

DESCRIPTION

TITRE : PROCEDE DE TRANSFERT D'UNE COUCHE UTILE SUR UN SUBSTRAT SUPPORT

DOMAINE DE L'INVENTION

La présente invention concerne le domaine de la microélectronique. Elle concerne en particulier un procédé de transfert d'une couche utile sur un substrat support.

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

On connaît de l'état de la technique un procédé de transfert d'une couche utile 3 sur un substrat support 4, représenté sur la figure 1 ; ce procédé décrit notamment dans les documents WO2005043615 et WO2005043616 comprend les étapes suivantes :

- la formation d'un plan fragile enterré 2 par implantation d'espèces légères dans un substrat donneur 1 de manière à former une couche utile 3 entre ce plan et une surface du substrat donneur ;
- puis, l'assemblage du substrat donneur 1 sur un substrat support 4 pour former une structure collée 5 ;
- l'application d'un traitement thermique à la structure collée 5 pour fragiliser le plan fragile enterré ;
- et enfin, l'initiation d'une onde de fracture par une impulsion d'énergie appliquée au niveau du plan fragile enterré 2 et la propagation auto-entretenu de l'onde de fracture dans le substrat donneur 1, le long dudit plan fragile enterré 2.

Dans ce procédé, les espèces implantées au niveau du plan fragile enterré 2 sont à l'origine du développement de microcavités. Le

traitement thermique de fragilisation a pour effet de favoriser la croissance et la mise sous pression de ces microcavités. Par l'intermédiaire d'efforts extérieurs additionnels (impulsion d'énergie), appliqués après le traitement thermique, l'initiation d'une onde de fracture dans le plan fragile enterré 2 est opérée, laquelle onde se propage de manière auto-entretenue, menant au transfert de la couche utile 3 par détachement au niveau du plan fragile enterré 2. Un tel procédé, permet notamment de diminuer la rugosité de surface après transfert.

Ce procédé peut être utilisé pour la fabrication de substrats de silicium sur isolant (SOI - « Silicon on insulator »). Dans ce cas, le substrat donneur 1 et le substrat support 4 sont chacun formés d'une plaquette de silicium dont le diamètre normalisé est typiquement de 200mm, 300mm, voire même 450 mm pour les prochaines générations. L'un et/ou l'autre du substrat donneur 1 et du substrat support 4 sont oxydés en surface.

Les substrats SOI doivent respecter des spécifications très précises. C'est particulièrement le cas pour l'épaisseur moyenne et l'uniformité d'épaisseur de la couche utile 3. Le respect de ces spécifications est requis pour le bon fonctionnement des dispositifs semi-conducteurs qui seront formés dans et sur cette couche utile 3.

Dans certains cas, l'architecture de ces dispositifs semi-conducteurs nécessite de disposer de substrats SOI présentant une épaisseur moyenne de la couche utile 3 très faible, par exemple inférieure à 50 nm, et présentant une très bonne uniformité d'épaisseur de la couche utile 3. L'uniformité d'épaisseur attendue peut être de l'ordre de 5% au maximum, correspondant à des variations allant typiquement de +/- 0,3nm à +/- 1nm sur toute la surface de la couche utile 3. Même si des étapes complémentaires de finition, comme des gravures ou des traitements thermiques de lissage de surface, sont réalisées

après que la couche utile 3 soit transférée sur le substrat support 4, il est important que les propriétés morphologiques de surface (en particulier, uniformité d'épaisseur et rugosité de surface) soient les plus favorables possibles après transfert, pour garantir la tenue des spécifications finales.

La demanderesse a observé que, lorsque l'initiation de l'onde de fracture est réalisée après le traitement thermique, à température ambiante, par une impulsion d'énergie appliquée au plan fragile enterré 2, certaines couches utiles 3 peuvent comporter, après transfert, des motifs irréguliers de type marbrure se traduisant par des variations locales d'épaisseur dont l'amplitude est de l'ordre du nm ou du demi-nanomètre. Ces marbrures peuvent être réparties sur la totalité de la couche utile 3, ou sur une partie seulement. Elles contribuent à la non-uniformité de la couche utile 3.

Ce type de non-uniformité d'épaisseur de la couche utile 3 est très difficile à éliminer par les techniques usuelles de finition (gravure, oxydation sacrificielle, traitement thermique de lissage) car ces dernières ne sont pas efficaces pour gommer des motifs irréguliers de cette amplitude.

