

## PROCÉDE DE PREPARATION D'UNE COUCHE MINCE

## DOMAINE DE L'INVENTION

5 La présente invention concerne un procédé de préparation d'une couche mince reportée sur un substrat support par application de la technologie Smart Cut™.

## ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

10

Dans certains modes de mise en œuvre de la technologie Smart Cut™, on prépare une couche mince en introduisant des espèces légères à travers une face principale d'un substrat donneur pour former une zone fragilisée enterrée. On définit de la sorte la  
15 couche mince, dans ce substrat donneur, entre la zone fragilisée enterrée et la face principale du substrat. Puis, le substrat donneur est assemblé sur un second substrat, dit « receveur », et on applique à cet ensemble un traitement thermique de séparation, éventuellement assisté de sollicitations mécaniques,  
20 afin de provoquer l'initiation et la propagation d'une onde de fracture au niveau de la zone fragilisée enterrée pour libérer la couche mince qui se trouve ainsi reportée sur le substrat receveur.

25 Le traitement thermique de séparation a pour effet de favoriser la croissance et la mise sous pression de microcavités dont le développement est lié à la présence des espèces légères dans la zone fragilisée. Cet effet est à l'origine de l'initiation et de la propagation de l'onde de fracture conduisant à libérer la  
30 couche mince.

L'état de la surface exposée de la couche mince reportée sur le substrat receveur est irrégulier, ce qui n'est généralement pas entièrement satisfaisant. Un procédé mettant en œuvre la  
35 technologie Smart Cut prévoit donc généralement une étape complémentaire de finition visant à réduire ces irrégularités de surface. Il peut ainsi s'agir de traiter la surface exposée de la couche mince, au cours de cette étape de finition, par

polissage mécano-chimique ou par un recuit à haute température, typiquement de l'ordre de 1100°C, en l'exposant à une atmosphère réductrice ou neutre.

5 Le document FR3061988 propose un procédé de finition d'une couche mince préparée selon la technologie Smart Cut, comme cela vient d'être présenté. Dans ce document, on propose d'appliquer un traitement thermique d'amplitude modéré à la couche mince, inférieure à 950 degrés et dans une atmosphère réductrice ou  
10 neutre, directement après que celle-ci ait été libérée du substrat donneur. La surface libre de la couche mince n'ayant pas été exposée à l'atmosphère ambiante, elle ne s'est pas oxydée et les atomes qui la constituent sont très mobiles pour se réorganiser et lisser la surface. Ce traitement thermique se  
15 révèle donc particulièrement efficace, même à relativement basse température, pour lisser la surface libérée de la couche mince. Il est à noter que dans le procédé présenté dans FR3061988, les traitements de fracture et de lissage doivent être réalisés sans remise en contact avec l'atmosphère ambiante entre les deux  
20 étapes, c'est-à-dire dans le même équipement. Cela impose des contraintes drastiques en terme de capacités thermiques et de contrôle de la pureté de l'atmosphère de l'équipement

Le document FR2876307 prévoit un traitement thermique similaire,  
25 directement après que la couche mince ait été libérée du substrat donneur.

Le document EP2933828 indique que les irrégularités de surface ont pour origines plusieurs phénomènes de natures différentes et  
30 qui se combinent. Ces irrégularités peuvent correspondre aux empreintes des microcavités à l'origine de la fracture du substrat donneur. Elles contribuent à former une rugosité en surface de la couche mince dont l'amplitude et la longueur d'onde sont de l'ordre du nm ou de la dizaine de nm.

35 Les irrégularités peuvent également trouver leurs origines dans l'interaction entre la propagation de l'onde de fracture et des vibrations acoustiques rencontrées dans l'ensemble à fracturer

au moment de la fracture. Ces vibrations sont provoquées par la libération soudaine d'énergie lors de la fracture de la couche mince. L'onde de fracture est alors susceptible d'être déviée verticalement de son plan de progression selon l'état de

5 contrainte instantané du matériau qu'elle traverse. On pourra se référer à l'article « Crack Front Interaction with Self-Emitted Acoustic Waves », *Physical Review Letters*, American Physical Society, 2018, 121. (19), pp.195501, pour une analyse détaillée de ce mécanisme. Les irrégularités provoquées par ce phénomène

10 sont de dimensions relativement grandes, et constituent une non-uniformité d'épaisseur de la couche mince dont l'amplitude peut être de l'ordre du nanomètre et la longueur d'onde du millimètre, voire du centimètre.

