

Description

Titre de l'invention : PROCEDE DE FABRICATION D'UNE STRUCTURE COMPRENANT UNE PLURALITE DE CAVITES ENTERREES

DOMAINE DE L'INVENTION

- [0001] La présente invention vise le domaine de la microélectronique et des microsystèmes électromécaniques. En particulier, la présente invention concerne un procédé de fabrication collective d'une pluralité de cavités enterrées au sein d'une structure comprenant un substrat support et une couche mince, les cavités étant confinées entre le substrat support et la couche mince.
- [0002] **ARRIÈRE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION**
- [0003] Les dispositifs MEMS (« Microelectromechanical systems » selon la terminologie anglo-saxonne) sont largement utilisés pour la fabrication de capteurs divers, visant une multitude d'applications : on peut citer par exemple, les capteurs de pression, les microphones, les interrupteurs radiofréquences, les transducteurs électro-acoustiques et ultrasonores (par exemple pMUT « Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer »), etc. Beaucoup de ces dispositifs MEMS sont basés sur une membrane flexible surplombant une cavité. En fonctionnement, le fléchissement de la membrane, lié à un paramètre physique (par exemple la propagation d'une onde acoustique pour un pMUT), est converti en un signal électrique (ou vice-versa selon que le dispositif est en mode récepteur ou émetteur).
- [0004] Il existe plusieurs procédés de transfert de couche permettant d'obtenir une structure comprenant une couche mince (qui formera la membrane susmentionnée) surplombant une pluralité de cavités. Ils sont avantageusement basés sur un assemblage par collage direct (c'est-à-dire sans ajout de matière adhésive) d'un substrat donneur et d'un substrat support, au niveau de leurs faces avant respectives. L'un ou l'autre des substrats comprend des cavités débouchant du côté de sa face avant, classiquement le substrat support. Ces cavités sont scellées lors de l'étape d'assemblage par adhésion moléculaire des deux substrats. Une étape d'amincissement du substrat donneur donne lieu au transfert d'une couche mince sur le substrat support. Cette étape d'amincissement peut notamment être basée sur le procédé Smart Cut™ lequel met en œuvre un plan fragile enterré, formé par implantation d'espèces légères dans le substrat donneur, qui délimite, avec une face avant du substrat donneur, la couche mince à transférer (typiquement d'épaisseur inférieure à 2µm). Comme cela est bien connu en soi, la croissance de microfissures dans le plan fragile enterré, par activation thermique et/ou mécanique, conduit à une séparation le long dudit plan qui donne lieu au transfert

de la couche mince sur le substrat support. Le reste du substrat donneur peut être réutilisé pour un transfert de couche ultérieur.

[0005] L'obtention d'un transfert de couche mince de haute qualité est néanmoins complexe, du fait de la présence des cavités, à l'aplomb desquelles il n'y a pas d'effet raidisseur. L'effet raidisseur est ici attribué à la présence de la face avant du substrat support en contact avec la couche mince.

[0006] Ainsi, la croissance des microfissures dans le plan fragile enterré peut générer, à l'aplomb des cavités, des cloques voire des exfoliations locales qui dégradent de façon irréversible la couche mince et correspondent à des défauts de transfert.

[0007] La qualité du transfert est d'autant plus difficile à assurer que la taille des cavités est importante. On vise typiquement des dimensions latérales de cavités de l'ordre de quelques microns à plusieurs dizaines de microns, et cela avec une épaisseur de couche mince demeurant inférieure à 2 μm .

[0008] OBJET DE L'INVENTION

[0009] La présente invention propose un procédé de fabrication collective d'une structure comprenant une pluralité de cavités enterrées, surplombées par une couche mince de haute qualité, c'est-à-dire présentant une très faible quantité de défauts de transfert. Elle est basée sur la formation d'un plan fragile enterré dit fonctionnel, dont les caractéristiques et propriétés sont différentes entre des premières zones et des deuxièmes zones, lesquelles bénéficient ou pas d'un effet raidisseur : l'objectif est de décorrélérer la maturation des microfissures dans ces deux zones, pour favoriser la qualité du transfert de couche.