Pour limiter l'amplitude de motifs périodiques de variation d'épaisseur de la couche mince après fracture, le document EP2933828 propose de mettre en contact avec l'ensemble à fracturer, un élément absorbant pour dissiper les vibrations acoustiques émises lors de l'initiation et la propagation auto-entretenue de l'onde de fracture.

OBJET DE L'INVENTION

La présente invention concerne un procédé de transfert d'une couche utile sur un substrat support. Le procédé propose une

solution alternative à celles de l'état de la technique, visant notamment à améliorer l'uniformité d'épaisseur des couches utiles après transfert.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

L'invention concerne un procédé de transfert d'une couche utile sur un substrat support, comprenant les étapes suivantes :

- a) la fourniture d'un substrat donneur comportant un plan fragile enterré, la couche utile étant délimitée par une face avant du substrat donneur et le plan fragile enterré ;
- b) la fourniture d'un substrat support ;
- c) l'assemblage, selon une interface de collage, du substrat donneur, au niveau de sa face avant, et du substrat support, pour former une structure collée ;
- d) le recuit de la structure collée pour lui appliquer un budget thermique de fragilisation et amener le plan fragile enterré jusqu'à un niveau de fragilisation défini ;
- e) l'initiation d'une onde de fracture dans le plan fragile enterré par application d'une contrainte à la structure collée, l'onde de fracture se propageant de manière auto-entretenue le long du plan fragile enterré pour mener au transfert de la couche utile sur le substrat support.

Le procédé de transfert est remarquable en ce que l'initiation de l'onde de fracture est opérée alors que la structure collée subit, au moins dans sa région la plus chaude, une température maximale comprise entre 150° et 250°C.

Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de l'invention, prises seules ou selon toutes combinaisons techniquement réalisables :

- la température maximale est comprise entre 180°C et 220°C ;
- le recuit de l'étape d) atteint une température de palier maximale comprise entre 300°C et 600°C ;
- le budget thermique de fragilisation est compris entre 40% et 95% d'un budget thermique de fracture, le budget thermique de fracture menant à une initiation spontanée de l'onde de fracture dans le plan fragile enterré au cours du recuit ;
- l'initiation de l'étape e) est opérée directement après le recuit de l'étape d), avant que la région la plus chaude de la structure collée ne subisse une température inférieure à 150°C ;
- le recuit de l'étape d) est effectué dans un équipement de traitement thermique de configuration horizontale ou verticale, adapté pour le traitement collectif d'une pluralité de structures collées, et l'initiation de l'étape e) est opérée lors de la sortie des structures collées de l'équipement ;
- l'application d'une contrainte au plan fragile enterré correspond à l'application d'une sollicitation mécanique locale sur la structure collée, en particulier sur la périphérie de ladite structure ;
- la sollicitation mécanique locale est réalisée par insertion d'un biseau, en vis-à-vis de l'interface de collage de la structure collée, entre des bords

chanfreinés respectivement du substrat donneur et du substrat support de ladite structure collée ;

- la sollicitation mécanique locale est exercée dans une région de la structure collée subissant des températures moindres lorsqu'un gradient de températures existe sur la structure collée lors de l'étape e) ;
- la sollicitation mécanique locale est exercée sur la structure collée lorsque le gradient de température est de l'ordre de 80°C ;
- le substrat donneur et le substrat support sont en silicium monocristallin, et dans lequel le plan fragile enterré est formé par implantation ionique d'espèces légères dans le substrat donneur, lesdites espèces légères étant choisies parmi l'hydrogène et l'hélium ou une combinaison d'hydrogène et d'hélium.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

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 :

La figure 1 présente un procédé de transfert d'une couche mince selon l'état de la technique ;

La figure 2 présente un procédé de transfert conforme à l'invention ;

Les figures 3a à 3c présentent des cartographies de « haze » en surface de couches utiles comportant des non-uniformités d'épaisseur après transfert ;

La figure 4 présente une cartographie de « haze » en surface d'une couche utile transférée par un procédé de transfert conforme à l'invention ;

La figure 5 présente une étape d'un procédé de transfert conforme à l'invention ;

La figure 6 présente un graphe montrant les températures et le gradient thermique vus par une structure collée dans une étape d'un procédé de transfert conforme à l'invention ;

La figure 7 présente une étape d'un procédé de transfert conforme à l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

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 nécessairement respectées sur les figures. Notons que le repère (x,y,z) de la figure 1 s'applique à la figure 2.

