Description

Titre de l'invention : PROCEDE D'ASSEMBLAGE DE DEUX SUBSTRATS PAR ADHESION MOLECULAIRE

DOMAINE DE L'INVENTION

[0001] L'invention porte sur un procédé d'assemblage de deux substrats par adhésion moléculaire. Elle trouve son application notamment dans les domaines de la microélectronique, des microsystèmes, de la photonique…

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

[0002] L'adhésion moléculaire est un procédé d'assemblage de deux corps au cours duquel les faces ou surfaces principales de ces deux corps, parfaitement propres, planes et lisses, sont mises en contact intime l'une avec l'autre pour favoriser le développement de liaisons moléculaires, par exemple de type van der Waals ou covalentes. L'assemblage des deux corps est alors obtenu sans utilisation d'un adhésif. Ces liaisons peuvent être renforcées par l'application d'un traitement thermique.

[0003] Ce procédé est utilisé en particulier pour la fabrication des substrats qui trouvent une application dans les domaines de la microélectronique, des microsystèmes, de la photonique… Dans ces domaines, les substrats présentent généralement la forme de plaquettes circulaires de matériaux qui peuvent être monocristallins, poly-cristallins ou amorphes, conducteurs, semi-conducteurs ou isolants.

[0004] Dans ces domaines, et pour faciliter l'assemblage des substrats, il est usuel de former une couche superficielle diélectrique, typiquement d'oxyde de silicium, sur l'un et/ou l'autre de ces deux substrats, par dépôt, éventuellement suivi d'une étape de polissage, ou par simple oxydation lorsque le substrat est formé ou contient du silicium. Il est également usuel de préparer les faces principales pour les rendre propres (notamment en termes de particules et de contaminants) et lisses (pour fournir une rugosité de surface typiquement sous 0,5 nm en valeur quadratique moyenne mesurée par microscopie à force atomique sur un champ d'observation de 5 microns par 5 microns).

[0005] Après leur préparation, les deux substrats sont disposés l'un sur l'autre, au niveau de leurs faces principales. L'application d'une pression sur l'un ou l'autre des deux substrats provoque la mise en contact intime et ponctuel des faces principales, et la propagation de ce contact intime sur toute l'étendue des faces principales sous la forme d'une onde, dite « onde de collage ».

[0006] Il est également parfois envisagé de rendre une au moins de ces faces réactives par l'application d'un plasma, typiquement d'oxygène ou d'azote. Cette préparation de surface vise à accroitre l'énergie de collage entre les deux substrats assemblés. On pourra se référer à ce propos à la publication de Paul Lindner "Plasma activated wafer

bonding for thin silicon on insulator substrate fabrication." Proceedings of the Electrochemical Society, 2004. La [Fig.1] représente un équipement 1 permettant l'application d'un tel traitement plasma à un substrat 2 en vue de son activation avant collage. Cet équipement comprend une chambre d'activation 3, généralement placée à une pression sous atmosphérique et dans laquelle est introduit un flux maitrisé d'oxygène ou d'azote. La chambre contient deux électrodes 4a,4b entre lesquels est formé le plasma par ionisation des molécules d'oxygène ou d'azote. Ce plasma est initié en appliquant à l'aide d'un générateur G, une puissance radio fréquence RF (typiquement de 13,56 MHz) à l'une des électrodes 4a, tandis que l'autre électrode est mise à la terre 4b. L'une des électrodes peut correspondre ou être comprise dans le suscepteur qui est sensiblement dimensionné à la taille du substrat 2 pour le supporter, comme cela est représenté sur la [Fig.1].

[0007] La densité de puissance radiofréquence du plasma correspond à la puissance radiofréquence appliquée aux électrodes ramenée à (c'est-à-dire « divisée par ») la surface en vis-à-vis des électrodes, cette surface étant sensiblement égale à la surface exposée du substrat 2.

[0008] Dans le but d'améliorer la qualité de l'assemblage de deux substrats, le document WO2023202917A1 propose d'exploiter une étape d'activation de la couche superficielle diélectrique qui recouvre l'un au moins des substrats pour introduire, dans cette couche, une dose de soufre supérieure à 3,0 E13 at/cm^2.

OBJET DE L'INVENTION

[0009] Un but de l'invention est d'améliorer l'approche proposée par ce document.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

[0010] En vue de la réalisation de ce but, l'objet de l'invention propose un procédé d'assemblage par adhésion moléculaire de deux substrats présentant chacun une face principale, l'un au moins des deux substrats étant pourvu d'une couche superficielle diélectrique du côté de sa face principale.

[0011] Selon l'invention, le procédé comprend les étapes suivantes :

[0012] (a) l'activation de la couche superficielle diélectrique, l'activation comprenant l'exposition de la couche superficielle diélectrique à un plasma formé entre deux électrodes d'une chambre d'activation, l'exposition au plasma étant conduite pendant une durée d'activation comprise entre 15 secondes et 2 minutes pendant laquelle une puissance radiofréquence est appliquée à l'une des électrodes et comprenant l'introduction dans la chambre d'activation d'un flux maitrisé d'oxygène ou d'azote et d'un flux maitrisé d'un gaz comprenant du soufre;

[0013] (b) la mise en contact des faces principales des deux substrats, puis ;

[0014] (c) l'initiation et la propagation d'une onde de collage entre les faces principales des deux substrats pour les assembler l'un à l'autre.

