Description

Titre de l'invention : Procédé de fabrication d'une couche ferroélectrique reportée sur un substrat et de polarisation à homogénéité améliorée

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

[0001] L'invention concerne un procédé de fabrication d'unecouche ferroélectrique reportée sur un substrat et de polarisation à homogénéité améliorée dans son épaisseur.
Une telle structure peut être exploitée pour former par exemple des composants radiofréquences (RF) en particulier des composants à ondes élastiques, en particulier des composants à ondes acoustique de surface (SAW) ou de volume (BAW).

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE

[0002] Il existe plusieurs types d'applications mettant à profit ou influencées par les propriétés de polarisation des matériaux ferroélectriques et la présence de domaines de polarisations opposées les unes aux autres. On peut citer des dispositifs électroacoustiques tels que les dispositifs à ondes acoustiques de surface (dispositifs SAW pour Surface Acoustic Wave en terminologie anglaise) ou les dispositifs à ondes acoustiques de volume (dispositifs BAW pour Bulk Acoustic Wave en terminologie anglaise). L'existence de ces applications a motivé le développement de procédés de contrôle des domaines de polarisation des couches ferroélectrique.

[0003] L'article " "Seeing Is Believing"-In-Depth Analysis by Co-Imaging of Periodically-Poled X-Cut Lithium Niobate Thin Films", de Sven Reitzig et al., publié dans Crystals 2021, 11, 288, décrit une couche de niobate de lithium intégrée sur un substrat de silicium par l'intermédiaire d'une couche de silice, et le contrôle de la polarisation de cette couche parallèlement au plan dans lequel elle s'étend, par application d'une tension entre des électrodes disposées de manière périodique sur la surface libre de la couche. Il est à noter que, dans une telle structure ne comportant des électrodes que sur la seule face libre du cristal, le contrôle d'une polarisation qui serait perpendiculaire au substrat au moyen d'un champ électrique, en l'absence d'électrode enterrée, requerrait des tensions risquant de provoquer le claquage de la couche de silice.

[0004] Le document EP 0 592 226 A1 décrit un dispositif de conversion de fréquence optique obtenu par la juxtaposition périodique de bandes parallèles de polarisation inversée au niveau d'une face d'un substrat ferroélectrique présentant une polarisation spontanée perpendiculaire au plan d'extension du substrat, c'est-à-dire perpendiculaire à cette face. L'inversion de la polarisation selon les bandes est obtenue par réalisation d'un échange protonique à travers un masque.

[0005] Le document WO 2005/052682 A1 décrit l'inversement localisé de la polarisation d'un cristal ferroélectrique de polarisation spontanée perpendiculaire à l'une de ses faces, par application d'un champ électrique selon des bandes périodiques juxtaposées, au moyen d'électrodes à gel disposées sur cette face et la face opposée du cristal.

[0006] Les structure et procédés présentés ci-dessus, s'ils permettent effectivement de contrôler les domaines de polarisation d'une couche ferroélectrique à sa surface, restent peu pratiques et ne permettent pas le contrôle de la polarisation dans l'épaisseur de cette couche ou son intégration sur un support.

[0007] En réponse à ces insuffisances, la demande de brevet internationale de numéro de publication WO 2020/200986 A1 et les demandes de brevets en France de numéros de dépôts FR2301220 et FR2301221 proposent des techniques de report de couches ferroélectriques sur un substrat. Cependant, ces techniques ne résolvent pas le problème de façon totalement satisfaisante, en ce que, en fin de fabrication, les couches ferroélectriques reportées peuvent présenter des inhomogénéités incontrôlées de polarisation dans l'épaisseur de la couche, en particulier en ce qui concerne le report de couches ferroélectriques ayant une polarisation négative sur le substrat support final.

Exposé de l'invention

[0008] Un objet de l'invention est de fournir un procédé de fabrication d'une couche ferroélectrique reportée sur un substrat, le procédé corrigeant ou prévenant les éventuelles inhomogénéités de polarisation qui pourraient apparaître dans leur épaisseur, en particulier pour la situation où l'on cherche à obtenir une couche ferroélectrique de polarisation négative, c'est-à-dire orientée vers le support de la couche ferroélectrique.