L'invention concerne un procédé de transfert d'une couche utile 3 sur un substrat support 4. La couche utile 3 est ainsi nommée car elle est destinée à être utilisée pour la fabrication de

composants dans les domaines de la microélectronique ou des microsystèmes. La couche utile et le substrat support peuvent être de natures variées selon le type de composant et l'application visés. Le silicium étant le matériau semi-conducteur le plus utilisé actuellement, la couche utile et le substrat support peuvent en particulier être en silicium monocristallin mais ne sont bien-sûr pas limités à ce matériau.

Le procédé de transfert selon l'invention comprend tout d'abord une étape a) de fourniture d'un substrat donneur 1, duquel sera issu la couche utile 3. Le substrat donneur 1 comporte un plan fragile enterré 2 (figure 2 - a)). Ce dernier est avantageusement formé par implantation ionique d'espèces légères dans le substrat donneur 1, à une profondeur définie. Les espèces légères sont préférentiellement choisies parmi l'hydrogène et l'hélium, ou une combinaison d'hydrogène et d'hélium, car ces espèces sont favorables à la formation de microcavités autour de la profondeur définie d'implantation, donnant lieu au plan fragile enterré 2. La couche utile 3 est délimitée par une face avant 1a du substrat donneur 1 et le plan fragile enterré 2.

Le substrat donneur 1 peut être formé par au moins un matériau choisi parmi le silicium, le germanium, le carbure de silicium, les semi-conducteurs composés IV-IV, III-V ou II-VI, les matériaux piézoélectriques (par exemple, LiNbO₃, LiTaO₃,...), etc. Il peut en outre comporter une ou plusieurs couche(s) superficielle(s) disposée(s) sur sa face avant 1a et/ou sur sa face arrière 1b, de toutes natures, par exemple diélectrique(s).

Le procédé de transfert comprend également une étape b) de fourniture d'un substrat support 4 (figure 2 - b)).

Le substrat support peut par exemple être formé par au moins un matériau choisi parmi le silicium, le carbure de silicium, le verre, le saphir, le nitrure d'aluminium, ou tout autre matériau susceptible d'être disponible sous forme de substrat. Il peut

également comporter une ou plusieurs couche(s) superficielle(s) de toutes natures, par exemple diélectrique(s).

Comme énoncé précédemment, une application intéressante du procédé de transfert selon l'invention est la fabrication de substrats SOI. Dans ce cas particulier, le substrat donneur 1 et le substrat support 4 sont en silicium monocristallin, et l'un et/ou l'autre desdits substrats comporte une couche superficielle d'oxyde de silicium 6 sur sa face avant.

Le procédé de transfert comprend ensuite une étape c) d'assemblage, selon une interface de collage 7, du substrat donneur 1, au niveau de sa face avant 1a, et du substrat support 4, pour former une structure collée 5 (figure 2 - c)).

L'assemblage peut être réalisé par toute méthode connue, notamment par collage direct par adhésion moléculaire, ou par thermocompression, ou encore par collage électrostatique. Ces techniques bien connues de l'état de la technique ne seront pas décrites en détail ici. On rappelle néanmoins que, préalablement à l'assemblage, les substrats donneur 1 et support 4 auront subi des séquences de nettoyages et/ou d'activation de surface, de manière à garantir la qualité de l'interface de collage 7 en termes de défektivité et d'énergie de collage.

Dans le procédé de transfert selon l'invention, une étape d) de recuit de la structure collée 5 est alors effectuée, pour appliquer à ladite structure 5 un budget thermique de fragilisation et amener le plan fragile enterré jusqu'à un niveau de fragilisation défini (figure 2 - d)). Les couples temps / température appliqués au cours du recuit déterminent le budget thermique subi par la structure collée 5.

La gamme de températures dans laquelle le recuit peut être opéré pour cette fragilisation du plan enterré 2 dépend

essentiellement du type de structure collée 5 (homo-structure ou hétéro-structure) et de la nature du substrat donneur 1.

