 est réalisé par amincissement de la face arrière 10b du substrat donneur 10, jusqu'à l'épaisseur souhaitée de la couche mince 100. Un tel amincissement peut par exemple mettre en œuvre des techniques conventionnelles de rectification mécanique (« grinding » selon la terminologie anglo-saxonne), de gravure chimique humide ou sèche et/ou de polissage mécano-chimique, en alternance avec des séquences de nettoyage. Un (ou plusieurs) traitement(s) thermique(s) peut(vent) être appliqué(s) pour consolider l'interface de collage ou encore pour améliorer la qualité cristalline et/ou de surface de la couche mince 100.
- [0070] Selon un deuxième mode de réalisation, le transfert de la couche mince 10 est réalisé par le procédé Smart Cut™. Dans ce cas, le procédé de fabrication selon l'invention comprend, avant l'étape d'assemblage, une étape de formation d'un plan fragile enterré 15 dans le substrat donneur 10, délimitant la couche mince 100 entre ledit plan fragile enterré 15 et la face avant 10a du substrat donneur 10 (figure 6a).
- [0071] De manière avantageuse, une étape d'implantation ionique d'espèces légères est opérée jusqu'à une profondeur déterminée dans le substrat donneur 10. Les espèces légères implantées sont préférentiellement de l'hydrogène, de l'hélium ou une co-

implantation de ces deux espèces. Ces espèces légères vont former, autour de la profondeur déterminée, des microcavités distribuées dans une fine couche parallèle à la surface libre du substrat donneur 10, soit parallèle au plan (x,y) sur la figure 6a. On appelle cette fine couche le plan fragile enterré 15, par souci de simplification. L'énergie d'implantation des espèces légères est choisie de manière à atteindre la profondeur déterminée dans le substrat donneur 10, ladite profondeur correspondant à une épaisseur visée de la couche mince 10 après transfert. Par exemple, des ions hydrogène seront implantés à une énergie comprise entre 10 keV et 250 keV (voire jusqu'à 500 keV), et à une dose comprise entre  $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$  et  $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ , pour délimiter une couche mince 10 de l'ordre de 100 à 1500 nm.

- [0072] Notons qu'une couche de protection pourra être déposée sur la face avant 10a du substrat donneur 10, préalablement à l'étape d'implantation ionique. Cette couche de protection peut être composée par un matériau tel que l'oxyde de silicium ou le nitrure de silicium.
- [0073] Toujours dans le deuxième mode de réalisation, l'étape d) d'assemblage précédemment décrite est ensuite effectuée (figure 6b). Puis, l'étape e) de transfert comprend une séparation le long du plan fragile enterré 15, pour former la structure composite 1 comprenant la couche mince 100 disposée sur le substrat support 20 d'une part, et le reste 10'' du substrat donneur d'autre part.
- [0074] La séparation peut être induite par application d'un traitement thermique à température typiquement comprise entre  $800^\circ\text{C}$  et  $1000^\circ\text{C}$ , pendant quelques minutes à quelques heures. Au cours dudit traitement thermique, les microcavités présentes dans le plan fragile enterré 15 suivent une cinétique de croissance jusqu'à l'initiation spontanée d'une onde de fracture qui va se propager sur toute l'étendue du plan fragile enterré 15 et provoquer la séparation entre la structure composite 1 et le reste 10'' du substrat donneur 10.
- [0075] Alternativement, la séparation peut être induite par application d'une contrainte localisée, ou par une combinaison de traitement thermique et de contrainte mécanique.
- [0076] Après la séparation, la face libre de la couche mince 10 présente typiquement une rugosité comprise entre 3 et 6 nm Ra (AFM – scan 20 microns x 20 microns). L'objectif pour la fabrication ultérieure de composants est d'avoir une rugosité inférieure à 1 nm Ra.
- [0077] Ainsi, après l'étape e) de transfert, le procédé de fabrication peut comprendre des étapes de finition appliquées à la structure composite 1. Ces étapes de finition visent en particulier à améliorer la rugosité de la surface libre de la couche mince 100 (face avant 1a de la structure composite 1).
- [0078] Les étapes de finition peuvent en particulier faire appel à des techniques connues de polissage mécano-chimique, appliquées à la face avant 1a. Elles peuvent également

comprendre des traitements thermiques visant à consolider l'interface de collage 30 ou encore à améliorer la qualité cristalline et/ou de surface de la couche mince 100.