[0010] BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

[0011] La présente invention concerne un procédé de fabrication d'une structure comprenant une pluralité de cavités confinées entre une couche mince et un substrat support, le procédé de fabrication comprenant les étapes suivantes :

[0012] a) la fourniture d'un substrat donneur et d'un substrat support, chacun des substrats présentant une face avant et une face arrière ;

[0013] b) l'implantation de premières espèces légères dans le substrat donneur, pour former un plan fragile enterré uniforme délimitant avec la face avant du substrat donneur, la couche mince à transférer ;

[0014] c) l'implantation localisée de deuxièmes espèces dans le substrat donneur de manière à introduire lesdites deuxièmes espèces dans le plan fragile enterré uniforme uniquement au niveau de deuxièmes zones, pour former un plan fragile enterré fonctionnel présentant :

[0015] - des premières zones comportant les premières espèces légères et non les deuxièmes espèces, et

[0016] - les deuxièmes zones, comportant les premières espèces légères et les deuxièmes

espèces ;

- [0017] d) la formation d'une pluralité de cavités débouchant au niveau d'une face avant du substrat donneur ou du substrat support ;
- [0018] e) l'assemblage par collage direct du substrat donneur sur le substrat support, au niveau de leurs faces avant respectives, pour former une structure collée dans laquelle les cavités se trouvent à l'aplomb soit des premières zones, soit des deuxièmes zones du plan fragile enterré fonctionnel ;
- [0019] f) l'application d'un traitement thermique à la structure collée pour provoquer la séparation spontanée le long du plan fragile enterré fonctionnel et former d'une part la structure et d'autre part le reste du substrat donneur.
- [0020] Selon des caractéristiques avantageuses de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison réalisable :
- l'implantation de l'étape c) est effectuée en présence d'un masque, disposé sur la face avant du substrat donneur, à l'aplomb des premières zones du plan fragile enterré fonctionnel ;
 - la formation des cavités à l'étape d) est réalisée par gravure locale de la face avant du substrat support, par exemple au moyen d'un masque disposé sur ladite face avant ;
 - après l'étape c), l'étape d) de formation des cavités comprend la gravure de la face avant du substrat donneur, à l'aplomb des deuxièmes zones, les premières zones étant protégées de la gravure par le masque ;
 - le procédé comprend, après l'étape d) et après retrait du masque, une étape c') d'implantation localisée de troisièmes espèces au niveau de la face avant du substrat donneur, les troisièmes espèces se trouvant ainsi implantées dans les premières zones du plan fragile enterré fonctionnel et dans un autre plan enterré situé à distance et sous les deuxièmes zones du plan fragile enterré fonctionnel ;
 - l'étape d) de formation des cavités est réalisée avant l'étape c), et comprend :
 - l'application d'un masque disposé sur la face avant du substrat donneur, à l'aplomb des deuxièmes zones du plan fragile enterré fonctionnel destiné à être formé à l'étape c) ultérieure, et
 - la gravure de la face avant du substrat donneur, à l'aplomb des premières zones, les deuxièmes zones étant protégées de la gravure par le masque ;
 - après l'étape d) et après retrait du masque de la face avant du substrat donneur, l'étape c) d'implantation est effectuée, les deuxièmes espèces se trouvant ainsi implantées dans les deuxièmes zones du plan fragile enterré fonctionnel et dans un autre plan enterré situé à distance et sous les premières

- zones du plan fragile enterré fonctionnel ;
- les deuxièmes zones du plan fragile enterré fonctionnel sont à l'aplomb des cavités, dans la structure collée, et les premières espèces légères sont des ions ou des atomes d'hydrogène, et les deuxièmes espèces sont des ions ou des atomes d'hélium ;
 - les premières zones du plan fragile enterré fonctionnel sont à l'aplomb des cavités dans la structure collée, les premières espèces légères sont des ions ou des atomes d'hydrogène, ou des ions ou des atomes d'hélium, ou encore des ions ou des atomes d'hydrogène et d'hélium, et les deuxièmes espèces sont des ions ou des atomes de silicium, susceptibles de ralentir la cinétique de croissance de microfissures dans les deuxièmes zones du plan fragile enterré fonctionnel, comparativement à la cinétique de croissance de microfissures dans les premières zones ;
 - l'étape e) d'assemblage implique au moins une couche intermédiaire disposée sur le substrat donneur et/ou sur le substrat support, ladite couche intermédiaire ayant été déposée après l'une des étapes a) à d).

Brève description des dessins

- [0021] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquelles :
- [0022] [Fig.1] La [Fig.1] présente deux structures élaborées selon le procédé de fabrication conforme à la présente invention ;
- [0023] [Fig.2a]
- [0024] [Fig.2b]
- [0025] [Fig.2c]
- [0026] [Fig.2d]
- [0027] [Fig.2e]
- [0028] [Fig.2f]
- [0029] Les figures 2a à 2f présentent des étapes du procédé de fabrication selon un premier mode de réalisation de la présente invention ;
- [0030] [Fig.3a]
- [0031] [Fig.3b]
- [0032] [Fig.3c]
- [0033] [Fig.3d]
- [0034] [Fig.3e]
- [0035] [Fig.3f]
- [0036] Les figures 3a à 3f présentent des étapes du procédé de fabrication selon un deuxième mode de réalisation de la présente invention ;