A titre d'exemple, dans le cas d'un substrat donneur 1 et d'un substrat support 4 en silicium, le recuit de l'étape d) atteint une température de palier maximale typiquement comprise entre 200°C et 600°C, avantageusement entre 300 et 500°C, et encore plus avantageusement entre 350°C et 450°C.

La température de palier maximale pourra plus généralement, pour des matériaux utilisés pour le substrat donneur 1 et/ou pour le substrat support 4 autres que le silicium, être comprise typiquement entre 200°C et 800°C.

Le recuit peut comporter une rampe de montée en température (typiquement entre 200°C et la température de palier maximale) et un palier à la température maximale. En général, un tel recuit va avoir une durée comprise entre quelques dizaines de minutes et plusieurs heures, en fonction de la température de palier maximale du recuit.

Le niveau de fragilisation du plan fragile enterré 2 est défini par la surface occupée par les microcavités présentes dans le plan fragile enterré 2. Dans le cas d'un substrat donneur 1 en silicium, la caractérisation de cette surface occupée par les microcavités peut s'effectuer par microscopie infrarouge.

Le niveau de fragilisation peut augmenter depuis un niveau faible (<1%, sous le seuil de détection des instruments de caractérisation) jusqu'à plus de 80%, en fonction du budget thermique appliqué à la structure collée 5 au cours du recuit.

Le budget thermique de fragilisation est toujours maintenu en-deçà d'un budget thermique de fracture, pour lequel on obtient l'initiation spontanée de l'onde de fracture dans le plan fragile enterré 2, au cours du recuit. Préférentiellement, le budget thermique de fragilisation est compris entre 40% et 95% du budget thermique de fracture.

Dans le procédé de transfert selon l'invention, une étape e) d'initiation d'une onde de fracture le long du plan fragile enterré 2 est ensuite opérée, par application d'une contrainte au plan fragile enterré 2 de la structure collée 5 (figure 2 - e)). Après initiation, l'onde de fracture se propage de manière auto-entretenu, menant à la séparation de la structure collée 5 au niveau du plan fragile enterré 2. Une propagation auto-entretenu traduit le fait qu'une fois initiée, l'onde de fracture se propage par elle-même, sans application de contrainte extérieure et sur toute l'étendue du plan fragile enterré 2, de manière à détacher complètement la couche utile 3 du substrat donneur 1 et à la transférer sur le substrat support 4. On obtient ainsi un ensemble transféré 5a et le reste 5b du substrat donneur 1 (figure 2 - f)).

La contrainte extérieure est avantageusement locale et peut être d'origine mécanique ou de toute autre origine comme par exemple un chauffage localisé réalisé par un laser ou un apport d'énergie par ultrason.

On rappelle que, en appliquant le procédé de transfert de l'état de la technique énoncé en introduction en référence à la figure 1, consistant en l'initiation mécanique de l'onde de fracture à température ambiante, la demanderesse a observé des motifs irréguliers de type marbrure dégradant l'uniformité d'épaisseur de la couche utile 3 après transfert. La demanderesse a identifié que ces motifs irréguliers étaient liés à une instabilité de la propagation de l'onde de fracture du fait d'une trop faible énergie emmagasinée dans le système [structure collée 5 / plan fragile enterré 2].

Pour pallier ces problèmes et améliorer l'uniformité d'épaisseur de la couche utile 3 après transfert, le procédé de transfert selon la présente invention prévoit que l'initiation de l'onde de fracture à l'étape e) est opérée par application d'une

contrainte extérieure au plan fragile enterré 2 alors que la structure collée 5 subit, au moins dans sa région la plus chaude (ou typiquement, en son point le plus chaud), une température maximale comprise entre 150° et 250°C. Dans la pratique, il existe souvent un gradient de température sur la structure collée 5, l'invention prévoit donc que la région de la structure collée 5 subissant les plus hautes températures (sa région la plus chaude) voit une température comprise entre 150°C et 250°C. En d'autres termes, l'initiation de la fracture est opérée lorsque la température maximale que subit la structure collée 5, localement dans sa région la plus chaude ou uniformément sur toute son étendue, est comprise dans cette gamme de température. Avantageusement, la température maximale précitée est comprise entre 180°C et 220°C, préférentiellement autour de 200°C.