15 Par ailleurs, et comme cela est documenté dans la publication de Massy et al. "Fracture dynamics in implanted silicon", *Applied Physics Letters* 107.9 (2015), la libération brutale d'énergie, les oscillations et les battements des deux substrats engendrés lors de la fracture peuvent également conduire à l'endommagement

20 des surfaces séparées. Cet endommagement peut notamment être provoqué par des chocs entre ces deux surfaces ou à leurs déplacements relatifs.

D'une manière plus générale, la manipulation du substrat support

25 portant la couche mince et du résidu du substrat donneur, après l'étape de fragilisation et après que ces deux parties soient séparées l'une de l'autre, peut également engendrer des endommagements, par exemple des rayures ou des particules, à la surface libérée de la couche mince.

30 Il est difficile d'éliminer les irrégularités de surface de la couche mince, autres que celles se présentant sous la forme de rugosité, à l'aide d'un simple traitement thermique. Les dimensions de ces irrégularités peuvent en effet excéder la

35 distance moyenne de mobilité, sous l'effet du traitement thermique, des atomes formant cette surface. C'est notamment le cas dans le procédé de lissage proposé par le document FR3061988 précité.

En conséquence, une couche mince préparée par un procédé de l'état de la technique peut présenter un état de surface imparfait, dont on n'a pu réduire toutes les irrégularités, ou  
5 endommagé.

La présente invention cherche à remédier au moins en partie aux limitations qui viennent d'être mentionnées de cet état de la technique.  
10

### BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

En vue de la réalisation de ce but, l'objet de l'invention  
15 propose un procédé de préparation d'une couche mince comprenant les étapes suivantes :

- une étape de fragilisation comprenant l'introduction d'espèces légères à travers une face principale d'un substrat donneur, l'étape visant à former une zone fragilisée dans une portion centrale du substrat donneur pour définir la couche mince avec la face principale du substrat donneur, la zone fragilisée ne s'étendant pas dans une portion périphérique du substrat donneur;  
20
- une étape d'assemblage de la face principale du substrat donneur avec un substrat receveur pour former un ensemble à fracturer, la portion centrale et la portion périphérique de la face principale du substrat donneur étant mises en contact avec une face du substrat receveur.  
25

30 Selon l'invention, le procédé comprend également :

- une étape de séparation de l'ensemble à fracturer, l'étape de séparation comprenant un traitement thermique conduisant à initier et propager une onde de fracture dans la zone fragilisée pour libérer la couche mince du substrat donneur au niveau de sa portion centrale uniquement, l'onde de fracture ne se propageant pas entièrement dans la portion périphérique de sorte que le substrat donneur et  
35

le substrat receveur restent solidaires l'un de l'autre au niveau de la portion périphérique du substrat donneur ;

- une étape de détachement, distinctes de l'étape de séparation et appliquée après cette étape, l'étape de détachement comprenant le traitement de l'ensemble à fracturer pour désassembler la portion périphérique du substrat donneur (2) du substrat receveur (5) et ainsi reporter la couche mince (1) sur le substrat receveur (5).

En localisant la zone fragilisée dans la portion centrale uniquement du substrat donneur, on peut procéder à la libération de la couche mince sans provoquer le détachement complet du substrat donneur et du substrat receveur, ce qui permet d'améliorer l'état de surface de cette couche mince.

Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- Le procédé comprend une étape de finition, cette étape comportant un traitement thermique visant à porter l'ensemble à fracturer à une température supérieure à la température du traitement thermique de l'étape de séparation afin de lisser la surface libérée de la couche mince ;

- l'étape de finition est appliquée entre l'étape de séparation (S4) et l'étape de détachement ;

- l'étape de finition met en œuvre un traitement thermique exposant le substrat donneur à une température inférieure à 1000°C, à 950°C, à 900°C, ou à 600°C ;

- l'étape de séparation et l'étape de finition sont conduites dans un même équipement ;

- l'étape de séparation et l'étape de finition sont conduites dans des équipements distincts ;

- l'étape de finition est appliquée après l'étape de détachement ;
- 5      - le substrat donneur est une plaquette de forme circulaire et la portion périphérique est une portion annulaire, dont la largeur prise du bord du substrat est comprise entre 1mm et 5cm ;
- 10     - le substrat donneur comprend un chanfrein périphérique du côté de sa face principale, et la portion périphérique s'étend du chanfrein sur une largeur comprise entre 1mm et 5cm ;
- 15     - les espèces légères sont choisies dans la liste formée de l'hydrogène et de l'hélium ;
- le substrat donneur est en silicium monocristallin ;
- 20     - l'étape de séparation met en œuvre un traitement thermique exposant le substrat donneur à une température comprise entre 250°C et 500°C ;
- l'étape de détachement est réalisée par gravure chimique ou
- 25     par application d'un effort de désassemblage du substrat support et du substrat donneur.

#### BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

30      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 lesquels :

35      [Fig. 1]

La figure 1 représente les étapes d'un procédé conforme à l'invention ;

[Fig. 2]

La figure 2 représente la portion centrale et la portion périphérique d'un substrat donneur.

5

## DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

En référence à la figure 1, on présente maintenant un procédé de  
10 préparation d'une couche mince 1 conforme à la présente description.

Ce procédé comprend la fourniture, au cours d'une étape préliminaire S1, d'un substrat donneur 2, ce substrat présentant  
15 une face principale 2a. Le substrat donneur 2 peut être constitué d'une plaquette de silicium monocristallin, notamment dans le cas où le procédé de préparation de la couche mince vise à fabriquer un substrat de silicium sur isolant. Cette plaquette peut avoir subi des traitements préalables, tels qu'une  
20 oxydation, la formation d'une couche de surface par épitaxie ou par dépôt ou toute autre étape de préparation de surface.

L'invention n'est toutefois nullement limitée à un substrat donneur 2 constitué d'une plaquette de silicium, et celui-ci  
25 pourra être choisi librement dans sa nature et dans sa forme selon l'application visée. Il peut ainsi s'agir d'un substrat comprenant n'importe quel matériau semi-conducteur monocristallin, par exemple du carbure de silicium ou du germanium. Il peut également s'agir d'un matériau isolant comme  
30 un matériau piézoélectrique, tel que du tantalate de lithium ou du niobate de lithium. Le substrat donneur peut ainsi prendre la forme d'une plaquette circulaire, dont le diamètre peut être quelconque, de quelques dizaines de millimètres à 300mm ou 450mm ou plus. Il peut prendre une autre forme, carrée ou  
35 rectangulaire. Comme on l'a déjà précisé, le substrat donneur 2 peut avoir subi des étapes préalables, de polissage, de dépôt, d'oxydation, et donc être formé d'un empilement de couches hétérogènes.

Le substrat donneur 2 peut présenter un contour chanfreiné 2b comme cela est courant dans le domaine des plaquettes de matériaux semi-conducteurs afin d'éviter son ébréchage lors de sa manipulation. Le chanfrein 2b peut s'étendre sur plusieurs millimètres en périphérie du substrat.

Comme cela est représenté sur la figure 2, on distingue dans un substrat donneur 2 conforme à la présente description deux portions : une portion centrale 2c et une portion périphérique 2p. Ces portions 2c, 2p s'étendent d'une face à l'autre du substrat et se projettent sur la face principale 2a du substrat selon une forme quelconque, dans la mesure où la portion périphérique 2p entoure entièrement la portion centrale 2c. La portion centrale 2c peut ainsi se projeter, comme cela est représenté sur la figure 2, sur la face principale 2a d'un substrat donneur 2 (ici sous la forme d'une plaquette circulaire) pour former un disque, centré sur cette face, et la portion périphérique 2p, former une surface annulaire, concentrique au disque définissant la portion centrale 2c, et s'étendant jusqu'au bord du substrat 2. La portion centrale 2c et la portion périphérique 2p sont destinées à être mises en contact avec un substrat receveur, de sorte à assembler les deux substrats l'un à l'autre. Lorsque le substrat donneur 2 présente un chanfrein 2b, la portion périphérique 2p s'étend donc radialement du bord du substrat vers son centre, au-delà de ce chanfrein, afin de permettre cette mise en contact.

A titre d'exemple, la portion périphérique 2p du substrat donneur 2 peut présenter une largeur comprise entre 1mm et plusieurs centimètres, par exemple 5 cm, prise du bord du chanfrein quand ce chanfrein existe, ou du bord du substrat dans le cas contraire. Ainsi, dans le cas de l'exemple représenté sur la figure 2, dans lequel le substrat donneur 2 est une plaquette circulaire présentant un chanfrein de 1mm de largeur environ sur son extrême bord, la portion périphérique 2p est définie comme une portion annulaire, dont la largeur prise du bord intérieur du chanfrein est comprise entre 1mm et 5cm, de sorte que cette

zone périphérique puisse entrer en contact avec un substrat receveur présentant au moins la même dimension. La portion disposée à l'intérieur de la portion annulaire forme la portion centrale 2c du substrat donneur 2.