[0009] En vue de la réalisation de ces objets, un aspect de l'invention est un procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche ferroélectrique de polarisation négative reposant sur un ensemble de support, comprenant les étapes de fournir une structure composite de départ comprenant une couche ferroélectrique de polarisation positive reposant sur l'ensemble de support ; et implanter des ions hydrogène dans la structure composite de départ puis appliquer un traitement thermique à la structure composite de départ de manière à inverser la polarisation de la couche ferroélectrique de la structure composite de départ.

[0010] Un avantage du procédé selon l'invention est sa capacité à produire une structure incluant une couche ferroélectrique reportée sur un substrat et avec une polarisation négative, orientée vers l'interface entre la couche ferroélectrique et son support, présentant une homogénéité améliorée sur son épaisseur par rapport aux procédés connus de fabrications. Une telle structure facilite par exemple l'intégration de

fonctions d'acoustique de volume tout en maintenant un coût bas et en permettant un haut niveau de performances.

[0011] Selon des caractéristiques additionnelles non-limitative de l'invention, considérées individuellement ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

[0012] - les ions hydrogène peuvent être implantés de manière à ce que la structure composite de départ présente une concentration d'atomes hydrogène comprise entre 10^{19} et 10^{22} at/cm^3 ;

[0013] - le traitement thermique appliqué peut être paramétré pour amener la couche ferroélectrique à une température comprise entre 300°C et la température de Curie de cette couche ferroélectrique, et préférentiellement supérieure ou égale à 450°C, 500° ou 550° et inférieure à 600°C ;

[0014] - la couche ferroélectrique peut s'étendre selon une direction horizontale et la polarisation positive de la structure composite de départ peut faire un angle compris dans une plage angulaire allant de 20° à 160° par rapport à cette direction horizontale ;

[0015] - la couche ferroélectrique peut être une couche de niobate de lithium ou de tantalate de lithium ;

[0016] - le procédé peut en outre comprendre une étape de polissage de la couche ferroélectrique ;

[0017] - le procédé peut en outre comprendre l'obtention de la structure de départ au moyen d'un procédé pouvant comprendre les étapes de fournir l'ensemble de support ; de fournir un substrat donneur de matériau ferroélectrique monocristallin présentant une polarisation négative par rapport à une face de substrat donneur ; de former un plan de fragilisation dans le substrat donneur ; d'assembler le substrat donneur à l'ensemble de support par mise en contact de la face avec l'ensemble de support ; et de détacher une partie du substrat donneur au niveau du plan de fragilisation de manière à laisser la couche ferroélectrique fixée sur l'ensemble de support et obtenir la structure de départ ;

[0018] - le procédé peut en outre comprendre l'obtention de la structure de départ au moyen d'un procédé comprenant les étapes de fournir l'ensemble de support ; de fournir un substrat donneur de matériau ferroélectrique monocristallin présentant une polarisation positive par rapport à une face de cette plaquette ; de former un plan de fragilisation dans le substrat donneur par implantation d'hélium à travers la face ; d'assembler le substrat donneur à l'ensemble de support par mise en contact de la face avec l'ensemble de support ; de détacher une partie du substrat donneur au niveau du plan de fragilisation de manière à laisser la couche ferroélectrique fixée sur l'ensemble de support pour obtenir une structure intermédiaire ; et d'appliquer un traitement thermique à la structure intermédiaire de manière à inverser la polarisation de la couche ferroélectrique et obtenir la structure de départ ; et

[0019] - le traitement thermique appliqué à la structure peut être paramétré pour amener la couche ferroélectrique à une température comprise entre 300°C et la température de Curie de cette couche ferroélectrique, et préférentiellement supérieure ou égale à 450°C, 500° ou 550° et inférieure à 600°C.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0020] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée de l'invention qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquels :

[0021] [Fig.1] La [Fig.1] illustre des coupes cristallines de monocristaux ;