Pour une initiation de l'onde de fracture faite lorsque au moins la région la plus chaude de la structure collée 5 est à une température supérieure à 150°C, l'énergie emmagasinée dans le système, et notamment l'énergie emmagasinée dans le plan fragile enterré 2 du fait de la présence d'espèces gazeuses sous pression dans les microcavités, est suffisante pour garantir une propagation auto-entretenu et stable de l'onde de fracture.

Opérer l'initiation alors que la structure collée 5 subit une température maximale inférieure à 250°C limite l'énergie emmagasinée dans le système, de sorte que l'excès d'énergie relâchée lors de la fracture (c'est-à-dire l'énergie qui n'a pas été consommée pour rompre la matière) ne conduise pas à la formation d'autres types de motifs à la surface de la couche utile 3 transférée. En effet, la demanderesse a observé que lorsque l'excès d'énergie relâchée lors de la fracture est trop important, des motifs réguliers de grande amplitude peuvent apparaître et dégrader l'uniformité d'épaisseur de la couche utile 3 après transfert. Cela peut être par exemple le cas, lorsque le budget de fracture est appliqué à une structure collée

5 et qu'une onde de fracture s'initie spontanément à la température de palier du recuit (par exemple 400°C). Trop d'énergie emmagasinée et relâchée lors de la propagation de l'onde de fracture est donc également problématique vis-à-vis de l'uniformité d'épaisseur de la couche utile 3 après transfert. L'énergie emmagasinée dans le système dépend d'une part du niveau de fragilisation du plan fragile enterré 2 et d'autre part de la température à laquelle l'onde de fracture est initiée et va se propager. Le procédé de transfert selon l'invention permet d'initier l'onde de fracture lorsque l'énergie emmagasinée dans le système est, d'une part, suffisante pour garantir une propagation auto-entretenu et stable (limitant ainsi l'apparition de motifs irréguliers), et d'autre part, peu excédentaire pour limiter l'amplitude de motifs réguliers dégradant également l'uniformité d'épaisseur.

A titre d'exemple, les figures 3a, 3b et 3c présentent des cartographies de « haze » en surface de couches utiles 3 après une fracture, respectivement spontanée, mécanique initiée à température ambiante et mécanique initiée avec une température maximale subie par la structure collée de 100°C. Notons que l'initiation des fractures mécaniques précitées a été faite par sollicitation mécanique locale exercée sur les structures collées 5 et générant une contrainte dans le plan fragile enterré 2. On remarque, dans chacun des cas, des motifs réguliers (figure 3a) ou irréguliers (figures 3b et 3c) de type marbrures qui dégradent l'uniformité d'épaisseur de la couche utile 3 après transfert (entre 0,5 et 1,5nm d'amplitude). Ces motifs ont été rendus apparents par la mesure de bruit de fond diffus (« haze » selon la terminologie anglo-saxonne communément employée) correspondant à l'intensité de la lumière diffusée par la surface de la couche utile 3, à l'aide de l'outil d'inspection Surfscan™ de la société KLA-Tencor.

La figure 4 présente une cartographie de « haze » en surface d'une couche utile 3 transférée par un procédé de transfert conforme à l'invention : c'est-à-dire après une fracture initiée alors que la structure collée 5 subit, au moins dans sa région la plus chaude, une température de 200°C, par une sollicitation mécanique locale exercée sur la structure collée 5 générant une contrainte dans le plan fragile enterré 2. Aucun motif, ni régulier, ni irrégulier de type marbrure n'est présent, l'uniformité d'épaisseur de la couche utile 3 est ainsi fortement améliorée.

Selon une première variante avantageuse, l'initiation de l'étape e) est opérée directement après le recuit de l'étape d), avant que la région la plus chaude de la structure collée 5 ne subisse une température inférieure à 150°C. Par exemple, lorsque le recuit de l'étape d) présente une rampe de montée en températures jusqu'à 400°C, puis une rampe de descente en températures, l'initiation est opérée lorsque la structure collée 5 (au moins au niveau de sa région la plus chaude) subit une température maximale inférieure ou égale à 250°C et avant qu'elle ne subisse une température maximale de 150°C.