5

Poursuivant la description de la figure 1, un procédé conforme à la présente description comprend une étape de fragilisation S2 comprenant l'introduction d'espèces légères à travers une face principale 2a d'un substrat donneur 2. Cette étape vise à former une zone fragilisée 3 et enterrée dans le substrat donneur 2. La zone fragilisée 3 s'étend dans un plan du substrat donneur 2 essentiellement parallèle à la face principale 2a de ce substrat 2. La zone fragilisée 3 définit, avec la face principale 2a du substrat donneur 2, une partie au moins de la couche mince 1 que l'on vise à préparer. Comme cela est bien connu en soi, les espèces légères sont typiquement choisies dans la liste formée de l'hydrogène et de l'hélium, sans que cela ne soit limitatif. Ces espèces légères sont généralement introduites dans le substrat donneur 2 par implantation ionique, bien que d'autres méthodes d'introduction soient également possibles (par plasma, par diffusion). Dans le cas d'une implantation, l'énergie d'implantation définit la profondeur de pénétration des ions dans le matériau du substrat donneur 2, et donc la profondeur du plan enterré dans lequel se situe la zone fragilisée 3.

25

Lorsque l'introduction est réalisée par implantation ionique, on peut prévoir que cette introduction soit réalisée en une seule étape, par exemple pour implanter une unique dose d'hydrogène ou une unique dose d'hélium, ou en une pluralité d'étapes successives, par exemple pour implanter une dose d'hydrogène puis une autre dose d'hélium. Quelles que soient la nature et la manière avec laquelle les espèces sont introduites dans le substrat donneur, on désignera par « dose » la quantité totale d'espèces introduites dans une unité de surface du substrat donneur, par exemple le nombre d'espèces légères implantées par  $\text{cm}^2$ .

35

Dans le cadre de la présente description, l'étape de fragilisation S2 est conduite pour que, à l'issue de cette étape, la zone fragilisée 3 soit localisée dans la portion centrale 2c du substrat donneur 2 et qu'elle ne s'étende pas dans la portion périphérique 2p. Comme cela sera rendu apparent dans la suite de cette description, en localisant la zone fragilisée dans la portion centrale 2p uniquement, on pourra procéder à la libération de la couche mince, sans provoquer le détachement complet du substrat donneur et du substrat receveur avec lequel le substrat donneur sera assemblé, ce qui permet d'améliorer l'état de surface de cette couche mince.

Plusieurs approches sont possibles pour localiser la zone fragilisée 3 dans la portion centrale 2c uniquement. Ainsi, et selon une première approche, l'étape de fragilisation S2 est conduite en différenciant la dose introduite dans la portion centrale 2c de celle introduite dans la portion périphérique 2p. On pourra à ce propos se référer à la demande FR3063176.

L'étape de fragilisation S2 peut ainsi comprendre l'introduction d'une première dose d'espèces légères dans la portion centrale 2c du substrat donneur 2 et l'introduction d'une seconde dose d'espèces légères, inférieure à la première dose, dans la portion périphérique 2p de ce substrat 2.

La première dose d'espèces légères est choisie pour que celle-ci soit suffisante, lors d'une étape ultérieure de séparation S4, pour libérer la couche mince 1 du substrat donneur 1 au niveau de la zone fragilisée disposée dans la portion centrale 2c. Cette dose conduit donc à former la zone fragilisée 3 dans la zone centrale 2c. La seconde dose d'espèces légère introduite dans la portion périphérique 2p est quant à elle choisi pour qu'elle ne permette pas ce détachement dans la portion périphérique 2p. Cette dose ne conduit donc pas à former une zone fragilisée au sens de la présente description. Pour être tout à fait clair, la portion périphérique 2p du substrat donneur 2 peut comprendre des espèces légères, implantées ou introduites de toute autre manière, mais ces espèces ne sont pas présentes

dans une concentration suffisante dans cette portion 2p pour former une zone de fragilisation au sens de la présente demande, et elle ne peut notamment pas provoquer la séparation du substrat donneur 2 au niveau de cette portion 2p.

5

A titre d'exemple, et selon un mode de mise en œuvre préféré qui est celui représenté sur la figure 1, la seconde dose d'espèces légères peut être nulle, et dans ce cas les espèces légères sont introduites uniquement dans la portion centrale 2c du substrat donneur 2 et pas dans la portion périphérique 2p.

Pour réaliser cela, on peut masquer la portion périphérique 2p à l'aide d'un matériau-écran faisant barrière à la pénétration des espèces légères, lorsque l'introduction de ces espèces est réalisée par implantation ionique. Ce masque peut être fait de téflon, d'aluminium ou de carbone. Il peut aussi être formé d'un masque sacrificiel 4 fait de résine, d'oxyde dur ou de nitrure disposé au niveau de la portion périphérique 2p de la face principale 2a du substrat donneur 2 au moins, étant entendu que ce masque sera retiré à l'issue de cette étape de fragilisation S2.