- [0037] [Fig.4a]
[0038] [Fig.4b]
[0039] [Fig.4d]
[0040] [Fig.4c]
[0041] [Fig.4e]
[0042] [Fig.4f]
[0043] Les figures 4a à 4f présentent des étapes du procédé de fabrication selon un troisième mode de réalisation de la présente invention ; notons que l'étape d) ([Fig.4d]) intervient avant l'étape c) ([Fig.4c]) dans ce troisième mode de réalisation ;
[0044] [Fig.5] La [Fig.5] présente des images en vue de dessus de structures SOI avec cavités non conformes à l'invention, obtenues après l'application de recuits isothermes à différentes températures ;
[0045] [Fig.6a]
[0046] [Fig.6b]
[0047] [Fig.6c]
[0048] [Fig.6d]
[0049] [Fig.6c']
[0050] [Fig.6e]
[0051] [Fig.6f]
[0052] Les figures 6a à 6f présentent des étapes du procédé de fabrication selon une variante du premier mode de réalisation de la présente invention ; notons qu'une étape c') supplémentaire est ajoutée après l'étape d) dans cette variante, par rapport au premier mode de réalisation illustrée sur les figures 2a à 2f.
[0053] Certaines 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. Les mêmes références sur les figures pourront être utilisées pour des éléments de même nature.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

- [0054] L'invention concerne un procédé de fabrication d'une structure 100 comprenant une pluralité de cavités 30 confinées entre une couche mince 10 et un substrat support 20, comme illustré sur la [Fig.1]. La structure 100 peut éventuellement comprendre au moins une couche intermédiaire 50 entre la couche mince 10 et le substrat support 20.
[0055] Une première étape a) du procédé de fabrication consiste en la fourniture d'un substrat donneur 11, duquel la couche mince 10 sera transférée, et d'un substrat support 20 ([Fig.2a], [Fig.3a], [Fig.4a], [Fig.6a]).
[0056] Le substrat donneur 11 et le substrat support 20 ont avantageusement la forme d'une

plaquette, de diamètre typiquement supérieur à 100mm, par exemple 150mm, 200mm ou 300mm, et présentent chacun une face avant 11a, 20a et une face arrière 11b, 20b. Leur épaisseur est habituellement comprise entre 200 et 900 microns.

- [0057] Le substrat donneur 11 peut être formé d'au moins un matériau choisi parmi le silicium, le germanium, les composés semi-conducteurs III-V, le carbure de silicium, le tantalate de lithium, le niobate de lithium, ou autre matériau d'intérêt pour l'application visée. Le substrat support 20 peut être formé d'au moins un matériau choisi parmi le silicium, le germanium, les composés semi-conducteurs III-V, le carbure de silicium, le tantalate de lithium, le niobate de lithium, un verre, une céramique ou autre matériau d'intérêt pour l'application visée.
- [0058] L'étape b) suivante du procédé correspond à une implantation de premières espèces légères dans le substrat donneur 11, à travers la totalité de sa face avant 11a (dit autrement, en pleine surface ou « pleine plaque »), de manière à former un plan fragile enterré uniforme 12', délimitant avec ladite face avant 11a, la couche mince 10 à transférer ([Fig.2b], [Fig.3b], [Fig.4b], [Fig.6b]). Le terme uniforme signifie ici que les caractéristiques d'implantation sont les mêmes sur toute l'étendue du plan fragile enterré 12'.
- [0059] Ces espèces légères peuvent notamment être choisies parmi des ions ou atomes d'hydrogène et/ou d'hélium. Comme cela est bien connu en référence au procédé Smart Cut™, ces premières espèces, une fois implantées dans le substrat donneur 11, sont aptes à former des défauts lenticulaires dans le plan fragile enterré uniforme 12' ; ces défauts sont susceptibles de se développer sous forme de microfissures, sous activation thermique, par diffusion des espèces légères et coalescence des défauts lenticulaires. Rappelons que les défauts lenticulaires sont répartis dans une couche fine enterrée dans le substrat donneur 11 et déterminée par le profil gaussien d'implantation ; cette couche est appelée plan fragile enterré par souci de simplification.
- [0060] L'énergie d'implantation définit la profondeur à laquelle le plan fragile enterré uniforme 12' sera généré dans le substrat donneur 11. Pour une énergie d'implantation donnée et un matériau donné du substrat donneur 11, la dose implantée d'espèces légères est le paramètre essentiel définissant la cinétique de développement des microfissures, c'est-à-dire la cinétique de cloquage (sans raidisseur) et de fracture (en présence d'un raidisseur).
- [0061] Le demandeur a identifié que, pour l'obtention d'un transfert de couche mince 10 de haute qualité, dans une structure 100 à cavités, les caractéristiques et propriétés requises du plan fragile enterré sont différentes selon que ledit plan se trouve à l'aplomb d'une région bénéficiant d'un effet raidisseur ou à l'aplomb d'une cavité (sans effet raidisseur, donc). Dans les régions bénéficiant d'un effet raidisseur, il