En pratique, on pourra notamment prévoir l'étape e) d'initiation de l'onde de fracture lorsque la structure collée 5 sort de l'équipement de traitement thermique 20 utilisé pour le recuit, dans une zone de sortie contrôlée 23 dans laquelle la structure collée 5 subit une température maximale supérieure à 150°C et inférieure ou égale à 250°C (figure 2 - e)). En particulier, le recuit de l'étape d) peut être effectué dans un équipement de traitement thermique 20 de configuration horizontale ou verticale, adapté pour le traitement collectif d'une pluralité de structures collées 5 ; l'initiation de l'étape e) est alors opérée lorsque les structures collées 5 sortent de l'équipement 20, dans la zone de sortie 23 où la température maximale subie par les structures 5 est contrôlée dans la gamme requise pour

l'initiation de l'onde de fracture. La contrainte extérieure pour déclencher l'initiation de l'onde de fracture est avantageusement appliquée aux structures collées 5 successivement, au fur et à mesure de leur passage dans la zone de sortie contrôlée 23.

Selon une deuxième variante, l'initiation de l'étape e) est opérée après que la région la plus chaude de la structure collée 5 ait subi une température inférieure à 150°C. Dans ce cas, la structure collée 5 est maintenue en atmosphère contrôlée entre la fin du recuit de l'étape d) et le moment de l'initiation de l'onde de fracture qui nécessitera que la structure collée 5 soit ramenée à une température maximale comprise entre 150°C et 250°C. Par atmosphère contrôlée, on entend ici une atmosphère sèche présentant moins de 0,1% d'humidité. Par exemple, lorsque le recuit de l'étape d) présente une rampe de montée en températures jusqu'à 400°C, puis une rampe de descente en températures jusqu'à 150°C avant un retour à température ambiante de la structure collée 5, cette dernière est maintenue en atmosphère sèche jusqu'à l'étape e) d'initiation de l'onde de fracture.

De manière avantageuse, pour l'une ou l'autre des variantes énoncées, l'application d'une contrainte au plan fragile enterré 2 correspond à l'application d'une sollicitation mécanique locale sur la structure collée 5, en particulier sur la périphérie de ladite structure, de façon à amorcer l'onde de fracture. A titre d'exemple, la sollicitation mécanique locale peut être réalisée par insertion d'un biseau 10, en vis-à-vis de l'interface de collage 7 de la structure collée 5, entre des bords chanfreinés respectivement du substrat donneur 1 et du substrat support 4 de ladite structure collée 5. Cela a pour

effet de générer une contrainte en tension dans le plan fragile enterré 2.

Préférentiellement, la sollicitation mécanique locale est exercée dans une région de la structure collée 5 subissant des températures moindres, lorsqu'un gradient de températures existe sur la structure collée 5 lors de l'étape e). Ladite région est appelée par la suite région froide, par opposition à la région la plus chaude de la structure collée 5 énoncée précédemment. Reprenant par exemple le cas de la première variante précitée, lorsqu'une ou plusieurs structure(s) collée(s) 5 sort(ent) de l'équipement de traitement thermique 20 dans lequel a été effectué le recuit, un gradient thermique existe en général sur chaque structure collée 5 (figures 5 et 6). Ce gradient est en général dû à la géométrie du four et à la présence d'un système de maintien des structures collées 5, qui influencent la dissipation thermique. Par exemple, dans le cas d'un four de configuration horizontale 20, dans lequel les structures collées 5 sont placées verticalement dans des nacelles 22, lesquelles sont supportées par une pelle de chargement 21, on observe que la région inférieure B des structures collées 5 (c'est-à-dire la plus proche de la pelle de chargement 21) est plus froide que la région supérieure H des structures collées 5. La sollicitation mécanique locale est alors préférentiellement exercée dans la région inférieure B de la structure collée 5.

De manière encore avantageuse, la sollicitation mécanique locale est exercée sur la structure collée 5 lorsque le gradient de température est de l'ordre de 80°C, soit 80°C +/-15°C. Le figure 6 présente le gradient de température mesuré sur une structure collée 5, après sa sortie du four, en région supérieure H, centrale C et inférieure B.

La demanderesse a observé qu'un gradient de température de 80°C +/-10°C subi par la structure collée 5 au moment de l'initiation

de l'onde de fracture participait à améliorer l'uniformité d'épaisseur de la couche utile 3 après transfert.

Exemple d'application :

Le procédé de transfert selon l'invention peut être utilisé pour la fabrication de substrats SOI dont la couche utile 3 est très mince, en particulier comprise entre quelques nanomètres et 50nm.