Lorsque l'étape de fragilisation S2 prévoit plusieurs phases successives d'implantations ioniques, comme c'est le cas d'une co-implantation d'hydrogène et d'hélium, le masque peut être présent pendant certaines seulement des phases d'implantation.

Selon une variante de cette première approche, l'introduction des espèces légères dans le substrat donneur 2 peut être réalisée par le balayage d'un faisceau comprenant de telles espèces légères sur la face principale 2a du substrat donneur 2. Dans un tel mode de mise en œuvre de l'étape de fragilisation S2, le mouvement du faisceau peut être commandé de telle sorte que la portion périphérique 2p du substrat donneur 2 soit exclue de toute implantation ou qu'une dose plus faible d'espèces soit introduite dans cette portion 2p que d'espèces introduites dans la portion centrale 2c. On peut donc dans cette variante se passer d'un masque, ce qui est avantageux.

La nature des espèces et les doses exactes de ces espèces introduites dans la portion centrale 2c et dans la portion périphérique 2p sont choisies selon la nature du substrat donneur et selon les caractéristiques de l'étape ultérieure de séparation S4.

A titre d'exemple, lorsque le substrat donneur 2 est en silicium monocristallin, et que l'étape de séparation met en œuvre un traitement thermique exposant le substrat donneur 2 à une température comprise entre 250°C et 500°C, les conditions suivantes sont envisageables :

#### Hydrogène seul

Portion centrale : entre 4E16 et 1E17 at/cm<sup>2</sup>  
Portion périphérique : entre 0 et 3E16 at/cm<sup>2</sup>

#### Hydrogène et Hélium

Portion centrale : H : entre 0.5E16 et 2E16 at/cm<sup>2</sup>; He entre 0.5E16 et 2E16 at/cm<sup>2</sup>.  
Portion périphérique : H : entre 0 et 1E16 at/cm<sup>2</sup>; He entre 0.5E16 et 2E16 at/cm<sup>2</sup>.

Selon une approche alternative, l'étape de fragilisation S2 peut comprendre l'introduction, au cours d'une première sous-étape, d'une même dose d'espèces légères dans la portion centrale 2c du substrat donneur 2 et dans la portion périphérique 2p de ce substrat 2. Cette dose conventionnelle, par exemple de l'ordre de 5E16 at/cm<sup>2</sup> d'hydrogène lorsque le substrat donneur 2 est en silicium, est suffisante pour former une zone fragilisée 3 s'étendant dans la zone centrale 2c et dans la zone périphérique 2p. Dans une seconde sous-étape, on traite la portion périphérique 2p du substrat donneur 2 pour rendre inopérantes les espèces légères introduites dans la portion périphérique 2p. Il peut s'agir de traiter cette portion périphérique, par exemple à l'aide d'un laser, pour faire diffuser les espèces légères introduites préalablement dans cette zone, et effectivement éliminer la zone fragilisée 3 de cette portion périphérique 2p.

Alternativement, on peut traiter la portion périphérique pour endommager la zone fragilisée disposée dans cette portion, par exemple par implantation d'espèces relativement lourdes, telles que des espèces de silicium. A l'issue du traitement opéré pendant cette deuxième sous-étape, la zone fragilisée 3 est bien localisée uniquement dans la zone centrale 2c du substrat donneur 2, et elle ne s'étend plus à la zone périphérique 2p.

Quelle que soit la manière avec laquelle cette étape de fragilisation S2 a été mise en œuvre, on dispose à l'issue de celle-ci d'un substrat donneur 2 comprenant une zone fragilisée 3 enterrée localisée dans une portion centrale 2c du substrat donneur 2, la zone fragilisée 3 définissant avec la face principale 2a du substrat donneur 2 la couche mince 1, et la zone fragilisée 3 ne s'étendant pas dans la portion périphérique 2p.

Dans une étape suivante d'assemblage S3 d'un procédé conforme à la présente description, le substrat donneur ainsi préparé est assemblé à un substrat receveur 5 en mettant en contact la face principale 2a du substrat donneur 2 avec une face du substrat receveur 5. Le substrat receveur 5 peut être de toute nature et de toute forme qui convient dans la mesure où il présente une face de dimension suffisante pour être mise en contact avec la portion centrale 2c et une partie au moins de la portion périphérique 2p du substrat donneur 2.

Cet assemblage peut être réalisé par toute méthode, par exemple par adhésion moléculaire, par application sur l'une au moins des faces à assembler d'une matière adhésive, par collage eutectique lorsque les faces à assembler ont été préalablement préparées pour présenter une surface métallique. L'étape d'assemblage S3 peut également prévoir de conditionner les faces des deux substrats, par nettoyage, activation ou toute autre étape de préparation, pour faciliter cet assemblage et solidariser les deux substrats l'un à l'autre avec une énergie d'adhésion suffisante.