- [0079] Quel que soit le mode de réalisation choisi, à l'issue de l'étape e) de transfert, la marque de repérage 12 du substrat donneur 10 est, soit absente de la structure composite 1 (en particulier si elle était située sur la face arrière 10b du substrat donneur 10), soit peu apparente ou dégradée (si elle était située sur la face avant 10a ou la tranche 10c du substrat donneur 10).
- [0080] Ainsi, pour élaborer des composants sur ou dans la couche mince 100 en étant aligné sur un axe cristallographique particulier de ladite couche 100, il est possible de se baser sur le motif d'alignement 21,22 du substrat support 20 qui a été utilisé pour l'alignement optique de l'étape d) d'assemblage. Ce motif d'alignement indique avec une grande précision ( $\pm 0,1^\circ$ ) la direction de l'axe cristallographique particulier de la couche mince 100.

### Exemples

- [0081] Selon un exemple non limitatif de mise en œuvre, le substrat donneur 10 fourni à l'étape a) du procédé de fabrication est une plaquette de c-SiC, de polytype 4H, d'orientation  $4.0^\circ$  par rapport à l'axe  $\langle 11-20 \rangle \pm 0.5^\circ$ , de diamètre 150mm et d'épaisseur 350 $\mu\text{m}$ . La face avant 10a du substrat donneur 10 est une face de type C (carbone), alors que sa face arrière 10b est de type Si (silicium). Le substrat donneur 10 peut comprendre un méplat 11 aménagé au niveau de sa tranche 10c et indiquant à  $\pm 1^\circ$  près, la direction cristallographique (1-100) contenue dans la plan (x,y) de la face avant 10a dudit substrat 10.
- [0082] Le substrat support 20 fourni à l'étape b) du procédé de fabrication est une plaquette de c-SiC, de polytype 4H, d'orientation  $4.0^\circ$  par rapport à l'axe  $\langle 11-20 \rangle \pm 0.5^\circ$ , de diamètre 150mm et d'épaisseur 350 $\mu\text{m}$ . Le substrat support 20 comprend un méplat 21 aménagé au niveau de sa tranche 20c et indiquant la direction cristallographique (1-100) contenue dans la plan (x,y) de la face avant 20a dudit substrat 20. La face avant 20a est de type Si et la face arrière 20b est de type C.
- [0083] Une séquence classique de nettoyage est opérée sur les substrats 10,20 préalablement à l'étape c) de traitement thermique.
- [0084] Le traitement thermique à  $1700^\circ\text{C}$  sous argon combiné à 2% d'hydrogène est ensuite appliqué aux deux substrats 10,20, provoquant l'apparition de premières marches 13 sur les faces 10a,10b du substrat donneur 10 et de deuxième marches 23 sur les faces 20a,20b du substrat support 20. Compte tenu des énergies différentes requises par les faces de type Si et les faces de type C pour la réorganisation de surface, les premières marches 13 sur le substrat donneur 10 sont de plus grande amplitude sur sa face arrière 10b (face Si) que sur sa face avant 10a (face C) ; et les deuxième marches 23 sur le

substrat support 20 sont de plus grande amplitude sur sa face avant 20a (face Si) que sur sa face arrière (face C). Le substrat donneur 10 et le substrat support 20 étant de même nature et de même orientation cristalline, le premier axe principal P1 et le deuxième axe principal P2, respectivement parallèles aux premières marches 13 et aux deuxièmes marches 23 correspondent à un même axe cristallographique (1-100).