[0015] Ce procédé est remarquable en ce que la puissance radiofréquence présente une densité strictement supérieure à 1,1 W/cm^2.

[0016] Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- la densité de puissance radiofréquence est comprise entre 1,4 W/cm^2 et 1,7 W/cm^2 ;
- la chambre d'activation est placée à une pression inférieure à 50 milli-Torr (6,66 Pa), préférentiellement à 30 milli-Torr (4 Pa) ;
- le flux maitrisé d'oxygène ou d'azote est formé d'un flux d'oxygène de 75 sccm ;
- le gaz comprenant du soufre est de l'hexafluorure de soufre ;
- le flux maitrisé d'hexafluorure de soufre est formé d'un flux inférieur à 7 sccm, par exemple de 4 sccm ;
- le flux maitrisé d'hexafluorure de soufre est introduit dans la chambre d'activation pendant une période déterminée de la durée d'activation ;
- la période déterminée présente une durée inférieure à 10s ;
- la période déterminée est respectivement précédée et suivie de périodes pendant laquelle seul le flux d'oxygène ou d'azote est introduit dans la chambre d'activation ;
- le procédé d'assemblage comprend une étape de dépôt de la couche superficielle diélectrique sur l'un au moins des deux substrats ;
- le dépôt est réalisé par une technique de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma ;
- la couche superficielle diélectrique présente une épaisseur inférieure à 90 nm ;
- l'étape d'activation est la seule étape appliquée à la couche superficielle diélectrique pour en réduire la rugosité.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0017] 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 :

[0018] [Fig.1]

[0019] La [Fig.1] représente un équipement d'activation plasma apte à mettre en œuvre une étape d'activation d'un procédé conforme à l'invention ;

[0020] [Fig.2]

[0021] La [Fig.2] représente graphe reliant l'épaisseur d'une couche superficielle d'oxyde de silicium déposée à sa rugosité, telle que mesurée par réflectivité au rayons X, avant et après l'application d'une activation plasma comprenant une espèce fluorée ;

[0022] [Fig.3]

[0023] La [Fig.3] présente des graphes illustrant l'effet de lissage de la couche diélectrique selon la valeur de certains paramètres d'une activation plasma (pression régnant dans la chambre, puissance radiofréquence, et débit de SF6) ;

[0024] [Fig.4a] [Fig.4b] [Fig.4c] [Fig.4d] [Fig.4e] [Fig.4f] [Fig.4g]

[0025] Les figures 4a,4b,4c,4d,4e,4f et 4g illustrent une application d'un procédé d'assemblage conforme à l'invention pour former un substrat composite;

[0026] [Fig.5]

[0027] La [Fig.5] représente un substrat composite qui peut être formé par application d'un procédé d'assemblage conforme à l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0028] La demanderesse a poursuivi les études rapportées dans le document WO2023202917A1 portant sur un procédé d'assemblage par adhésion moléculaire de deux substrats présentant chacun une face principale. L'un au moins des deux substrats est pourvu d'une couche superficielle diélectrique du côté de sa face principale.
Ce procédé comprend les étapes de mise en contact des faces principales des deux substrats, puis d'initiation et de propagation d'une onde de collage entre les faces principales des deux substrats pour les assembler l'un à l'autre.

[0029] Selon ce document, le procédé comprend, avant l'étape de mise en contact, une étape de préparation de la couche superficielle diélectrique visant à introduire, dans cette couche, une dose de soufre supérieure à 3,0 E13 at/cm^2. Cette étape de préparation conduit à accroitre l'énergie de collage des deux substrats assemblés de manière significative. Lorsque la dose de soufre excède la dose précitée, l'onde de collage se propage avec une vitesse réduite qui conduit à éliminer, ou pour le moins à décroitre de manière significative, les défauts périphériques de collage (souvent désignés par le terme « picots ») qui se développent au niveau de l'interface de collage, aux lieux où l'onde de collage rencontre le bord des substrats.

[0030] Dans un mode de mise en œuvre particulier, l'étape de préparation comprend l'activation de la couche superficielle diélectrique par un plasma d'azote ou d'oxygène comprenant de l'hexafluorure de soufre (SF6). Cette activation est menée pendant une durée d'activation comprise entre 15 secondes et 2 minutes au cours de laquelle le substrat est exposé au plasma d'azote ou d'oxygène. Une quantité maitrisée d'hexafluorure de soufre est mélangée à l'oxygène ou à l'azote pendant une période déterminée de la durée d'activation qui est précédée et suivit de périodes pendant laquelle

la couche superficielle diélectrique est exposée au plasma constitué d'oxygène ou d'azote.

[0031] Plus précisément, dans des conditions d'application dites « de référence », l'activation de la couche superficielle diélectrique comprend l'introduction dans la chambre d'activation d'oxygène (O2) dans un débit de 75 sccm (centimètre cube standard par minute) pendant une durée de 30 secondes. Au sein de cette durée de 30 secondes, 11 secondes environ après son début, on introduit pendant une période de 5 secondes un débit de 5 sccm de SF6. La chambre d'activation est maintenue pendant ce traitement à 50 mTor (6,66 Pa) et une puissance radiofréquence de 200W est appliquée à une des électrodes de la chambre.