Alternativement, l'assemblage peut consister en la formation progressive du substrat receveur 5 par dépôt, à température modérée, du matériau constitutif dudit substrat 5 sur la face principale 2a du substrat donneur 2.

5

On désignera dans la suite de cette description par « ensemble à fracturer » l'assemblage formé du substrat donneur 2 et du substrat receveur 5 à l'issue de cette étape S3.

- 10 Dans une étape suivante d'un procédé conforme à la présente description, l'ensemble à fracturer est traité thermiquement au cours d'une étape de séparation S4. Le traitement thermique engendre le développement de microcavités, la coalescence de ces microcavités lorsque celles-ci sont suffisamment nombreuses et
- 15 leur mise sous pression par les espèces légères disponibles, comme cela est conventionnel dans la mise en œuvre de la technologie Smart Cut. Comme cela a été évoqué antérieurement, la zone fragilisée 3 enterrée ne s'étend toutefois pas sur toute l'étendue du substrat donneur 2. Le traitement thermique conduit
- 20 donc à libérer la couche mince 1 du substrat donneur 2 au niveau de sa zone centrale 2c uniquement, mais pas au niveau de la zone périphérique 2p.

- Le traitement thermique de l'étape de séparation S4, typiquement
- 25 compris entre 200°C et 500°C lorsque le substrat donneur 2 est en silicium, peut être appliqué en disposant l'ensemble à fracturer dans un four conventionnel pendant une durée qui peut être comprise entre plusieurs minutes et plusieurs heures. Pratiquement, et par souci de productivité, on dispose
- 30 généralement un grand nombre d'ensembles à fracturer dans une nacelle, et cette nacelle est placée dans un four ou dans une étuve de grande capacité pour appliquer collectivement le traitement thermique aux ensembles à fracturer, à la température et pour la durée choisie.

35

L'onde de fracture qui s'initie au cours de cette étape de séparation S4, ne se propage pas d'un bout à l'autre du substrat donneur 2, et on ne libère pas brutalement le résidu du substrat

donneur (c'est-à-dire le substrat donneur dont on a prélevé la couche mince) du substrat receveur, comme c'est le cas des étapes de séparation de l'état de la technique. L'onde de fracture ne se propage notamment pas entièrement dans la portion

5 périphérique 2p du substrat donneur 2, qui reste donc solidement assemblé au substrat receveur 5 au niveau de cette portion 2p. Dans le cadre du procédé décrit par la figure 1, le substrat receveur 5 et le substrat donneur 2 restent donc assemblés l'un à l'autre à l'issue de l'étape de séparation S4, bien que la

10 couche mince 1 ait été effectivement libérée. Dans le procédé de la présente description, on limite donc la génération d'ondes acoustiques, les oscillations et les battements de ces substrats. Les interactions néfastes entre l'onde de fracture et les ondes acoustiques sont réduites ou éliminées, et on évite

15 également les chocs ou les glissements des substrats qui conduisent, dans les procédés de l'état de la technique, à créer des irrégularités ou des endommagements à la surface de la couche mince qu'il est difficile de réduire par l'application d'un simple traitement thermique.

20

On note que la caractéristique du procédé selon laquelle l'onde de fracture ne se propage pas entièrement dans la portion périphérique 2p du substrat donneur 2 (et donc que le substrat support et le substrat receveur restent assemblés l'un à l'autre)

25 est parfaitement vérifiable, car dans ce cas, il n'est pas possible de retirer le résidu du substrat donneur du substrat receveur, c'est à dire de les écarter l'un de l'autre. Ce caractère parfaitement vérifiable de cette caractéristique permet à la personne du métier, à l'aide d'expérimentations peu

30 nombreuses et très simples à réaliser et en complément des exemples fournis dans la présente description, de déterminer les paramètres des étapes du procédé, notamment l'étendue de la zone périphérique, les doses d'espèces légères à introduire respectivement dans zone centrale et dans la zone périphérique,

35 l'intensité du traitement thermique de l'étape S4 de séparation...

L'espace 6 compris entre les surfaces libérées de la couche mince 1 et du substrat donneur 2 est rempli des espèces légères à l'origine de la libération de la couche mince 1. Ces espèces sont confinées dans cet espace 6 clos et étanche, car la fracture ne s'est pas propagée dans la portion périphérique 2p du substrat donneur 2, qui reste donc solidement assemblé au substrat receveur 5. Cet espace 6 clos et étanche est donc également isolé de l'atmosphère environnante par la portion périphérique 2p du substrat donneur 2. On évite ainsi que des contaminants extérieurs, par exemple de l'oxygène, pénètrent dans cet espace 6 et passive la surface libérée de la couche mince 1, ce qui rendrait son lissage plus difficile à provoquer. On note à ce propos que les espèces légères introduites au cours de l'étape de fragilisation S2 qui permettent la fracture du substrat donneur 2 (typiquement de l'hydrogène ou de l'hélium) sont extrêmement pures, elles n'interagissent pas avec les atomes formant la surface de la couche mince libérée pour la passiver et pour limiter la mobilité de surface des atomes ce qui en fait une atmosphère particulièrement adaptée à un lissage thermique.