- [0085] A partir des premières marches 13 sur la face arrière 10b du substrat donneur 10, une marque de repérage 12 est définie sur ladite face arrière 10b. A partir des deuxièmes marches 23 sur la face avant 20a du substrat support 20, un deuxième motif d'alignement 22 est défini sur la face arrière 20b dudit substrat 20. Rappelons que la marque 12 et le deuxième motif 22 sont réalisés de manière à indiquer précisément la direction respectivement du premier (P1) et du deuxième (P2) axe principal. Ils peuvent consister chacun en deux croix d'alignement, disposées en bord du substrat associé.
- [0086] Une implantation d'ions hydrogène est opérée à une énergie de 60keV et une dose de  $6 \times 10^{16}$  H<sup>+</sup>/cm<sup>2</sup>, à travers la face avant 10a du substrat donneur 10. Optionnellement, le substrat donneur 10 peut comporter une couche de protection au niveau de sa face avant 10a, à travers laquelle les ions sont implantés. Un plan fragile enterré 15 est créé à une profondeur d'environ 500 nm dans le substrat donneur 10.
- [0087] L'étape d) d'assemblage comprend un polissage mécano-chimique des faces avant 10a,20a des substrats 10,20, pour éliminer les marches 13,23 générées lors de l'étape c) et restaurer un bon état de surface et une rugosité inférieure à 0,2 nm rms, favorable à un assemblage de qualité. Notons que la couche de protection précitée, si elle est présente, sera retirée préalablement au polissage.
- [0088] Les substrats 10,20 sont ensuite introduits dans un équipement de collage muni d'un module d'alignement autorisant un alignement optique à mieux que  $\pm 0,1^\circ$ . La marque de repérage 12 en face arrière 10b du substrat donneur 10 et le deuxième motif d'alignement 22 en face arrière 20b du substrat support 20 sont utilisés pour cet alignement optique entre les substrats. Les axes cristallographiques (1-100) des deux substrats 10,20 seront ainsi alignés à mieux que  $\pm 0,1^\circ$ . En d'autres termes, après assemblage l'axe cristallographique (1-100) du substrat donneur 10 pourra être décalé par rapport à l'axe cristallographique (1-100) du substrat support 20 de  $0,1^\circ$  au maximum.
- [0089] L'assemblage s'opère ensuite par la mise en contact des deux substrats, alignés l'un par rapport à l'autre, sous atmosphère neutre (Ar ou N) et sous vide ( $< 10^{-8}$  Pa).
- [0090] L'étape e) de transfert est réalisée par application d'un recuit à 950°C pendant 30 min : une séparation spontanée le long du plan fragile enterré s'opère, donnant lieu à la structure composite 1 et au reste 10'' du substrat donneur.
- [0091] Le deuxième motif d'alignement 22, présent sur la face arrière 20b du substrat

support 20 (qui est également la face arrière de la structure composite 1), indique précisément, à  $\pm 0,1^\circ$  près (voire mieux), la direction de l'axe cristallographique (1-100) de la couche mince 100 et peut être facilement utilisé lors de l'élaboration de composants sur ladite couche 100 de la structure composite 1.

[0092] Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation et aux exemples décrits, et on peut y apporter des variantes de réalisation sans sortir du cadre de l'invention tel que défini par les revendications.