[0032] De manière surprenante, la demanderesse a observé que l'activation d'une couche diélectrique dans ces conditions de référence avait pour effet de réduire la rugosité de cette couche diélectrique, alors que ce n'est pas le cas de l'activation d'une couche diélectrique superficielle par un plasma constitué d'oxygène uniquement.

[0033] La rugosité est usuellement mesurée par microscopie à force atomique. Selon cette technique, une pointe de dimension nanométrique portée par un bras flexible est balayée sur un champ de mesure de la surface à caractériser, ce champ présentant une dimension de l'ordre d'un micromètre à quelques micromètres de côté. La topographie de surface conduit à faire fléchir le bras lors de ce balayage. La mesure de cette flexion permet d'établir une mesure de rugosité de la surface sur l'étendue du champ de mesure. La mesure présente une résolution inférieure à 1 nm verticalement, mais de l'ordre de 5 à 10 nm latéralement, principalement liée à la dimension de la pointe de mesure.

[0034] Les expérimentations rapportées dans le document WO2023202917A1 précité ont été réalisées notamment sur des plaquettes en tantalate de lithium sur laquelle avait été préalablement formée une couche superficielle d'oxyde de silicium de 30nm d'épaisseur par PECVD (acronyme de l'expression anglo-saxonne « Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition » ou dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma). Du fait de la nature électriquement isolante de cette plaquette, la couche d'oxyde de silicium tend à se charger électriquement, ce qui ne permet pas facilement de procéder à une mesure de rugosité par microscopie à force atomique, la pointe de mesure tendant à être retenue électrostatiquement à la surface de la plaquette, ce qui perturbe la mesure. Par ailleurs, une couche déposée d'oxyde de silicium de 30nm d'épaisseur présente généralement une rugosité relativement faible, inférieur à la limite permettant le collage de la plaquette par adhésion moléculaire, si bien que la question de la rugosité n'est pas adressée par le document WO2023202917A1.

Expérimentations

[0035] Pour analyser plus finement l'effet de l'activation de la couche superficielle diélectrique, et notamment sur sa rugosité, la demanderesse a procédé à des mesures de rugosité par réflectivité au rayons X (technique désignée XRR dans la littérature scientifique du domaine). Le principe de base de cette technique consiste à projeter un faisceau de rayons X sur la surface à caractériser et à mesurer l'intensité des rayons X réfléchis. Le champ de mesure est typiquement de l'ordre du mm^2. À l'aide d'une simulation du modèle de réflectivité, une mesure très précise de l'épaisseur d'une couche, des rugosités de surface et d'interface peuvent être obtenues. La longueur d'onde courte, de l'ordre de 0,1 nm, des rayons X permet d'atteindre une résolution atomique, bien que la mesure se situe dans l'espace réciproque, ce qui est différent des mesures fournies dans l'espace réel par l'AFM. Cette mesure n'est pas affectée par une éventuelle charge électrique présente dans la couche superficielle.

[0036] Les observations de mesure de rugosité XRR sont reportées sur le graphe de la [Fig.2]. Celle-ci représente la rugosité mesurée R d'une couche diélectrique (sur l'axe des abscisses en unité arbitraire) selon l'épaisseur de cette couche T (sur l'axe des ordonnées en nm). Il s'agit dans les mesures reportées d'une couche de dioxyde de silicium déposée sur un substrat de silicium par PECVD. La courbe A représente la relation globalement linéaire liant l'épaisseur T et la rugosité R de la couche juste après son dépôt et la courbe B représente les mesures par XRR après l'étape d'activation présentant les conditions d'application de référence présentées ci-dessus. On a placé sur ce graphe la ligne C de rugosité de la couche telle que déposée (courbe A) au-dessus de laquelle les conditions de surfaces ne permettent pas, même après le lissage obtenu par application de l'étape d'activation, d'obtenir un collage par adhésion moléculaire de qualité suffisante.

[0037] Pour exploiter au mieux cette observation, et dans une nouvelle série d'expérimentation, la demanderesse a étudié l'effet des paramètres de l'équipement d'activation, notamment la puissance radiofréquence appliquée à l'une des électrodes et le niveau de vide de la chambre, sur la rugosité d'une couche superficielle diélectrique.

[0038] Ces expérimentations ont été menées sur des plaquettes de silicium de 150 mm de diamètre sur lesquelles a été déposée une couche de 50 nm d'oxyde de silicium par PECVD. Chaque plaquette d'une paire de ces plaquettes a subi une étape d'activation avant que les plaquettes de la paire soient assemblées entre elles, par adhésion moléculaire. Les couches d'oxyde de silicium n'ont subi aucun autre traitement visant à réduire leur rugosité, en particulier elles n'ont pas été traitées par polissage. L'énergie de collage a été mesurée après un traitement thermique de renforcement à 180°C pendant 60 min, par une méthode d'insertion de lame (ou « double cantilever beam » selon l'expression anlgo-saxonne parfois employée) dans un environnement anhydre.

[0039] Un résumé des résultats obtenus est présenté dans le tableau ci-dessous dans lequel on a fait varier, par rapport aux conditions de référence, la pression dans la chambre d'activation, la puissance radiofréquence appliquée à une électrode de l'équipement plasma et le débit de SF6 introduit dans la chambre pendant la durée de 5 secondes. On a également reporté dans le tableau la rugosité XRR mesurée et l'énergie de collage moyen mesuré après un traitement thermique de 100°C-1h appliqué à l'assemblage. Pour être complet, on précise que la fréquence du signal radiofréquence appliqué à l'une des électrodes était de 13 MHz.