apparaît avantageux que la cinétique de fracture soit « ralentie », de manière à autoriser l'usage de températures relativement élevées lors du traitement thermique destiné à provoquer la séparation spontanée dans le plan fragile enterré, tout en conservant des temps de traitement contrôlables ; une température plus élevée permet en outre une mise sous pression des microfissures plus importante et favorise la continuité de l'onde de fracture. Dans les régions ne bénéficiant pas d'un effet raidisseur (à l'aplomb des cavités), il est avantageux que le développement des microfissures, lors du traitement thermique susmentionné, mène à des cloques de grandes dimensions, sans exfoliation locale prématurée.

- [0062] On tend vers cet objectif en mettant en œuvre le procédé de fabrication selon l'invention qui prévoit de réaliser un plan fragile enterré fonctionnel 12 comportant des premières zones Z1 différentes de deuxièmes zones Z2, en termes de doses et/ou de nature des espèces implantées.
- [0063] L'étape c) du procédé correspond à une implantation localisée de deuxièmes espèces dans le substrat donneur 11 de manière à introduire lesdites deuxièmes espèces dans le plan fragile enterré uniforme 12' uniquement au niveau de deuxièmes zones Z2. Cela permet de former le plan fragile enterré fonctionnel 12 ([Fig.2c], [Fig.3c], [Fig.4c], [Fig.6c]). Ce dernier présente alors, dans le plan (x,y) de la face avant 11a :
- [0064] - des premières zones Z1 comportant les premières espèces légères et non les deuxièmes espèces, et
- [0065] - les deuxièmes zones Z2, comportant les premières espèces légères et les deuxièmes espèces.
- [0066] Les deuxièmes espèces peuvent être de même nature que les premières espèces ou de nature différente. L'énergie d'implantation utilisée pour introduire les deuxièmes espèces est ajustée de sorte que leur profil d'implantation soit sensiblement superposé au profil d'implantation des premières espèces légères. Avantagusement, les maxima des profils d'implantation des premières et des deuxièmes espèces sont localisés à des profondeurs égales à +/-20%, encore plus avantagusement à +/-10%.
- [0067] L'implantation localisée peut être obtenue par différents moyens. Une première option, mise en œuvre dans un premier et un deuxième mode de réalisation de l'invention ([Fig.2c], [Fig.3c]), consiste à utiliser un masque (M), appliqué sur la face avant 11a du substrat donneur 11, de manière à protéger les premières zones Z1 de l'implantation. Un tel masque est classiquement formé à partir de techniques de dépôt, lithographie et gravure. Une autre option, illustrée sur la [Fig.4c], en référence à un troisième mode de réalisation de l'invention, est de tirer profit d'une différence de relief au niveau de la face avant 11a, entre les régions à l'aplomb des premières zones Z1 et celles à l'aplomb des deuxièmes zones Z2, de manière à localiser les deuxièmes espèces dans les deuxièmes zones Z2 du plan fragile enterré fonctionnel 12 et à les in-

introduire à distance et en-dessous des premières zones dudit plan 12, dans un autre plan enterré 12'' discontinu. Les deuxièmes espèces pourront alors participer aux caractéristiques et propriétés des deuxièmes zones Z2 mais non (ou de façon très limitée) à celles des premières zones Z1.