## Revendications

- [Revendication 1] Procédé de fabrication d'une structure composite (1) comprenant une couche mince (100) en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support (20), le procédé comprenant:
- une étape a) de fourniture d'un substrat donneur (10) en carbure de silicium monocristallin présentant une face avant (10a) et une face arrière (10b),
  - une étape b) de fourniture d'un substrat support (20) présentant une face avant (20a), une face arrière (20b), une tranche (20c) et un premier motif d'alignement (21) sur l'une desdites faces ou sur la tranche,
  - une étape c) de traitement thermique à une température supérieure ou égale à 1600°C sous atmosphère contrôlée, appliquée au moins au substrat donneur (10), pour provoquer une réorganisation de surface sur au moins une des faces (10a,10b) dudit substrat (10), la réorganisation de surface donnant lieu à la formation de premières marches (13) d'amplitude nanométrique, parallèles à un premier axe principal (P1),
  - une étape d) d'assemblage du substrat donneur (10) et du substrat support (20) comprenant, avant la mise en contact des substrats (10,20), un alignement optique, à mieux que  $\pm 0,1^\circ$ , entre une marque de repérage (12) indiquant le premier axe principal (P1) sur le substrat donneur (10) et au moins un motif d'alignement (21,22) du substrat support (20),
  - une étape e) de transfert d'une couche mince (100) issue du substrat donneur (10) sur le substrat support (20).
- [Revendication 2] Procédé de fabrication selon la revendication précédente, dans lequel :
- le premier motif d'alignement (21) du substrat support (20) est un méplat ou une encoche aménagé(e) au niveau de sa tranche (20c), et
  - l'alignement optique lors de l'étape d'assemblage utilise ledit premier motif d'alignement (21).
- [Revendication 3] Procédé de fabrication selon l'une des revendications précédentes, dans lequel :
- le substrat support (20) est en carbure de silicium monocristallin,
  - l'étape de traitement thermique est appliquée également au substrat support (20) et provoque une réorganisation de surface sur au moins une des faces (20a,20b) dudit substrat, la réorganisation de surface donnant lieu à la formation de deuxièmes marches (23) d'amplitude nanométrique, parallèles à un deuxième axe principal (P2),



- un deuxième motif d'alignement (22) sur le substrat support (20) est formé par les deuxièmes marches (23) elles-mêmes, par au moins un motif défini par photolithographie et gravure sur la face avant (20a) du substrat support (20) à partir des deuxièmes marches (23), ou par au moins un motif défini par photolithographie et gravure sur la face arrière (20b) du substrat support (20) à partir des deuxièmes marches (23),  
 - l'alignement optique lors de l'étape d'assemblage utilise ledit deuxième motif d'alignement (22).

[Revendication 4] Procédé de fabrication selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la marque de repérage (12) est formée par les premières marches (13) elles-mêmes, par au moins une marque définie par photolithographie et gravure sur la face avant (10a) du substrat donneur (10) à partir des premières marches (13), ou par au moins une marque définie par photolithographie et gravure sur la face arrière (10b) du substrat donneur (10) à partir des premières marches (13).

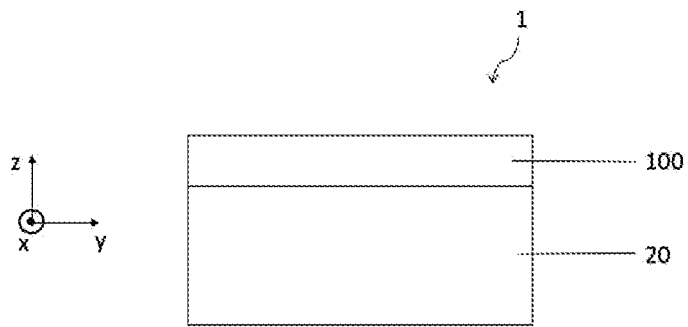
[Revendication 5] Procédé de fabrication selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'étape d'assemblage comprend un polissage mécano-chimique de la face avant (10a) du substrat donneur (10) et/ou de la face avant (20a) du substrat support (20), avant la mise en contact des deux substrats (10,20).

[Revendication 6] Procédé de fabrication selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'étape d'assemblage comprend le dépôt d'une couche intermédiaire sur la face avant (10a) du substrat donneur (10) et/ou sur la face avant (20a) du substrat support (20), préalablement à la mise en contact des deux substrats (10,20).