Réf	Pression (mT)	Puissance (W)	Débit SF6 (s ccm)	Rugosité XRR pre activation (en A)	Rugosité XRR post activation (en A)	Energie de collage anhydre (mJ/m^2)
1	150	100	4	17,3	15,1	
2	90	200	5	18	8,5	
3	30	200	6	17,5	6,2	2780
4	90	150	6	17,6	10,3	
5	30	200	4	17,6	5,9	2785
6	150	200	4	17,2	9,4	2510
7	90	150	6	17,2	9,6	2495
8	30	150	4	17,6	7,6	2735
9	90	150	5	17,8	10,4	2612
10	30	191,5	7	17,7	6,9	2765
11	150	200	7	17,8	9,7	
12	150	200	5	17,9	9,8	2510
13	50	150	5	17,7	9,1	2675
14	30	300	4	17,7	4,6	2835

[0040] Ces données sont résumées sur les graphes de la [Fig.3] qui modélisent l'effet de la variation d'un paramètre (pression Pr, puissance Pa ou débit de SF6 Db) sur le lissage de la couche diélectrique (variation de la rugosité ΔR avant/après l'activation).

[0041] On observe que sur cette [Fig.3] que l'effet lissant est très sensible à la puissance radiofréquence du plasma, cet effet lissant étant maximisé dans la fenêtre étudiée pour la puissance maximale explorée de 300W. Il est donc généralement souhaitable que l'activation soit conduite à une puissance relativement forte, strictement supérieure à 200W (soit une densité de puissance strictement supérieure à 1,1 W/cm^2 en ramenant

la puissance à la surface de la plaquette), et de préférence comprise entre 250W et 300W (une densité de puissance comprise entre 1,4 W/cm^2 et 1,7 W/cm^2).

[0042] L'effet lissant est également sensible, dans une moindre mesure, à la pression régnant dans la chambre, une pression relativement basse conduisant à favoriser l'effet lissant. Aussi, et de manière avantageuse, cette pression est choisie à placée à une pression inférieure à 50 milli-Torr (6,66 Pa), préférentiellement inférieure à 30 milli-Torr (4 Pa).

[0043] Enfin, on observe que l'effet lissant apparaît très peu sensible au débit de SF6, qui pourra donc être choisi librement, par exemple dans un débit relativement faible de 4 sccm.

[0044] On note que l'énergie de collage, pour tous les collages qui ont été analysés, est particulièrement élevée, en concordance avec les enseignements du document WO2023202917A1. C'est notamment le cas du collage des plaquettes de la ligne 14 du tableau, ayant reçu une activation avec la puissance la plus importante de 300W.

Procédé d'assemblage

[0045] On peut tirer profit des résultats qui viennent d'être présentés dans une séquence formée des étapes de mise en contact des faces principales des deux substrats, d'initiation et de propagation d'une onde de collage qui ont été présentées précédemment. Pour cela, on prévoit, avant l'étape de mise en contact, une étape d'activation la couche superficielle diélectrique comprenant l'exposition de cette couche à un plasma formé entre deux électrodes d'une chambre d'activation. La couche superficielle diélectrique peut avoir été formée sur le substrat par dépôt, par exemple par dépôt PECVD. L'épaisseur peut être choisie relativement librement, par exemple inférieure à 90 nm ou entre 30nm et 90nm, car la rugosité de surface qui peut être relativement importante pour les dépôts les plus épais sera rectifiée par l'étape d'activation, du fait de son effet lissant.

[0046] La pression régnant dans la chambre d'activation peut être maitrisée pour être inférieure à 50 milli-Torr (6,66 Pa), préférentiellement inférieure à 30 milli-Torr (4 Pa). On introduit dans la chambre un flux maitrisé d'oxygène ou d'azote et un flux maitrisé d'un gaz comprenant du soufre. Ce flux maitrisé d'oxygène ou d'azote peut être égale à, ou de l'ordre de, 75 sccm. Le flux maitrisé du gaz comprenant du soufre peut être compris entre 3 sccm et 7 sccm de SF6.

[0047] L'exposition est conduite pendant une durée d'activation comprise entre 15 secondes et 2 minutes pendant laquelle une puissance radiofréquence strictement supérieure à 200W est appliquée à l'une des électrodes. De préférence la puissance radiofréquence est comprise entre 250W et 300W.

[0048] Le gaz comprenant du soufre, par exemple le SF6, peut-être introduit avec un débit maitrisé pendant toute cette durée, ou pendant une partie de cette durée uniquement, pour se mélanger à l'oxygène ou à l'azote pendant une période déterminée de la

durée d'activation. De préférence, cette période déterminée n'inclut pas le moment d'allumage du plasma, car cet allumage peut conduire à introduire les espèces soufrées du plasma dans la couche superficielle de manière non répétable, ce qui peut être dommageable pour la bonne maitrise du procédé. Avantageusement donc, la période déterminée pendant laquelle la couche superficielle diélectrique est exposée au plasma formé d'un gaz contenant du soufre est respectivement précédée et suivie de périodes pendant laquelle la couche superficielle diélectrique est exposée au plasma formé uniquement d'un gaz d'activation d'oxygène ou d'azote.