Pour tirer profit de cet état très particulier de l'ensemble à fracturer à la suite de l'étape de séparation S4, un mode préféré de mise en œuvre d'un procédé conforme à la présente description prévoit d'appliquer, au cours d'une étape de finition S5, un traitement thermique visant à porter l'ensemble à fracturer à une température supérieure à la température du traitement thermique de l'étape de séparation S4, afin de lisser la surface libérée de la couche mince 1.

Dans ce mode de mise en œuvre préféré, le traitement thermique expose l'ensemble à fracturer à une température plateau supérieure à la température, comprise entre 200°C et 500°C lorsque le substrat donneur est en silicium, de l'étape de séparation S4. Avantagusement, ce traitement thermique reste modéré, inférieur à 1000°C, ou 950°C, voire même inférieur à 900°C ou 600°C. Il peut s'étendre sur une durée comprise entre quelques secondes à la température plateau choisie, et plusieurs heures à cette température plateau.

Ce traitement thermique de l'étape de finition S5 conduit à porter l'ensemble à fracturer à la température de traitement, y compris les espèces légères confinées dans l'espace 6 clos  
5 délimité par les surfaces libérées de la couche mince 1 et du substrat donneur 2. Ces surfaces non contaminées par des espèces réactives provenant de l'atmosphère extérieure par exemple sont composées d'atomes que la mise en température rend très mobiles, ce qui permet de lisser lesdites surfaces, notamment la surface  
10 libre de la couche mince 1, de manière très efficace, même à une basse température, inférieure à ou égale à 1000°C ou à 950°C. On note que ce traitement de l'ensemble à fracturer peut être mis en œuvre dans un équipement dont l'atmosphère peut être quelconque, puisque ce n'est pas cette atmosphère qui contribue  
15 au lissage de la surface de la couche mince 10. Cet équipement, par exemple une étuve, ne vise qu'à porter en température l'ensemble à fracturer.

Des expériences menées par la demanderesse ont ainsi montré qu'il  
20 était possible d'obtenir, après un traitement thermique de l'étape de finition S5 consistant à exposer l'ensemble à fracturer pendant 2 minutes à 950°C, une couche mince 1 de silicium présentant une surface dont la rugosité était de l'ordre de 1.6 nm RMS. En l'absence de toute étape de finition, et donc  
25 de tout traitement thermique supérieur en température à la température atteinte au cours de l'étape de séparation S4, la rugosité de la couche mince a été mesurée à 5,5 nm RMS. On voit bien l'efficacité de l'étape de finition qui vient d'être décrite.

30 L'étape de finition S5 peut être conduite dans le même équipement que celui utilisé pour l'étape de séparation S4, par exemple le même four ou la même étuve. Mais contrairement à la solution de l'état de la technique exposée en introduction de cette demande,  
35 il est également possible de procéder à l'étape de finition S5 dans un autre équipement, distinct de l'équipement utilisé pour conduire l'étape de séparation S4. Les deux substrats formant l'ensemble à fracturer sont en effet encore solidaires l'un de

l'autre, et le risque d'endommager la couche mince 1 au cours de la manipulation de cet ensemble pour le stocker ou le déplacer dans un autre équipement est réduit. Par ailleurs, la surface libre de la couche mince 1 étant entièrement confinée, elle ne  
5 peut être exposée à l'atmosphère ambiante au cours de ce changement d'équipement. Elle ne s'oxyde ou ne se passive donc pas, et on conserve tout son potentiel de lissage, même à basse température, en menant l'étape de finition dans un autre environnement que celui exploité lors de l'étape de séparation.  
10 Et comme on l'a déjà mentionné, l'équipement dans lequel est conduit l'étape de finition S5 dans ce mode de mise en œuvre peut être choisi très librement.