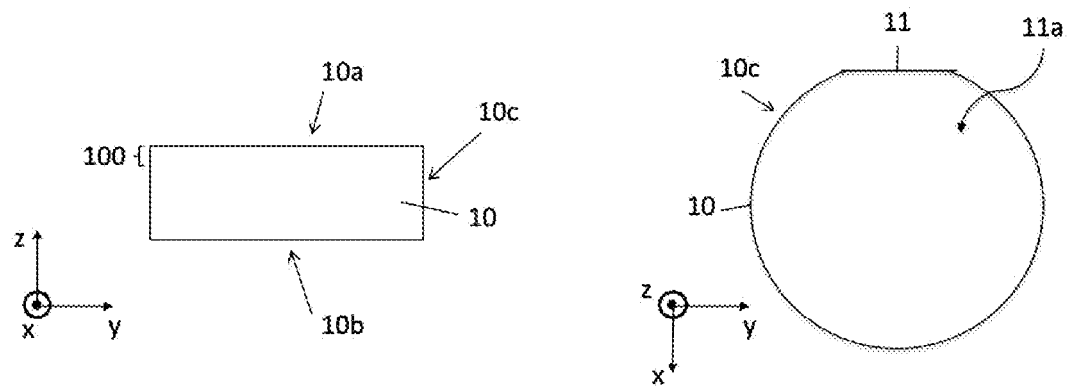
[Revendication 7] Procédé de fabrication selon l'une des revendications précédentes, comprenant :

- avant l'étape d'assemblage, une étape de formation d'un plan fragile enterré (15) dans le substrat donneur (10), délimitant la couche mince (100) entre ledit plan fragile enterré (15) et la face avant (10a) du substrat donneur (10),
- au cours de l'étape de transfert, une séparation le long du plan fragile enterré (15) pour former la structure composite (1) comprenant la couche mince (100) disposée sur le substrat support (20) d'une part, et le reste (10'') du substrat donneur d'autre part.

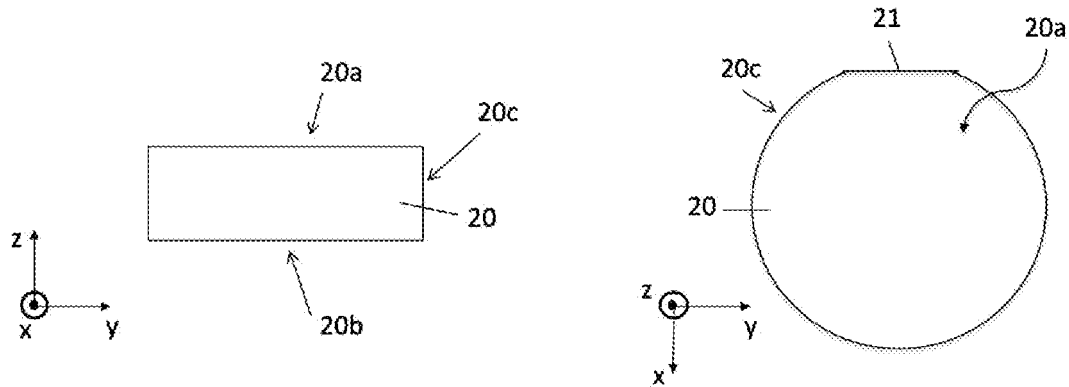
[Fig. 1]