[0049] L'étape d'activation de la couche superficielle diélectrique est suivie de l'étape de mise en contact des faces principales des deux substrats, puis de l'étape d'initiation et de propagation d'une onde de collage entre les faces principales des deux substrats pour les assembler l'un à l'autre.

[0050] On peut prévoir une étape de nettoyage de la face principale du substrat, entre l'étape d'activation et l'étape de mise en contact. Cette étape de nettoyage peut correspondre ou comprendre le brossage de cette face tout en y déversant un liquide, tel que de l'eau déminéralisée ou une solution de SC1 (acronyme de « standard clean 1 » ou nettoyage standard 1). Avantageusement l'étape de nettoyage est appliquée aux faces principales des deux substrats, directement avant leur assemblage.

Exemple d'application

[0051] Le procédé d'assemblage qui vient d'être présenté peut trouver de multiples applications. Il peut notamment être exploité dans un procédé de double transfert d'une couche, dont on trouvera une description détaillée dans le document EP703609 ou le document WO0237556A1. Comme cela est détaillé dans ces documents, un tel double transfert permet de contourner le problème lié à la dilatation différentielle qui apparaît lors du transfert direct d'une couche, prélevé d'un substrat dit donneur, sur un support final, lorsque ce substrat donneur et le support final présentent des coefficients de dilatation thermique différents. D'une manière très générale, ce procédé de double transfert vise à reporter en premier lieu la couche mince sur un support intermédiaire présentant un coefficient de dilatation thermique égal ou proche de celui de la couche mince. La couche mince est assemblée au support intermédiaire au niveau d'une première interface d'adhésion, par collage moléculaire, présentant une première énergie d'adhésion. La face libre de la couche mince est quant à elle assemblée au support final au niveau d'une seconde interface d'adhésion, également par collage moléculaire, cette seconde interface présentant une seconde énergie d'adhésion, supérieure à la première. Dans une étape suivante, on sollicite mécaniquement le support final et/ou le support intermédiaire, entre lesquels la couche mince est prise en sandwich, pour démonter le support intermédiaire de la couche mince au niveau de la

première interface qui présente l'énergie d'adhésion la plus faible, et ainsi compléter le report la couche mince sur le support final.

[0052] A titre d'illustration on souhaite former une structure composite S, représentée sur la [Fig.5], pour y former des composants radiofréquences, la structure composite S étant formée d'une couche mince piézoélectrique 7, par exemple en tantalate de lithium , sur un support final 11 en silicium. Le silicium présente un coefficient de dilatation thermique estimé à 2.6 $x10^{-6}$ K^{-1}. Le tantalate de lithium est quant à lui anisotrope est présente un coefficient de dilatation thermique de 16.0 $x10^{-6}$ K^{-1} selon l'axe a11 et de 4.0 $x10^{-6}$ K^{-1} selon l'axe a33. Quel que soit l'axe cristallographique considéré, ces deux matériaux présentent des coefficients de dilatation thermique bien différents, ce qui rend la réalisation de cette structure par une approche « directe » problématique.

[0053] Pour lever toute ambiguïté, l'expression « coefficient de dilatation thermique » employée dans la présente description en relation à une couche ou à un substrat fait référence au coefficient de dilatation selon une direction définie dans le plan principal définissant cette couche ou ce substrat. Si le matériau est anisotrope, la valeur du coefficient retenu sera celle de plus grande amplitude. La valeur du coefficient est celle mesurée à température ambiante. Lorsque que l'on indique que ces coefficients sont « différents », on signifie que leur différence excède 10% du coefficient le plus petit. A contrario, lorsque l'on indique que ces coefficients sont identiques, on signifie que leur différence est inférieure ou égale à 10% du coefficient le plus petit.

[0054] Dans cette application radiofréquence dans laquelle la couche mince 7 est en matériau piézoélectrique, le support final 11 peut avantageusement comprendre un substrat de base 11a en silicium monocristallin, qui peut présenter une résistivité importante, supérieure à 1000 ohm.com. Le substrat de base 11a peut être muni d'une couche de piégeage de charges électriques 11b, par exemple une couche de silicium polycristallin. Dans un tel cas, la couche de piégeage 11b est disposée dans le substrat composite S entre la couche mince 7 piézoélectrique et le substrat de base 11a. Le substrat composite peut également comprendre une couche diélectrique enterrée 12 disposée entre la couche mince 7 piézoélectrique et le support final 11, en contact entre cette couche mince 7 et la couche de piégeage de charges 11b lorsque cette couche est présente. Avantageusement, la couche diélectrique enterrée 12 est en oxyde de silicium ou en oxynitrure de silicium. Ce dernier matériau permet notamment de former une barrière de diffusion de certaines espèces contenues dans la couche mince 7 vers la couche de piégeage de charges 11b (de l'hydrogène, du lithium par exemple), ce qui peut dégrader ses qualités de piégeage électriques.

[0055] Pour fabriquer un tel substrat composite S, on met en œuvre un procédé de report de la couche mince 7 sur la support final 11, à l'aide d'un double transfert de cette

couche, qui tire profit du procédé d'assemblage par adhésion moléculaire qui a fait l'objet de la première section de cette description.

[0056] Plus précisément, et en référence aux figures 4a à 4g, on forme tout d'abord une structure intermédiaire Si comprenant la couche mince 7 assemblée à un support intermédiaire 5 au niveau d'une première interface d'adhésion IA1. La couche mince 7 et le support intermédiaire 5 présentent des coefficients de dilatation thermique identique. Par exemple, la couche mince peut être prélevée d'un substrat donneur en tantalate de lithium et reportée sur un support intermédiaire 5 constitué d'un substrat massif de tantalate de lithium.