Prenons l'exemple de substrats donneur 1 et support 4 en silicium monocristallin, se présentant chacun sous forme de plaquette de 300mm de diamètre. Le substrat donneur est recouvert d'une couche d'oxyde de silicium 6 de 50nm d'épaisseur. Le plan fragile enterré 2 est formé dans le substrat donneur 1 par co-implantation d'ions d'hydrogène et d'hélium dans les conditions suivantes :

- H : énergie d'implantation 38 keV, dose $1E16$ H/cm²,
- He : énergie d'implantation 25 keV, dose $1E16$ He/cm².

Le plan fragile enterré 2 se situe à une profondeur d'environ 290 nm, à partir de la surface 1a du substrat donneur 1. Il délimite, avec la couche d'oxyde 6, une couche utile 3 d'environ 240 nm.

L'assemblage du substrat donneur 1 et du substrat support 4 est fait par collage direct par adhésion moléculaire, pour former la structure collée 5. Préalablement à l'assemblage, les substrats donneur 1 et support 4 auront subi des séquences de nettoyages et/ou d'activation de surface connues, de manière à garantir la qualité de l'interface de collage 7 en termes de défektivité et d'énergie de collage.

Un four 20 de configuration horizontale est utilisé pour réaliser collectivement le recuit d'une pluralité de structures collées 5 telles que celle décrite ci-dessus. Ce type d'équipement de

traitement thermique 20 comprend une pelle de chargement 21 qui supporte des nacelles 22 dans lesquelles sont positionnées les structures collées 5 (figure 7). La pelle de chargement 21 se déplace entre une position rentrée, dans laquelle les structures collées 5 sont à l'intérieur du four 20 et une position sortie, dans laquelle elles sont à l'extérieur du four 20.

Un système de biseaux 10 peut être positionné sur chaque nacelle 22, en-dessous des structures collées 5. La pelle de chargement 21 se déplace en position rentrée pour la réalisation du recuit. Le recuit comprend une rampe de montée en température de 200°C à 380°C, un palier à 380°C de 2 min et une rampe de descente en température jusqu'à 225°C.

A l'issue du recuit, la pelle de chargement 21 se déplace vers sa position sortie.

Comme illustré sur la figure 6, à partir du moment où chaque structure collée 5 sort du four 20, la température qu'elle subit décroît. Chaque structure collée 5 va transiter dans une zone de sortie 23 dans laquelle elle verra une température maximale (dans sa région la plus chaude) comprise entre 150°C et 250°C. Dans cette zone de sortie 23, un dispositif d'appui 11 situé au-dessus des structures collées 5 va venir exercer une force d'appui successivement sur chaque structure collée 5, de sorte que le biseau 10 en-dessous de celle-ci s'insère, en vis-à-vis de l'interface de collage 7, entre les bords chanfreinés des substrats assemblés de la structure collée 5 (figure 7). L'insertion du biseau 10 génère une contrainte locale et en tension au niveau du plan fragile enterré 2 permettant d'initier l'onde de fracture dans chaque structure collée 5, successivement, au fur et à mesure de leur passage sous le dispositif d'appui 11.

Bien-sûr, des outils autres que l'ensemble formé par le système de biseaux 10 et le dispositif d'appui 11 pourraient être mis

en œuvre pour opérer l'initiation de l'onde de fracture dans les structures collées 5 conformément à la présente invention.

L'initiation de l'onde de fracture est ainsi opérée pour chaque structure collée 5 alors que cette dernière subit une température maximale comprise entre 150°C et 250°C, préférentiellement autour de 200°C. Sur l'exemple de la figure 6, la zone de sortie 23 dans laquelle l'initiation de l'onde de fracture est opérée, correspond à une zone dans laquelle chaque structure collée 5 subit, dans sa région la plus chaude (la région haute H) une température maximale de l'ordre de 200°C, sa région centrale C voyant une température intermédiaire de l'ordre de 180°C et sa région basse B voyant une température de l'ordre de 130°C. Le biseau 10 étant, dans l'exemple illustré sur la figure 7, placé en partie inférieure de chaque structure collée 5, l'initiation se fait en outre dans la région froide (région basse B : celle qui subit les températures les plus basses) de la structure collée 5.

Suite à la propagation auto-entretenu de l'onde de fracture, on obtient le substrat SOI après transfert (ensemble transféré 5a) et le reste 5b du substrat donneur 1. Une très bonne uniformité d'épaisseur des couches utiles 3 transférées est obtenue.