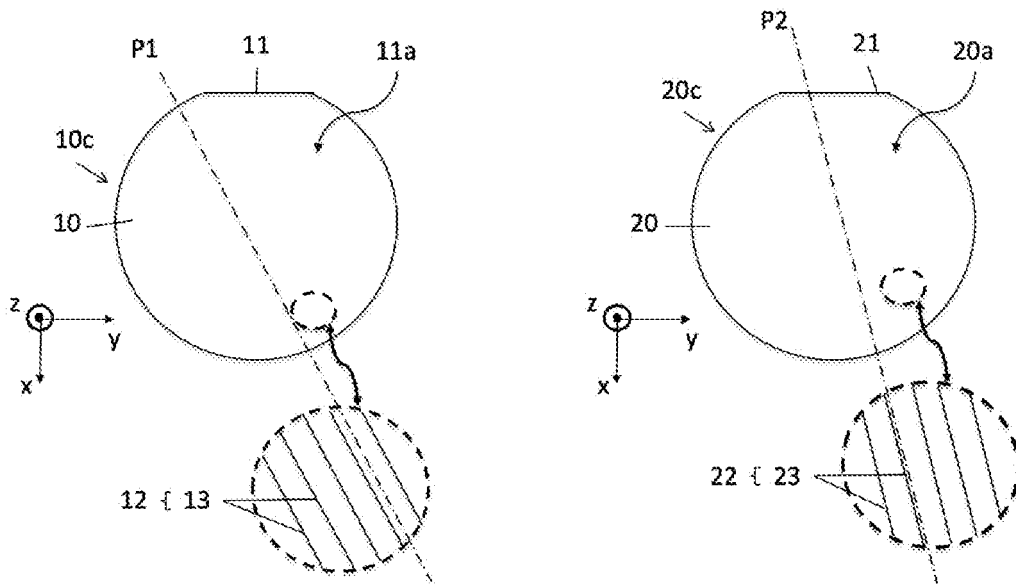
[Fig. 2a]



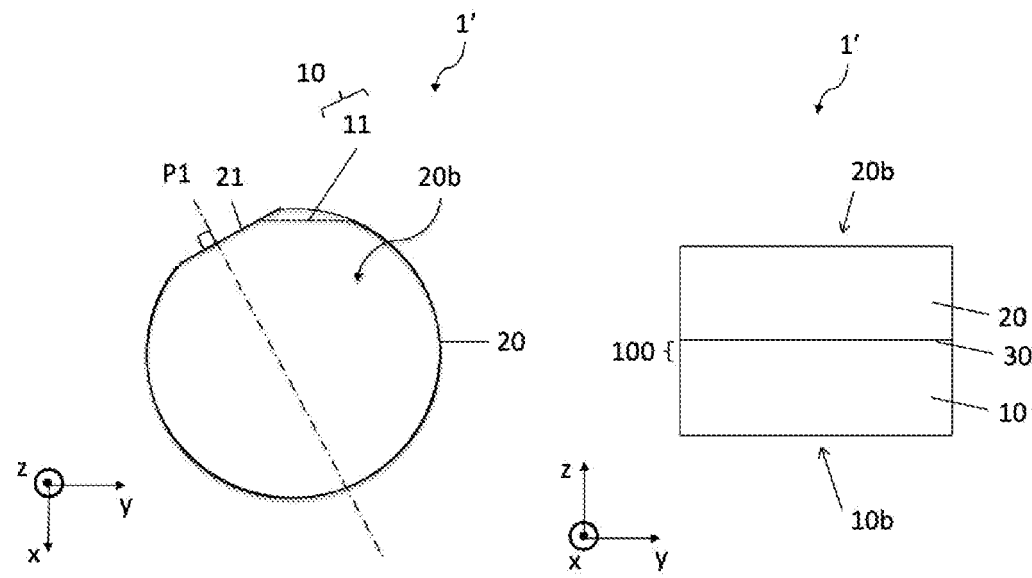
[Fig. 2b]



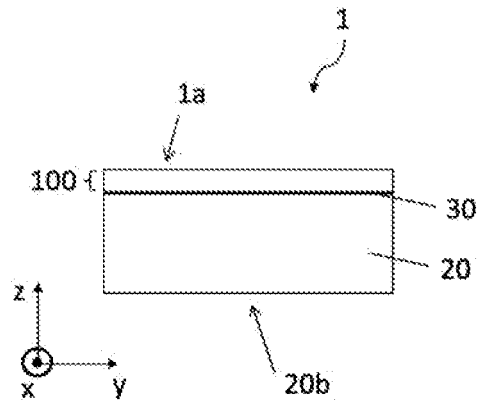
[Fig. 2c]