[0022] [Fig.2] La [Fig.2] représente le renversement de la polarisation d'une structure de départ comprenant une couche ferroélectrique reportée sur un support et de polarisation positive ;

[0023] [Fig.3] La [Fig.3] est un diagramme d'un procédé de correction de la polarisation d'un matériau ferroélectrique au moyen d'une implantation ionique, comme illustré par la [Fig.2] ;

[0024] [Fig.4] La [Fig.4] est un diagramme d'un premier procédé de fabrication de la structure de départ de la [Fig.2] ;

[0025] [Fig.5] La [Fig.5] illustre le premier procédé de fabrication ;

[0026] [Fig.6] La [Fig.6] illustre l'absence d'influence d'une concentration d'hydrogène implanté sur la polarisation d'une couche ferroélectrique ;

[0027] [Fig.7] La [Fig.7] est un diagramme d'un second procédé de fabrication de la structure de départ de la [Fig.2] ;

[0028] [Fig.8] La [Fig.8] illustre le second procédé de fabrication ;

[0029] [Fig.9] La [Fig.9] illustre un plage angulaire de polarisations.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

Premier mode de réalisation de l'invention

[0030] Selon le dispositif piézoélectrique que l'on souhaite réaliser, il convient de choisir une orientation pour la polarisation de la couche active de matériau piézoélectrique, qui est constituée d'une couche de matériau ferroélectrique monocristallin.

[0031] Ce matériau ferroélectrique peut être obtenu par croissance cristalline selon la méthode dite « Czochralski » qui permet d'obtenir un matériau monocristallin massif sous la forme d'un cylindre allongé dit « boule » ou « lingot » en tirant un germe cristallin d'orientation choisie baignant dans un matériau fondu correspondant au cristal à former, selon une direction de tirage. Le monocristal croît selon cette direction de tirage. Des plaquettes du matériau ferroélectrique sont alors obtenues par découpe du lingot à un angle déterminé par rapport à sa direction de croissance, puis préparées et intégrées en tant que couche ferroélectrique dans, par exemple, un dispositif piézoélectrique.

[0032] L'orientation de la polarisation de la couche dépend de l'orientation cristalline de la plaquette découpée, qui ne correspond pas, dans le cas général, à la direction de la croissance du monocristal. Bien entendu l'homme de métier sait choisir le germe le plus approprié et proche de l'orientation cristalline voulue pour le tirage du lingot afin de réduire les pertes de matière lors de la découpe et de l'usinage en plaquettes circulaires.

[0033] La figure 1 illustre en (A) et (B) les orientations de couches de $LiTaO_3$ désignées par 42RY et -138RY, respectivement. Ces appellations dérivent du repérage de l'orientation cristallographique de ces couches, correspondant à des rotations respectives de 42° et -138° des axes y et z par rapport au sens trigonométrique autour de l'axe x pour donner les axes x', y' et z', les axes x, y et z correspondant aux axes cristallographiques propres du monocristal et l'axe y' étant aligné avec la direction normale à la surface découpée et usinée. Plus spécifiquement, les axes x, y et z correspondent aux axes $[\bar{1}\bar{1}20]$, $[01\bar{1}0]$, et $[0001]$, respectivement.

[0034] Après le tirage selon une direction choisie il est connu par l'homme de métier de réaliser une polarisation par application d'un champ électrique dans la direction z lors du passage en température en-dessous de la température de Curie pour déterminer le sens de la polarisation.

[0035] De manière conventionnelle, une polarisation dite négative est une polarisation d'orientation dirigée vers l'intérieur du matériau ou de la structure concerné, ou autrement dit la projection de l'axe z sur l'axe y' est négative.

[0036] Conventionnellement, pour une couche ferroélectrique fixée à un substrat, on désignera comme une couche de polarisation positive une couche dont l'orientation de la polarisation est dirigée vers la surface libre de la couche.

[0037] Inversement, toujours pour une couche ferroélectrique fixée à un substrat, on désignera comme une couche de polarisation négative une couche dont l'orientation de la polarisation est dirigée vers l'intérieur, c'est à dire vers l'interface entre la couche et son support.