[0057] Le report peut être mise en œuvre par l'intermédiaire de la technologie Smart Cut™, comme cela est illustré sur les figures 4a à 4c. Cette technologie, bien connue de la personne du métier, propose de reporter la couche mince par assemblage du substrat donneur 6 et du support intermédiaire 5. Une couche de diélectrique 8, typiquement un oxyde de silicium, est préalablement formée sur le substrat donneur 6 et/ou sur le support intermédiaire 5 et se trouve intercalée, dans la structure intermédiaire Si, entre la couche mince reportée 7 et le support 5. La couche mince est définie dans le substrat donneur par introduction d'espèces légères, usuellement par implantation d'ions d'hydrogène et/ou d'hélium, ces espèces tendant à former une zone fragile 9 délimitant la couche mince. Le détachement de la couche mince 7 du reste du substrat donneur 6, et son report sur le support, est obtenu en sollicitant mécaniquement ou thermiquement l'assemblage formé du substrat donneur et du support ([Fig.4c]), ce qui provoque la fracture du substrat donneur au niveau de la zone fragile 9.

[0058] Alternativement à la mise en œuvre de la technologie Smart Cut, on peut prévoir d'amincir mécaniquement et/ou chimiquement le substrat donneur, après son assemblage au support intermédiaire, pour définir la couche mince. Dans cette approche également on prévoir une couche de diélectrique sur le substrat donneur et/ou sur le support intermédiaire pour en faciliter l'assemblage.

[0059] Que la couche mince soit formée par détachement au niveau d'une zone fragile du substrat donneur ou par amincissement de ce substrat donneur, son report requiert que le substrat donneur 6 soit rendu solidaire du support intermédiaire 5 au niveau d'une première interface d'adhésion A1 qui présente une énergie suffisante. A cet effet, on peut prévoir d'activer par plasma l'une au moins des faces du substrat donneur 6 et du support intermédiaire 5 qui sont destiné à être assemblés. On peut également prévoir un recuit modéré de la structure intermédiaire Si, avant le détachement de la couche mince 7, afin de renforcer l'énergie d'adhésion et permettre le transfert de la couche mince.

[0060] On note que, le substrat donneur 6 d'où est prélevé la couche mince 7 et le support intermédiaire présentant les mêmes coefficients de dilatation thermique, cette étape

de préparation du support intermédiaire 5 peut comprendre des étapes de traitement thermique sans générer de contraintes susceptibles de l'endommager. Dans le cas d'un substrat donneur et d'un support intermédiaire en tantalate de lithium, on peut élever l'assemblage formé du substrat donneur 6 et du support intermédiaire 7 jusqu'à une température de 200°C à 300°C, suffisante pour provoquer la fracture du substrat donneur et le report de la couche mince 7 dans le cadre d'un report mis en œuvre selon la technologie Smart Cut. Cette température est supérieure à celle qui aurait pu être appliquée à un assemblage formé du substrat donneur 5 et du substrat final 11 en silicium, du fait de la grande différence de coefficient de dilatation thermique.

[0061] On peut prévoir à l'issue de l'étape de report de la couche mince 7 ([Fig.4c]) d'appliquer une étape de finition, notamment lorsque celle-ci a été reportée selon la technologie Smart Cut, pour en restaurer la qualité cristallographique et de surface de la couche mince 7. Il peut s'agir de recuire cette couche sous une atmosphère neutre ou oxydante et/ou de l'amincir par exemple par polissage mécanochimique ou par gravure ionique.

[0062] Poursuivant la description du procédé de report qui fait l'objet de cette partie de la description, celui-ci prévoit ensuite ([Fig.4d]) de former une couche superficielle diélectrique 10 sur la face exposée de la couche mince 7 de la structure intermédiaire Si. Cette couche superficielle diélectrique 10 est destinée à former, au moins en partie la couche diélectrique enterrée 12 du substrat composite S. Elle permet également de déployer l'étape d'activation et d'adhésion moléculaire qui a été présentée dans la section précédente de la description. Aussi, cette couche diélectrique superficielle 10 peut être en oxyde de silicium ou en oxynitrure de silicium. Elle est avantageusement déposée, par exemple selon une technique PECVD de dépôt. Elle peut présenter une épaisseur quelconque, et préférentiellement comprise entre 10nm et 50nm, et plus préférentiellement encore entre, strictement, 30nm et 90 nm. Dans une telle gamme, la couche diélectrique superficielle présente une épaisseur suffisante pour compenser l'amincissement pouvant se produire au cours de l'étape suivante d'activation et ne présente pas une rugosité excessive, qui ne pourrait être suffisamment réduite au cours de cette étape d'activation.

[0063] Préférentiellement, et lorsque la couche diélectrique superficielle 10 est choisie dans la gamme d'épaisseur précitée, le procédé de report est dépourvu de tout traitement, autre que l'étape d'activation, pour en réduire la rugosité. Il est dans ce cas notamment dépourvu de toute étape de polissage mécano-chimique visant à réduire la rugosité de la couche diélectrique superficielle 11, ce qui est très avantageux.