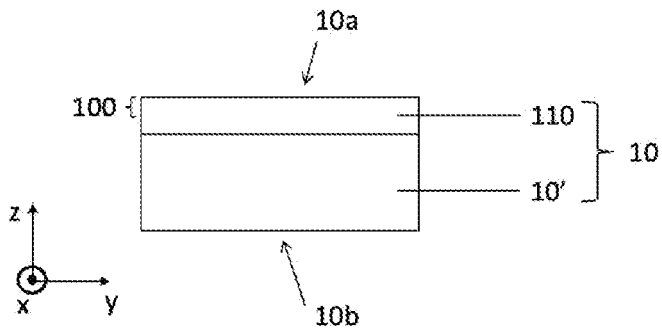
[Fig. 2d]



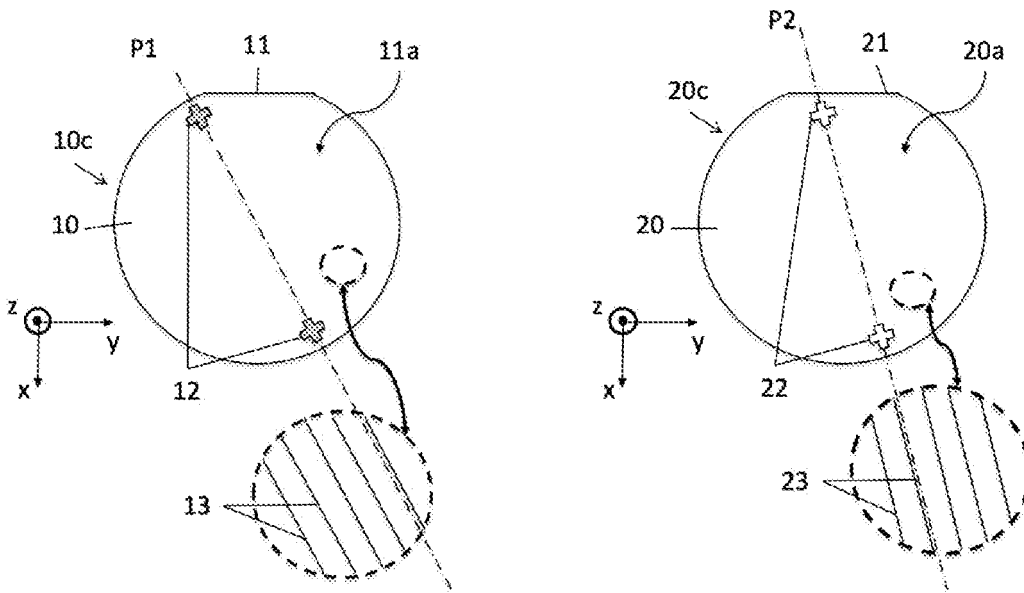
[Fig. 2e]



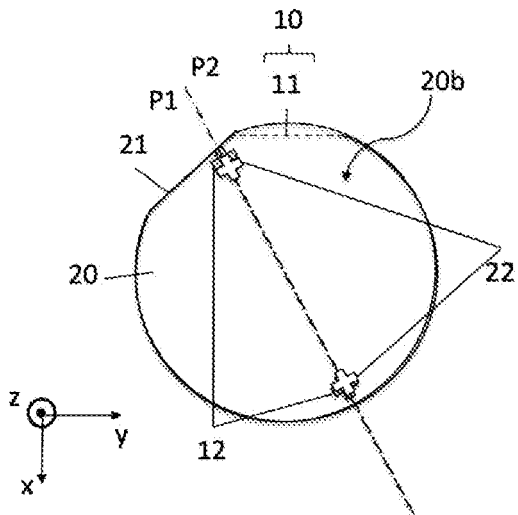
[Fig. 3]