[0038] La [Fig.2] illustre en (A) une situation dans laquelle la une couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ de $LiTaO_3$ RY42 présente une polarisation P_{42} positive : elle est orientée vers la surface libre, à l'opposé de son substrat, ou ensemble support Sprt.Set, ce dernier étant ici constitué d'une couche intermédiaire Int sur une couche de support Sprt. On peut aussi dire que la composante de la polarisation selon la direction verticale Vert perpendiculaire à la couche ferroélectrique et orientée de l'ensemble support vers la couche ferroélectrique, est positive. Cette composante est obtenue par une projection normale de la polarisation sur la direction Vert.

[0039] Pour obtenir un dispositif piézoélectrique muni d'une couche ferroélectrique de polarisation négative, il faut choisir à l'avance les caractéristiques de la plaquette de matériau ferroélectrique employée pour fabriquer le dispositif, et, au besoin, corriger l'orientation de la polarisation.

[0040] La [Fig.2] illustre le principe général d'un procédé de fabrication de la structure EndStruct illustrée en (B) et obtenue par inversion de la polarisation de la structure StartStruct illustrée en (A).

[0041] Les caractéristiques de l'ensemble de support peuvent affecter les propriétés acoustiques de la couche $Ferro_{lay}$, ce qui est d'importance dans le cas d'une structure faisant partie d'un dispositif acoustique. La nature et l'épaisseur de ces couches peuvent donc également être déterminantes pour réaliser le traitement recherché d'un signal électrique, ou pour le moins influencer ce traitement. Dans l'exemple représenté sur la [Fig.2], l'ensemble support peut comprendre la couche de support Sprt, et la couche intermédiaire Int d'assemblage diélectrique, de préférence comprenant un oxyde directement en contact avec la couche mince ferroélectrique $Ferro_{lay}$.

[0042] Pour des raisons de disponibilité et de coût, la couche de support Sprt peut être en silicium. Il peut s'agir d'un support constitué d'un substrat de base massif en silicium monocristallin, mais l'invention n'est pas limitée à ce support qui peut, plus généralement, être constitué de tout matériau, par exemple du silicium, même électriquement isolant tel que du saphir ou du verre. La couche de support Sprt, lorsque qu'elle est formée d'un substrat massif présente typiquement une épaisseur de plusieurs centaines de microns. On peut limiter la densité des charges électriques, trous ou électrons, qui sont susceptibles de se déplacer dans la couche de support et qui pourraient affecter le bon fonctionnement d'un composant RF qui serait formé sur la base de la structure Struct. La couche de support Sprt peut ainsi être constituée d'un substrat de silicium haute résistivité, c'est-à-dire présentant une résistivité supérieure à 1000 ohm-centimètre, et plus préférentiellement encore supérieure à 3000 ohm-centimètre. Pour appuyer le caractère résistif de la couche de support Sprt, on peut prévoir de munir la couche support Sprt d'une couche de piégeage de charges du côté de la couche ferroélectrique, par exemple formée de silicium polycristallin. On peut bien entendu prévoir de former cette couche de piégeage de charges par d'autre technique que celle prévoyant une couche formée de silicium polycristallin. Cette couche peut également comprendre du carbone ou être constituée de ou comprendre du carbure de silicium ou un alliage de silicium et de carbone. Il peut alternativement exemple s'agir de réaliser les pièges électriques par bombardement ionique d'espèces relativement lourdes (par exemple de l'argon) dans une partie superficielle de la couche de support afin d'y créer des défauts cristallins apte à piéger des charges électriques. On peut également prévoir une couche de piégeage de charges formée d'une matière

poreuse, par exemple par porosification d'une partie superficielle de la couche de support Sprt lorsque celle-ci est en silicium. Mais l'invention n'est pas limitée à une couche de support présentant de telles caractéristiques.

[0043] A titre d'exemple, la couche intermédiaire Int peut être en oxyde de silicium, en nitrure de silicium, ou être formée d'un empilement de couches composées de ces matériaux.