[0064] Dans une étape suivante illustrée sur la [Fig.4e], on active la couche superficielle diélectrique 10 en l'exposant à un plasma formé entre deux électrodes soumises à une densité de puissance radiofréquence strictement supérieure à 1,1 W/cm^2 d'une

chambre d'activation dans laquelle est introduit un flux maitrisé d'un gaz comprenant du soufre. La fréquence du signal radiofréquence peut être choisie à 13MHz ou de l'ordre de 13MHz, à 25% près. Comme cela a été présenté dans la section précédente de cette description une telle activation permet de préparer la surface, notamment en réduisant la rugosité, et produire une énergie d'adhésion particulièrement élevée lors de l'étape suivante d'adhésion moléculaire.

[0065] Toutes les variantes décrite dans la première section de cette description peuvent être mis en œuvre dans le cadre de la présente application. L'exposition au plasma peut notamment être conduite pendant une durée d'activation comprise entre 15 secondes et 2 minutes pendant laquelle on introduit dans la chambre d'activation, outre le gaz comprenant du soufre, un flux maitrisé d'oxygène ou d'azote. Le flux maitrisé d'un gaz comprenant du soufre, ce gaz pouvant être de l'hexafluorure de soufre, est introduit dans la chambre d'activation pendant une période déterminée de la durée d'activation, par exemple une durée inférieure à 10s. Cette période peut être placée au milieu de la durée d'activation, et être précédée et suivi de périodes pendant lesquelles seul le flux d'oxygène ou d'azote est introduit dans la chambre d'activation. On peut également maitriser également le niveau de vide présent dans la chambre d'activation pendant la période d'activation, par exemple pour la placer à une pression inférieure à 50 milli-Torr (6,66 Pa), préférentiellement à 30 milli-Torr (4 Pa).

[0066] Quelles que soient les conditions précise avec laquelle l'étape d'activation de la couche diélectrique superficielle 10 est conduite, celle-ci est suivi de l'assemblage de la couche mince 7, par l'intermédiaire de la couche diélectrique superficielle 10, au support final 11 ([Fig.4f]). On définit ainsi une seconde interface d'adhésion IA2 de la couche mince 7, cette seconde interface d'adhésion IA2 présentant, du fait de l'étape d'activation de la couche diélectrique superficielle 10, une énergie d'adhésion supérieure à celle de la première interface IA1 qui retient la couche mince 7 au support intermédiaire 5.

[0067] Dans le cadre de l'exemple pris en illustration, le support final 11 est composé d'un substrat de base 11a en silicium monocristallin muni d'une couche de piégeage des charges électriques 11b. On peut prévoir que cette couche de piégeage 11b ait été préalablement munie elle-même d'une couche diélectrique, par exemple par oxydation ou par dépôt. Cette couche diélectrique, lorsqu'elle est présente, se combine avec la couche diélectrique superficielle 10 formée sur la couche mince 7 pour constituer la couche diélectrique enterrée 12 du substrat composite S.

[0068] Cet assemblage met en œuvre une technique d'adhésion moléculaire, c'est-à-dire la mise en contact du support final 11 et de la couche diélectrique superficielle 10, puis l'initiation et la propagation d'une onde de collage entre les faces principales mises en contact pour les assembler l'une à l'autre.

[0069] On peut prévoir d'activer par plasma le support final 11 avant son assemblage par adhésion moléculaire à la couche diélectrique superficielle 10. Cette activation plasma peut être identique à celle appliquée à la couche diélectrique superficielle 10 ou différente. Par exemple il peut s'agir d'exposer ce support final 11 à un plasma constitué d'oxygène ou d'azote, et sans introduire dans la chambre d'activation une quantité maitrisée d'un gaz comprenant du soufre.

[0070] Dans tous les cas, à l'issue de cette étape d'assemblage représentée sur la [Fig.4f], la couche mince 7 se retrouve en sandwich entre d'une part le support intermédiaire 5, au niveau d'une première interface d'adhésion IA1, et d'autre part le support final 11, au niveau d'une seconde interface d'adhésion IA2. Du fait de l'étape particulière d'activation de la couche superficielle, l'énergie d'adhésion de seconde interface est supérieure à celle de la première interface.

[0071] Pour renforcer l'énergie d'adhésion de la seconde interface IA2 on peut, dans cet exemple, exposer la structure comportant le support temporaire et le support final à une température n'excédant pas 100°C.

[0072] Une étape finale du procédé, représentée sur la [Fig.4g], de report vise à démonter le support intermédiaire de la structure en sandwich dans laquelle est disposée la couche mince et ainsi compléter le report la couche mince 7 sur le support final 11. A cet effet, on sollicite mécaniquement le support final et/ou le support intermédiaire. Cette sollicitation mécanique tend à faire céder l'interface d'adhésion présentant l'énergie la plus faible, c'est-à-dire la première interface IA1 pour libérer la couche mince 7 du support intermédiaire 5.

[0073] L'étape de sollicitation mécanique peut comprendre l'insertion d'une lame, ou plus généralement d'un outil, entre le support intermédiaire 5 et le support final 11 et l'application par la lame ou par l'outil d'un effort d'écartement des deux supports 5,11.

[0074] On peut alors éliminer la couche de diélectrique 8, ou des résidus de cette couche, qui peut couvrir la couche mince 7, pour finaliser la préparation du substrat composite S tel que celui-ci est illustré sur la [Fig.5].