Des étapes de finition appliquées aux ensembles transférés 5a comprennent des nettoyages chimiques et au moins un traitement thermique de lissage à haute température. A l'issue de ces étapes, les substrats SOI comportent une couche utile 3 d'épaisseur 50nm, dont la non-uniformité d'épaisseur finale est de l'ordre de 0,45nm. Notons que comparativement, des substrats SOI dont la couche utile 3 comporte des motifs réguliers ou irréguliers après fracture, peuvent présenter des non-uniformités d'épaisseur finales supérieures ou égales à 0,7nm.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux 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 transfert d'une couche utile (3) sur un substrat support (4), comprenant les étapes suivantes :
 - a) la fourniture d'un substrat donneur (1) comportant un plan fragile enterré (2), la couche utile (3) étant délimitée par une face avant (1a) du substrat donneur (1) et le plan fragile enterré (2) ;
 - b) la fourniture d'un substrat support (4) ;
 - c) l'assemblage, selon une interface de collage (7), du substrat donneur (1), au niveau de sa face avant (1a), et du substrat support (4), pour former une structure collée (5) ;
 - d) le recuit de la structure collée (5) pour lui appliquer un budget thermique de fragilisation et amener le plan fragile enterré (2) jusqu'à un niveau de fragilisation défini ;
 - e) l'initiation d'une onde de fracture dans le plan fragile enterré (2) par application d'une contrainte à la structure collée (5), l'onde de fracture se propageant de manière auto-entretenu le long du plan fragile enterré (2) pour mener au transfert de la couche utile (3) sur le substrat support (4) ;

Le procédé de transfert étant caractérisé en ce que l'initiation de l'onde de fracture est opérée alors que la structure collée (5) subit, au moins dans sa région la plus chaude, une température maximale comprise entre 150° et 250°C.
2. Procédé de transfert selon la revendication précédente, dans lequel la température maximale est comprise entre 180°C et 220°C.

3. Procédé de transfert selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le recuit de l'étape d) atteint une température de palier maximale comprise entre 300°C et 600°C.
4. Procédé de transfert selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le budget thermique de fragilisation est compris entre 40% et 95% d'un budget thermique de fracture, le budget thermique de fracture menant à une initiation spontanée de l'onde de fracture dans le plan fragile enterré (2) au cours du recuit.
5. Procédé de transfert selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'initiation de l'étape e) est opérée directement après le recuit de l'étape d), avant que la région la plus chaude de la structure collée (5) ne subisse une température inférieure à 150°C.
6. Procédé de transfert selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le recuit de l'étape d) est effectué dans un équipement de traitement thermique (20) de configuration horizontale ou verticale, adapté pour le traitement collectif d'une pluralité de structures collées (5), et dans lequel l'initiation de l'étape e) est opérée lors de la sortie des structures collées (5) de l'équipement (20).
7. Procédé de transfert selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'application d'une contrainte au plan fragile enterré (2) correspond à l'application d'une sollicitation mécanique locale sur la structure collée (5), en particulier sur la périphérie de ladite structure (5).

8. Procédé de transfert selon la revendication précédente, dans lequel la sollicitation mécanique locale est réalisée par insertion d'un biseau (10), en vis-à-vis de l'interface de collage (7) de la structure collée (5), entre des bords chanfreinés respectivement du substrat donneur (1) et du substrat support (4) de ladite structure collée (5).
9. Procédé de transfert selon l'une des deux revendications précédentes, dans lequel la sollicitation mécanique locale est exercée dans une région de la structure collée (5) subissant des températures moindres lorsqu'un gradient de températures existe sur la structure collée (5) lors de l'étape e).
10. Procédé de transfert selon la revendication précédente, dans lequel la sollicitation mécanique locale est exercée sur la structure collée (5) lorsque le gradient de température est de l'ordre de 80°C.
11. Procédé de transfert selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le substrat donneur (1) et le substrat support (4) sont en silicium monocristallin, et dans lequel le plan fragile enterré (2) est formé par implantation ionique d'espèces légères dans le substrat donneur (1), lesdites espèces légères étant choisies parmi l'hydrogène et l'hélium ou une combinaison d'hydrogène et d'hélium.