[0044] Alternativement, la couche intermédiaire peut être une couche métallique électriquement conductrice interposée entre la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ et la couche de support Sprt. Dans cet exemple, la couche métallique Int est en contact direct avec chacun du support Sprt et de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$. La couche Int pourra dans ce cas être utilisée par la suite en tant qu'électrode enterrée destinée à appliquer un champ électrique à la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$.

[0045] La présence d'une couche intermédiaire Int ne représente qu'une option. Toutes les applications ne requièrent pas la présence d'une telle couche.

[0046] De manière conventionnelle, la structure StartStruct et la structure EndStruct peuvent se présenter sous la forme d'une plaquette circulaire dont le diamètre peut être de 100, 200, 300 voire même 450 mm, mais l'invention n'est nullement limitée à ces dimensions ou à cette forme.

[0047] La couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ peut être constituée d'un matériau ferroélectrique monocristallin, tel que du tantalate de lithium $LiTaO_3$ ou du niobate de lithium LiNbO3, ou encore des matériaux tels que $BaTiO_3$, $PbZrTiO_3$, $KNbO_3$, $BaZrO_3$, $PbTiO_3$ ou de $KTaO_3$. Ces matériaux présentent également des propriétés piézoélectriques. D'une manière générale, la couche ferroélectrique peut présenter une épaisseur comprise entre 10 nanomètres et 10 microns, selon l'application envisagée de la structure EndStruct et les performances attendues des composants, mais l'invention n'exclut pas l'utilisation d'épaisseurs différentes, toujours selon l'application envisagée. On rappelle qu'un matériau ferroélectrique est un matériau qui possède une polarisation électrique à l'état naturel, polarisation qui peut être renversée par l'application d'un champ électrique extérieur supérieur au champ coercitif du matériau. Comme illustré dans le présent document, la couche ferroélectrique présente préférablement une polarisation monodomaine, c'est-à-dire que tous les moments dipolaires sont alignés parallèlement les uns aux autres suivant une direction donnée. Ici, la direction donnée est inclinée par rapport au plan de la couche ferroélectrique, c'est-à-dire inclinée par rapport à la face libre de cette couche.

[0048] En référence aux figures 2 et 3, la structure EndStruct illustrée en (B) peut être obtenue par inversion de la polarisation de la structure StartStruct illustrée en (A) de la [Fig.2], selon un procédé de fabrication 100. Le procédé de fabrication, résumé par

le diagramme de la [Fig.3] comprend les étapes S110, S120, S130 et S140, effectuées dans cet ordre.

[0049] L'étape S110 est une étape de fourniture d'une structure de départ StartStruct constitué d'une couche de support Sprt, d'une couche intermédiaire Int et d'une couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ telles que définis plus haut. La couche $Ferro_{lay}$ est dans cet exemple une couche de $LiTaO_3$ RY42 présentant une polarisation P_{42} positive. Plus généralement la couche pourrait être constituée d'un autre matériau ferroélectrique ayant une autre polarisation tant que cette polarisation est positive.

[0050] L'étape S120 est une étape d'implantations d'ions hydrogène H+ dans la structure StartStruct par la face libre de la couche $Ferro_{lay}$. L'énergie d'implantation est choisie de manière à ce que le parcours projeté R_P des ions hydrogène implantés soit tel que la profondeur $D(R_{PMax})$ de son maximum R_{PMax} atteigne ou dépasse la profondeur de l'interface entre la couche Ferrolay et la couche Int, et se situe de préférence dans la couche Int, ou bien dans la couche $Ferro_{lay}$, ou encore à proximité de la couche Int. Cette situation est illustrée schématiquement en (A') de la [Fig.2] qui représente la concentration [H] d'hydrogène selon la profondeur Dpth dans la structure considérée à partir de la surface libre de la couche $Ferro_{lay}$, en particulier pour une configuration pour laquelle la profondeur $D(R_{PMax})$ du maximum R_{PMax} dépasse la profondeur de l'interface entre la couche Ferrolay et la couche Int. La distance entre la profondeur de l'interface et la profondeur $D(R_{PMax})$ peut être choisie d'environ 200 nm pour éviter une implantation trop profonde dans l'oxyde. Dans un autre mode de réalisation, cette distance peut atteindre ou dépasser 500 nm la majorité des ions et des dégâts se situe alors entièrement dans la couche Int ce qui peut être avantageux. Dans un autre mode de réalisation encore, la profondeur $D(R_{PMax})$ peut se situer à environ 50 à 100 nm de l'interface mais cette fois dans la couche Ferrolay, ce qui permet de laisser l'interface et aussi la couche Int intactes et sans dommage d'implantation.