- [0068] Lors d'une étape d) du procédé, une pluralité de cavités 30 est formée au niveau de la face avant 11a du substrat donneur 11 (1^{er} et 3^{ème} modes de réalisation, [Fig.2d], [Fig.6d] et [Fig.4d]) ou de celle 20a du substrat support 20 (2^{ème} mode de réalisation, [Fig.3d]).
- [0069] Il est important de noter que l'étape d) peut être opérée après l'étape c) (1^{er} mode de réalisation, [Fig.2d], [Fig.6d]) ou avant l'étape c) (3^{ème} mode de réalisation, [Fig.4d]) ou encore en parallèle de l'étape c) (2^{ème} mode de réalisation, [Fig.3d]).
- [0070] La formation des cavités dans l'un des substrats est classiquement réalisée par gravure locale de la face avant 11a,20a, par exemple au moyen d'un masque (M, M') disposé sur ladite face avant 11a,20a.
- [0071] La profondeur des cavités 30 peut typiquement varier entre 100nm et 100µm. Leur forme, dans le plan (x,y) de la face avant 11a,20a du substrat concerné 11,20, peut être circulaire, carrée, rectangulaire ou polygonale. La ou les dimension(s) caractéristique(s) (ou dimension(s) latérale(s)) d'une cavité 30 dans le plan (x,y), à savoir son diamètre (pour une forme circulaire) ou son côté (pour une forme carrée) ou encore sa largeur et sa longueur (pour une forme rectangulaire), est(sont) typiquement comprise(s) entre 1µm et 500µm. L'espacement entre les cavités 30 peut être compris entre 1µm et quelques centaines de mm.
- [0072] Les 1^{er} et 3^{ème} modes de réalisation, qui prévoient la formation des cavités 30 dans le substrat donneur 11 ([Fig.2d], [Fig.4d]), présentent l'avantage de ne nécessiter qu'un masque (M) pour la réalisation des étapes c) et d). Ces modes de réalisation limitent néanmoins la gamme de profondeurs possibles des cavités, car la profondeur doit rester inférieure à la différence entre la profondeur du plan fragile enterré fonctionnel 12 et l'épaisseur visée de couche mince 10 à transférer.
- [0073] Le 2^{ème} mode de réalisation prévoit la formation des cavités 30 dans le substrat support 20 ([Fig.3d]). Il est dans ce cas nécessaire que le masque M' utilisé pour définir la position des cavités 30 sur ledit substrat 20 et le masque M utilisé pour définir la position des premières et deuxièmes zones Z1,Z2 autorisent la correspondance entre cavités 30 et premières ou deuxièmes zones Z1,Z2, lors de l'étape ultérieure d'assemblage.
- [0074] Le procédé de fabrication comprend ensuite une étape e) d'assemblage par collage direct du substrat donneur 11 sur le substrat support 20, au niveau de leurs faces avant respectives 11a, 20a, pour former une structure collée 90 ([Fig.2e], [Fig.3e], [Fig.4e], [Fig.6e]). Une interface de collage 40, dépourvue de matière adhésive, est définie entre

les deux faces assemblées.

- [0075] Les cavités 30 se trouvent à l'aplomb soit des premières zones Z1, soit des deuxièmes zones Z2 du plan fragile enterré fonctionnel 12, selon les modes de mise en œuvre.
- [0076] Le principe du collage direct, bien connu dans l'état de l'art, ne sera pas décrit en détail ici. Parce qu'il est basé sur une adhésion moléculaire entre des faces assemblées, un très bon état de surface (propreté, faible rugosité, ...) des substrats 11,20 est requis, pour obtenir une bonne qualité d'assemblage.
- [0077] Préalablement à l'assemblage, une préparation des substrats donneur 11 et support 20, est habituellement réalisée. A titre d'exemple, une séquence classique utilisée en microélectronique, notamment pour des substrats à base de silicium, comprend un nettoyage à l'ozone, un nettoyage de type SC1 (« Standard Clean 1 ») et un nettoyage de type SC2 (« Standard Clean 2 »), avec des rinçages intercalés. Une activation des surfaces à assembler, par exemple par plasma, pourra également être effectuée avant la mise en contact, pour favoriser une forte énergie de collage entre lesdites surfaces.
- [0078] Optionnellement, le substrat donneur 11 et/ou le substrat support 20 peuvent comprendre une couche intermédiaire 50, au moins au niveau de leurs faces avant 11a,20a respectives, pour favoriser la qualité de collage et l'énergie de collage de leur interface, ou pour les besoins de l'application ([Fig.2e], [Fig.3e], [Fig.4e], [Fig.6e]). Cette couche intermédiaire peut notamment être formée en un matériau isolant, tel que l'oxyde de silicium, le nitrure de silicium, etc. Dans le cas particulier où le substrat donneur 11 et le substrat support 20 sont en silicium, la structure 100 obtenue à l'issue du procédé est alors une structure SOI (silicium sur isolant) avec cavités 30 enterrées.
- [0079] La couche intermédiaire 50, disposée sur le substrat donneur 11 et/ou sur le substrat support 20 peut être formée par croissance ou dépôt après l'une des étapes a) à d) du procédé.
- [0080] Le collage direct de l'étape e) peut être opéré sous atmosphère ambiante ou sous atmosphère contrôlée (par exemple, dans une enceinte sous basse pression).
- [0081] L'étape f) suivante du procédé de fabrication correspond à l'application d'un traitement thermique à la structure collée 90 pour provoquer la séparation spontanée le long du plan fragile enterré fonctionnel 12 et former d'une part la structure 100 et d'autre part le reste du substrat donneur 11' ([Fig.2f], [Fig.3f], [Fig.4f], [Fig.6f]). La structure 100 comprend la couche mince 10, assemblée au substrat support 20, soit directement, soit via une couche intermédiaire 50, le long d'une interface de collage 40, et des cavités enterrées 30.
- [0082] Comme évoqué précédemment, le demandeur a identifié que la qualité du transfert de la couche mince 10 du substrat donneur 11 sur le substrat support 20, était améliorée par l'application de températures de séparation plus élevées. La [Fig.5] présente des