Dans une étape suivante, on applique à l'ensemble à fracturer  
15 une étape de détachement S6 visant à détacher le substrat donneur 2 (ou plus précisément le résidu de ce substrat donneur 2, après que l'on y ait prélevé la couche mince 1) du substrat receveur 5 et ainsi finaliser le report de la couche mince 1 sur le substrat receveur 5. On note que cette étape de détachement S6  
20 est bien distincte de l'étape de séparation S4. Une caractéristique très avantageuse du procédé de la présente description est en effet de bien distinguer la propagation de l'onde de fracture qui est provoquée au cours de l'étape de séparation S4 et qui conduit à libérer la couche mince 1, de  
25 cette étape de détachement S5 conduisant à entièrement désassembler le substrat donneur du substrat receveur. Dans une étape conventionnelle de fracture de l'état de la technique, la propagation de l'onde de fracture se propage entièrement dans le plan du substrat donneur, détachant au cours de cette unique  
30 étape le substrat donneur du substrat receveur.

Le traitement mis en œuvre pour obtenir le détachement au cours de l'étape S6 peut être varié : il peut s'agir de graver chimiquement, par exemple par voie humide, le contour de  
35 l'ensemble à fracturer, pour désassembler les deux substrats au niveau de leur interface d'assemblage. Pour cela, on peut positionner l'ensemble à fracturer verticalement pour faire tremper une portion de son contour dans une solution de KOH ou

de TMAH (lorsque le substrat donneur est en silicium) ou dans une solution comprenant du HF lorsqu'une couche d'oxyde de silicium est disposée à l'interface entre le substrat donneur 2 et le substrat receveur 5. En entraînant en rotation l'ensemble, on traite successivement tout ce contour pour désassembler les deux substrats l'un de l'autre. Alternativement, et comme cela est schématisé sur la figure 1, ce traitement peut comprendre l'application d'une lame au niveau de l'interface d'assemblage, et son introduction entre les deux substrats pour provoquer le désassemblage de l'ensemble. Plus généralement, il peut s'agir d'appliquer tout moyen ou tout effort conduisant au désassemblage du substrat support 5 et du substrat donneur 2 au niveau de leurs faces en contact.

15 Dans tous les cas, cette étape de détachement S6 peut être parfaitement maîtrisée, contrairement à l'étape de fracture d'un procédé de l'état de la technique, si bien que l'on peut minimiser les risques d'endommagement de la couche mince 1.

20 Selon un autre mode de mise en œuvre, l'étape de finition n'est pas conduite directement après l'étape de séparation S4, entre cette étape S4 et l'étape de détachement S6, mais après l'étape de détachement S6.

25 L'étape de finition S5 de ce mode de mise en œuvre peut être une étape de finition conventionnelle, par exemple exposant la surface libérée de la couche mince 1, lorsque celle-ci est en silicium, à une atmosphère réductrice ou neutre à une température comprise entre 950 ou 1000°C et 1100°C. Plus généralement, on portera la surface exposée de la couche mince à une atmosphère neutre ou réductrice portée à une température supérieure à la température du traitement thermique de l'étape de séparation.

30

35 On tire profit, dans ce mode de mise en œuvre, de l'absence ou de la faible présence d'irrégularités de grandes dimensions ou d'endommagements à la surface de la couche mince 1. La rugosité que cette couche mince 1 présente peut être lissée avec

efficacité par l'intermédiaire du traitement thermique qui vient d'être décrit.

A l'issue de ces traitements, quel que soit le mode de mise en œuvre choisi, et comme cela est représenté par l'étape finale S7 de la figure 1, on dispose de la couche mince 1 reportée sur le substrat support 5. La couche mince 1 présente un état de surface amélioré par rapport à une couche mince 1 obtenue directement après fracture par un procédé de l'état de la technique. Elle présente notamment une rugosité relativement faible, grâce à l'effet lissant de l'étape de finition S5. Elle présente également peu ou pas de non-uniformité lié aux interactions de l'onde de fracture avec des ondes acoustique se propageant dans le substrat receveur 5 et dans le substrat donneur 2 lorsqu'ils sont entièrement détachés l'un de l'autre par la propagation de l'onde de fracture. On limite également l'endommagement de la couche mince 1 dont l'origine est les chocs entre les deux substrats ou leur glissement relatif, l'un sur l'autre.

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

On peut notamment prévoir d'autres étapes en complément de celles qui ont été décrites. Il peut en particulier s'agir d'appliquer des traitements complémentaires de finition à la couche mince, par exemple une étape d'oxydation sacrificielle, un polissage pour parfaire les qualités de cette couche ou ajuster son épaisseur.

On peut également combiner les deux modes de mise en œuvre présentés, et conduire l'étape de finition S5 au cours d'une première phase, entre l'étape de séparation S4 et l'étape de détachement S6 par l'intermédiaire d'un premier traitement thermique, et compléter ce traitement par une seconde phase, par exemple un second traitement thermique, appliqué à la couche mince 1 après l'étape de détachement S6.