[0051] La répartition en ions hydrogène obtenue, avec un gradient de concentration d'hydrogène, génère l'apparition d'un champ électrique E_H dirigé vers le maximum de la concentration d'hydrogène. Un gradient suffisant peut être obtenu par exemple au moyen d'un dopage à l'hydrogène entraînant une concentration d'hydrogène dépassant un seuil de 10^{19} atomes d'hydrogène par centimètre cube, par exemple avec une concentration d'hydrogène comprise entre 10^{19} et 10^{22} atomes/cm^3 au niveau d'un plan parallèle à la surface libre de la couche $Ferro_{lay}$.

[0052] L'étape S130 est une étape de traitement thermique de la structure, ce traitement thermique de prévu pour amener la couche ferroélectrique à une température comprise entre 300°C et la température de Curie du matériau ferroélectrique de la couche $Ferro_{lay}$ (et préférentiellement supérieure ou égale à 450°C, 500° ou 550°, jusqu'à 600°)

pendant une durée comprise entre 30 minutes et 10 heures. Ce traitement thermique est préférentiellement réalisé en exposant la face libre de la couche diélectrique à une atmosphère gazeuse oxydante ou neutre.

[0053] La présence du champ électrique E_H combinée à un traitement thermique à une température de l'ordre de 300° à 600°C provoque une inversion de la polarisation du matériau ferroélectrique à la faveur de l'activation thermique provoquée par la hausse de température. Plus spécifiquement, lors du traitement thermique, la polarisation du matériau ferroélectrique tend à prendre la même orientation que le champ E_H, inversant donc la polarisation lorsque E_H est orienté dans une direction opposée à celle du matériau avant application du traitement thermique. C'est précisément le cas ici, avec une polarisation positive et un champ électrique E_H dirigé de la surface libre de la couche $Ferro_{lay}$ vers son interface avec la couche Int (en fait, vers le plan de profondeur $D(R_{PMax})$, comme illustré en (A')).

[0054] Dans le cas d'une polarisation P_{42} de la couche ferroélectrique, l'inversion de la polarisation entraînera l'apparition d'une polarisation P_{-138}, opposée à la polarisation P_{42} de départ.

[0055] L'étape S140 est une étape de polissage de la face libre de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$, par exemple par des techniques d'amincissement mécanique, mécano-chimique et/ou de gravure chimique. Ce polissage permet de préparer la face libre pour que (i) elle présente une rugosité faible, par exemple inférieure à 0,5nm RMS 5x5 µm par mesure par force atomique (AFM) et (ii) on enlève une couche superficielle de la couche Ferrolay, qui peut présenter une polarisation inhomogène et/ou une couche d'oxyde en raison de phénomènes de surface. On peut par exemple prévoir un enlèvement de 50 nm d'épaisseur. On améliore ainsi l'homogénéité de la couche $Ferro_{lay}$ et de sa polarisation.

[0056] A la suite de l'étape S140, on a obtenu la structure EndStruct recherchée, qui est prête à être intégrée dans le processus de fabrication d'un composant complexe Dev tel qu'un composant à ondes acoustique de surface (SAW) ou de volume (BAW).

[0057] Obtention de la structure de départ StartStruct

[0058] Les figures 4 à 8 illustrent deux procédés alternatifs 1 et 2 d'obtention de la structure de départ StartStrcut du procédé 100.