images d'une portion de la surface de plusieurs structures SOI avec cavités (non conformes à l'invention), après transfert, pour différentes températures de traitement thermique entre 350°C et 450°C (recuit isotherme). Il apparaît clairement que la densité de défauts de transfert (en noir sur les images) diminue avec l'augmentation de la température du traitement thermique de l'étape f).

- [0083] Dans le procédé de fabrication selon l'invention, le plan fragile enterré fonctionnel 12 est composé de deux zones Z1, Z2 présentant des caractéristiques d'implantation distinctes, qui permettent de favoriser d'une part une cinétique de transfert compatible avec des températures « élevées » (dans les régions bénéficiant de l'effet raidisseur), et d'autre part, la formation de cloques de taille importante à ces températures avec, éventuellement, un minimum d'exfoliation locale (dans les régions à l'aplomb des cavités 30, ne bénéficiant pas de l'effet raidisseur).
- [0084] Selon un exemple de mise en œuvre, ce sont les deuxièmes zones Z2 du plan fragile enterré fonctionnel 12 qui sont à l'aplomb des cavités 30 dans la structure collée 90.
- [0085] Dans le cas particulier d'une structure 100 visée de type SOI avec cavités, les premières espèces légères peuvent être des ions ou atomes d'hydrogène, et les deuxièmes espèces des ions ou atomes d'hélium. En pratique, le substrat donneur 11 est donc en silicium monocristallin, le substrat support 20 est en silicium, et une couche intermédiaire 50 en oxyde de silicium (par exemple, d'épaisseur 200 nm) est disposée en tout ou partie sur l'une et/ou l'autre des faces avant 11a, 20a, avant l'assemblage. A titre d'exemple, les cavités 30 sont réalisées sur le substrat donneur 11, et présentent une profondeur de 100 nm, des dimensions latérales de 40 µm et un espacement de 7 µm. L'énergie d'implantation des premières espèces légères (hydrogène) est de 140 keV, avec une dose de 6×10^{16} /cm² ; l'énergie d'implantation des deuxièmes espèces (hélium) est de 220 keV, avec une dose de 2×10^{16} /cm².
- [0086] Les premières zones Z1 du plan fragile enterré fonctionnel 12, qui ne comportent que les espèces hydrogène, sont à l'aplomb de régions bénéficiant d'un effet raidisseur ; les caractéristiques d'implantation dans les premières zones Z1 sont ici favorables à un transfert dans les gammes de températures plus élevées (typiquement supérieures ou égales à 450°C).
- [0087] Les deuxièmes zones Z2 du plan fragile enterré fonctionnel 12, qui comportent les premières espèces (hydrogène) et les deuxièmes espèces (hélium), sont à l'aplomb de régions ne bénéficiant pas de l'effet raidisseur (cavités 30) ; les caractéristiques d'implantation dans les deuxièmes zones Z2 sont ici favorables à la formation de cloques de grandes dimensions, dans les gammes de températures « élevées » susmentionnées.
- [0088] Selon un autre exemple de mise en œuvre, ce sont les premières zones Z1 du plan fragile enterré fonctionnel 12 qui sont disposées à l'aplomb des cavités 30 dans la

structure collée 90.