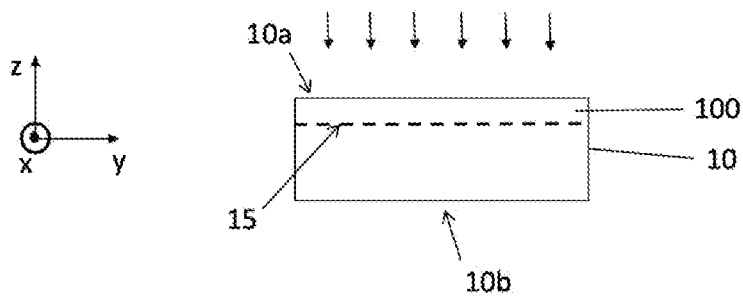
[Fig. 4]



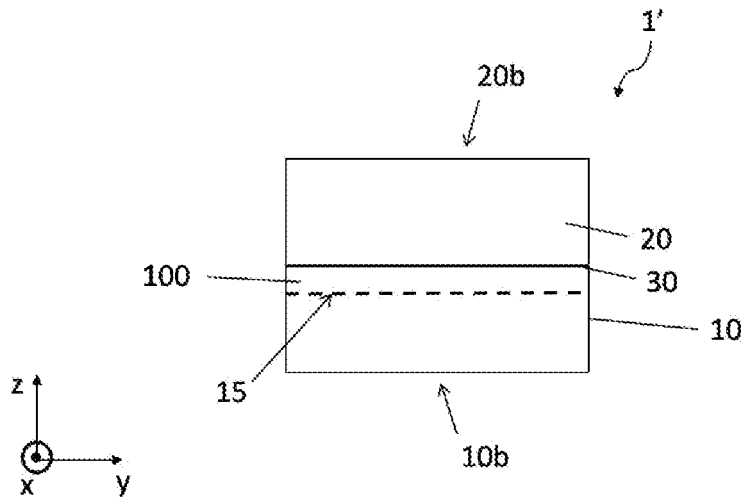
[Fig. 5]



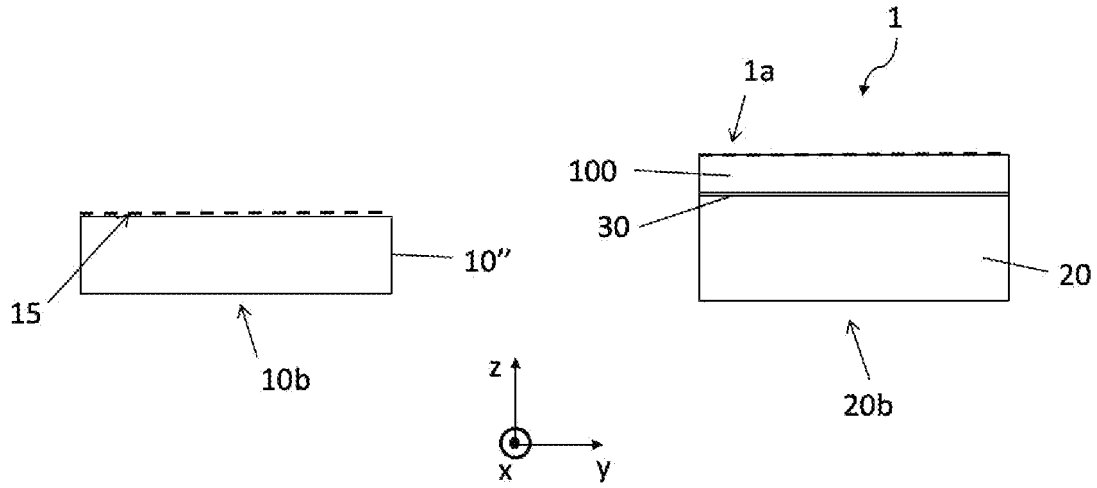
[Fig. 6a]



[Fig. 6b]



[Fig. 6c]



# 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**

NEANT

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

US 2002/123204 A1 (TORVIK JOHN TARJE [US])  
5 septembre 2002 (2002-09-05)

US 2004/151917 A1 (CHEN HAUR-YWH [TW] ET  
AL) 5 août 2004 (2004-08-05)

US 2018/323069 A1 (SCHINDLER KATRIN [DE])  
8 novembre 2018 (2018-11-08)

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

NEANT