[0075] 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.

[0076] Ainsi, l'application qui vient d'être décrite n'est nullement limitée à une couche mince 7 en tantalate de lithium. Elle s'applique plus généralement à une couche mince 7 constituée de tout matériau. Lorsque ce matériau est choisi pour présenter des propriétés piézoélectriques comme c'est le cas dans l'exemple décrit, il peut également s'agir de niobate de lithium.

[0077] Bien que l'on ait pris ici l'hexafluorure de soufre en exemple comme gaz comprenant du soufre (et du fluor), l'invention n'est nullement limitée à l'utilisation de ce gaz. On

peut notamment prévoir d'utiliser en remplacement tout gaz soufré tel que du Fluorure de sulfuryle (SO_2F_2) ou du Tétrafluorure de thionyle (SO_2F_4).

[0078] L'étape d'activation conforme à l'invention peut s'appliquer à une unique couche superficielle diélectrique formée sur l'un des deux substrats à assembler, même si ces deux substrats comportent une telle couche superficielle diélectrique. L'étape d'activation peut également s'appliquer à chacun des substrats, et dans ce cas chacun est muni d'une couche superficielle diélectrique.

[0079] Cette couche diélectrique superficielle peut être formée de SiO_2 comme cela a été pris en exemple dans la présente description. Mais il peut s'agir plus généralement d'une couche diélectrique de toute nature, par exemple en SiON, ou en nitrure de silicium.

Revendications

[Revendication 1] Procédé d'assemblage par adhésion moléculaire de deux substrats présentant chacun une face principale, l'un au moins des deux substrats étant pourvu d'une couche superficielle diélectrique du côté de sa face principale, le procédé comprenant les étapes suivantes :
(a) l'activation de la couche superficielle diélectrique, l'activation comprenant l'exposition de la couche superficielle diélectrique à un plasma formé entre deux électrodes (4a,4b) d'une chambre d'activation (3), l'exposition au plasma étant conduite pendant une durée d'activation comprise entre 15 secondes et 2 minutes pendant laquelle une puissance radiofréquence est appliquée à l'une des électrodes et comprenant l'introduction dans la chambre d'activation (3) d'un flux maitrisé d'oxygène ou d'azote et d'un flux maitrisé d'un gaz comprenant du soufre;
(b) la mise en contact des faces principales des deux substrats, puis ;
(b) l'initiation et la propagation d'une onde de collage entre les faces principales des deux substrats pour les assembler l'un à l'autre ;
le procédé étant caractérisé en ce que la puissance radiofréquence présente une densité strictement supérieure à 1,1 W/cm^2.
règle 91, 17.02.2025

[Revendication 2] Procédé d' assemblage selon la revendication précédente dans lequel la densité de puissance radiofréquence est comprise entre 1,4 W/ cm^2 et 1,7 W/cm^2.
règle 91, 17.02.2025

[Revendication 3] Procédé d'assemblage selon la revendication précédente dans lequel la chambre d'activation (3) est placée à une pression inférieure à 50 milli-Torr (6,66 Pa), préférentiellement à 30 milli-Torr (4 Pa) .
règle 91, 17.02.2025

[Revendication 4] Procédé d' assemblage selon l ' une des revendications précédentes dans lequel le flux maitrisé d' oxygène ou d' azote est formé d' un flux d' oxygène de 75 sccm .
règle 91, 17.02.2025

[Revendication 5] Procédé d' assemblage selon l ' une des revendications précédentes dans lequel le gaz comprenant du soufre est de l ' hexafluorure de soufre .
règle 91, 17.02.2025

[Revendication 6] Procédé d' assemblage selon la revendication précédente dans lequel le flux maitrisé d' hexafluorure de soufre est formé d' un flux flux inférieur à 7 sccm, par exemple de 4 sccm.
règle 91, 17.02.2025

[Revendication 7] Procédé d' assemblage selon l ' une des revendications précédentes dans lequel le flux maitrisé d'hexafluorure de soufre est introduit
règle 91, 17.02.2025

	dans la chambre d' activation (3) pendant une période déterminée de la durée d'activation.	
[Revendication 8]	Procédé d' assemblage selon la revendication précédente dans lequel la période déterminée présente une durée inférieure à 10s .	règle 91, 17.02.2025
[Revendication 9]	Procédé d' assemblage selon l' une des deux revendications précédentes dans lequel la période déterminée est respectivement précédée et suivie de périodes pendant laquelle seul le flux d' oxygène ou d' azote est introduit dans la chambre d' activation .	règle 91, 17.02.2025
[Revendication 10]	Procédé d' assemblage selon l' une des revendications précédentes comprenant une étape de dépôt de la couche superficielle diélectrique sur l' un au moins des deux substrats .	règle 91, 17.02.2025
[Revendication 11]	Procédé d' assemblage selon la revendication précédente dans lequel dans lequel le dépôt est réalisé par une technique de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma .	règle 91, 17.02.2025
[Revendication 12]	Procédé d' assemblage selon l ' une des deux revendications précédentes dans lequel la couche superficielle diélectrique présente une épaisseur inférieure à 90nm.	règle 91, 17.02.2025
[Revendication 13]	Procédé d' assemblage selon l' une des revendications précédentes dans lequel l ' étape d' activation est la seule étape appliquée à la couche superficielle diélectrique pour en réduire la rugosité .	règle 91, 17.02.2025