- [0089] Dans le cas particulier d'une structure 100 visée de type SOI avec cavités, les premières espèces légères peuvent être des ions ou atomes d'hydrogène, ou des ions ou atomes d'hélium, ou encore des ions ou atomes d'hydrogène et d'hélium (l'étape c) consisterait alors à une co-implantation, c'est-à-dire deux implantations successives de ces deux espèces légères). Les deuxièmes espèces implantées localement sont des ions ou atomes susceptibles de ralentir la cinétique de croissance de microfissures dans les deuxièmes zones Z2 du plan fragile enterré fonctionnel 12, comparativement à la cinétique de croissance de microfissures dans les premières zones Z1. Ces deuxièmes espèces peuvent par exemple être des ions ou atomes de silicium qui vont endommager le matériau du substrat donneur 11 jusqu'à un niveau plus ou moins proche de l'amorphisation et ainsi modifier la cinétique de croissance des microfissures. Des deuxièmes espèces de nature différente pourraient bien sûr être implantées pour atteindre ce même objectif.
- [0090] En pratique, le substrat donneur 11 est en silicium monocristallin, le substrat support 20 est en silicium, et une couche intermédiaire 50 en oxyde de silicium (par exemple, d'épaisseur 200 nm) est disposée sur la face avant 20a, avant l'assemblage. A titre d'exemple, les cavités 30 sont réalisées dans le substrat donneur 11, et présentent une profondeur de 100nm, des dimensions latérales de 40µm et un espacement de 7µm. L'énergie d'implantation des premières espèces légères (hydrogène et hélium co-implantés) est de 32 keV (H) et de 52 keV (He), avec des doses respectives de 10^{16} / cm² et 1.5×10^{16} / cm² ; l'énergie d'implantation des deuxièmes espèces (Si) est de 360 keV, avec une dose de 10^{14} / cm².
- [0091] Les premières zones Z1 du plan fragile enterré fonctionnel 12, qui ne comportent que les premières espèces hydrogène et hélium, sont à l'aplomb de régions ne bénéficiant pas d'un effet raidisseur (cavités 30) ; les caractéristiques d'implantation dans les premières zones Z1 sont ici favorables à la formation de cloques de grandes dimensions avec, éventuellement, des exfoliations locales limitées, dans les gammes de températures « élevées » souhaitées pour l'étape f) de traitement thermique de séparation.
- [0092] Les deuxièmes zones Z2 du plan fragile enterré fonctionnel 12, qui comportent les premières espèces (hydrogène et hélium) et les deuxièmes espèces (Si), sont à l'aplomb de régions bénéficiant de l'effet raidisseur ; les caractéristiques d'implantation dans les deuxièmes zones Z2 sont ici favorables à un transfert dans les gammes de températures « élevées » (typiquement supérieures ou égales à 450°C).
- [0093] Notons que le procédé de fabrication peut comprendre, après l'étape f), des étapes classiques de finition et/ou de lissage (mécaniques, mécano-chimiques, chimiques ou thermiques) de la surface libre 10a de la couche mince 10, dans le but d'atteindre la

qualité cristalline et de surface requise pour ladite couche mince 10 dans la structure 100 finale.

- [0094] Selon une variante du premier mode de réalisation de l'invention, illustrée sur les figures 6a à 6f, une étape c') d'implantation localisée de troisièmes espèces au niveau de la face avant 11a du substrat donneur 11 peut être opérée. Cette étape c') peut en particulier intervenir après l'étape d) de formation des cavités 30 dans le substrat donneur 11, et après retrait du masque M ([Fig.6c]'). Les troisièmes espèces se trouvent ainsi implantées dans les premières zones Z1 du plan fragile enterré fonctionnel 12 et dans un autre plan enterré discontinu 12'' situé à distance et sous les deuxièmes zones Z2 du plan fragile enterré fonctionnel 12. Ces troisièmes espèces participent à modifier les caractéristiques et propriétés des premières zones Z1 du plan fragile enterré fonctionnel 12, mais n'affectent pas ou peu celles des deuxièmes zones Z2.
- [0095] A l'issue du transfert de la couche mince 10, le plan enterré discontinu 12'' se retrouve dans le reste du substrat donneur 11' ([Fig.6f]).
- [0096] La présente invention peut être mise à profit pour une large gamme de dispositifs MEMS ou NEMS (« Nanoelectromechanical systems »), ou pour toute autre application tirant profit d'une couche mince 10 disposée localement sur une cavité 30, au sein d'une structure 100. Comme déjà évoqué dans cette description, un substrat SOI (Silicium sur isolant) avec cavités enterrées est un exemple connu d'une telle structure 100.
- [0097] L'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation 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 (100) comprenant une pluralité de cavités (30) confinées entre une couche mince (10) et un substrat support (20), le procédé de fabrication comprenant les étapes suivantes :
- a) la fourniture d'un substrat donneur (11) et d'un substrat support (20), chacun des substrats (11,20) présentant une face avant (11a, 20a) et une face arrière (11b, 20b) ;
 - b) l'implantation de premières espèces légères dans le substrat donneur (11), pour former un plan fragile enterré uniforme (12') délimitant avec la face avant (11a) du substrat donneur (11), la couche mince (10) à transférer ;
 - c) l'implantation localisée de deuxièmes espèces dans le substrat donneur (11) de manière à introduire lesdites deuxièmes espèces dans le plan fragile enterré uniforme (12') uniquement au niveau de deuxièmes zones (Z2), pour former un plan fragile enterré fonctionnel (12) présentant :
 - des premières zones (Z1) comportant les premières espèces légères et non les deuxièmes espèces, et
 - les deuxièmes zones (Z2), comportant les premières espèces légères et les deuxièmes espèces ;
 - d) la formation d'une pluralité de cavités (30) débouchant au niveau d'une face avant (11a,20a) du substrat donneur (11) ou du substrat support (20) ;
 - e) l'assemblage par collage direct du substrat donneur (11) sur le substrat support (20), au niveau de leurs faces avant respectives (11a, 20a), pour former une structure collée (90) dans laquelle les cavités (30) se trouvent à l'aplomb soit des premières zones (Z1), soit des deuxièmes zones (Z2) du plan fragile enterré fonctionnel (12) ;
 - f) l'application d'un traitement thermique à la structure collée (90) pour provoquer la séparation spontanée le long du plan fragile enterré fonctionnel (12) et former d'une part la structure (100) et d'autre part le reste du substrat donneur (11').
- [Revendication 2] Procédé de fabrication selon la revendication 1, dans lequel l'implantation de l'étape c) est effectuée en présence d'un masque (M), disposé sur la face avant (11a) du substrat donneur (11), à l'aplomb des premières zones (Z1) du plan fragile enterré fonctionnel (12).
- [Revendication 3] Procédé de fabrication selon la revendication 2, dans lequel la formation

des cavités (30) à l'étape d) est réalisée par gravure locale de la face avant (20a) du substrat support (20), par exemple au moyen d'un masque (M') disposé sur ladite face avant (20a).

- [Revendication 4] Procédé de fabrication selon la revendication 2, dans lequel, après l'étape c), l'étape d) de formation des cavités (30) comprend la gravure de la face avant (11a) du substrat donneur (11), à l'aplomb des deuxièmes zones (Z2), les premières zones (Z1) étant protégées de la gravure par le masque (M).
- [Revendication 5] Procédé de fabrication selon la revendication 4, comprenant, après l'étape d) et après retrait du masque (M), une étape c') d'implantation localisée de troisièmes espèces au niveau de la face avant (11a) du substrat donneur (11), les troisièmes espèces se trouvant ainsi implantées dans les premières zones (Z1) du plan fragile enterré fonctionnel (12) et dans un autre plan enterré (12'') situé à distance et sous les deuxièmes zones (Z2) du plan fragile enterré fonctionnel (12).
- [Revendication 6] Procédé de fabrication selon la revendication 1, dans lequel l'étape d) de formation des cavités (30) est réalisée avant l'étape c), et comprend :
- l'application d'un masque (M) disposé sur la face avant (11a) du substrat donneur (11), à l'aplomb des deuxièmes zones (Z2) du plan fragile enterré fonctionnel (12) destiné à être formé à l'étape c) ultérieure, et
 - la gravure de la face avant (11a) du substrat donneur (11), à l'aplomb des premières zones (Z1), les deuxièmes zones (Z2) étant protégées de la gravure par le masque (M).
- [Revendication 7] Procédé de fabrication selon la revendication 6, dans lequel après l'étape d) et après retrait du masque (M) de la face avant (11a) du substrat donneur (11), l'étape c) d'implantation est effectuée, les deuxièmes espèces se trouvant ainsi implantées dans les deuxièmes zones du plan fragile enterré fonctionnel (12) et dans un autre plan enterré (12'') situé à distance et sous les premières zones (Z1) du plan fragile enterré fonctionnel (12).
- [Revendication 8] Procédé de fabrication selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel :
- les deuxièmes zones (Z2) du plan fragile enterré fonctionnel (12) sont à l'aplomb des cavités (30), dans la structure collée (90), et
 - les premières espèces légères sont des ions ou des atomes d'hydrogène, et les deuxièmes espèces sont des ions ou des atomes d'hélium.
- [Revendication 9] Procédé de fabrication selon l'une des revendications 1, 2, 3, 6 et 7,

dans lequel :

- les premières zones (Z1) du plan fragile enterré fonctionnel (12) sont à l'aplomb des cavités (30) dans la structure collée (90),
- les premières espèces légères sont des ions ou des atomes d'hydrogène, ou des ions ou des atomes d'hélium, ou encore des ions ou des atomes d'hydrogène et d'hélium, et
- les deuxièmes espèces sont des ions ou des atomes de silicium, susceptibles de ralentir la cinétique de croissance de microfissures dans les deuxièmes zones (Z2) du plan fragile enterré fonctionnel (12), comparativement à la cinétique de croissance de microfissures dans les premières zones (Z1).

[Revendication 10] Procédé de fabrication selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel l'étape e) d'assemblage implique au moins une couche intermédiaire (50) disposée sur le substrat donneur (11) et/ou sur le substrat support (20), ladite couche intermédiaire (50) ayant été déposée après l'une des étapes a) à d).