[0059] Procédé alternatif 1

[0060] Les figures 4 à 6 illustrent le procédé alternatif 1 d'obtention de la structure StartStruct, procédé 200 résumé par le diagramme de la [Fig.4] et comprenant les étapes suivantes.

[0061] Une étape S210 de préparation d'un ensemble de support Sprt.Set, constitué ici de la couche de support Sprt munie de la couche intermédiaire Int à sa surface comme illustrée en (A) de la [Fig.5].

[0062] Une étape S220 de choix et de fourniture d'une plaquette de matériau ferroélectrique monocristallin pour sa composition chimique et son orientation cristalline par rapport à son plan d'extension, afin qu'elle serve en tant que substrat donneur ferroélectrique $Ferro_{sub}$. C'est dans cette plaquette que sera formée la couche $Ferro_{lay}$. La plaquette choisie présente une polarisation négative monodomaine, c'est à dire ayant une composante orientée à l'opposée de la direction de sa face désignée par Top, c'est-à-dire que la plaquette a une orientation cristalline comprise entre 0RY et -180RY, comme illustré par la polarisation P_{-138} en (B) de la [Fig.6]. Il s'agit d'une polarisation opposée en sens à celle de la polarisation de la structure recherchée EndStruct.

[0063] Une étape S240 de préparation du substrat donneur ferroélectrique $Ferro_{sub}$ afin d'y former un plan de fragilisation Frgl en vue de la séparation de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ du substrat donneur $Ferro_{sub}$ à une étape ultérieure, comme illustré en (B). La profondeur du plan de fragilisation Fgrl dans le substrat donneur $Ferro_{sub}$ définit l'épaisseur de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$. L'obtention de ce plan sera détaillée plus bas.

[0064] Une étape S250 d'assemblage de l'ensemble support Sprt.Set avec le substrat donneur $Ferro_{sub}$, par mise en contact de la face libre Fr.Fac de la couche intermédiaire Int avec la face Top du substrat donneur ferroélectrique $Ferro_{sub}$. La structure intermédiaire $Struct_{inter}$ ainsi formée est illustrée en (C), avec la couche intermédiaire Int interposée entre la couche de support Sprt et le substrat donneur ferroélectrique $Ferro_{sub}$. l'orientation de la polarité substrat donneur ferroélectrique par rapport à la couche support est inversée, passant de P_{-138} à P_{42} du fait du retournement du substrat donneur $Ferro_{sub}$ pour l'assemblage.

[0065] Une étape S260 de détachement d'une partie du substrat donneur $Ferro_{sub}$ de la structure intermédiaire $Struct_{inter}$ au niveau du plan de fragilisation, laissant la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ fixée sur le support Sprt et permettant d'obtenir la structure StartStruct comme illustré en (D). La couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ présente la polarisation positive P_{42} par rapport à la normale Vert de la surface libre ayant servie comme interface de détachement.

[0066] Un étape 270 d'application d'un traitement thermique de stabilisation à la structure StartStruct. Le traitement thermique de stabilisation permet de guérir des défauts cristallins présents dans la couche ferroélectrique et contribue à consolider le collage entre cette couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ et la couche intermédiaire Int. Dans le cas du $LiTaO_3$, ce traitement thermique de prévu pour amener la couche ferroélectrique

à une température comprise entre 300°C et la température de Curie du matériau ferroélectrique (et préférentiellement supérieure ou égale à 450°C, 500° ou 550°, jusqu'à 600°) pendant une durée comprise entre 30 minutes et 10 heures. Ce traitement thermique est préférentiellement réalisé en exposant la face libre de la couche diélectrique à une atmosphère gazeuse oxydante ou neutre.

[0067] Il est à noter que dans le présent cas de figure, le traitement thermique de stabilisation n'entraînera pas d'inversion de la polarisation de la couche $Ferro_{lay}$. En effet, comme illustré par la [Fig.6] qui représente la structure StartStruct après le détachement, les ions hydrogène ayant servi à former la couche de fragilisation Frgl présentent un gradient de concentration [H] de valeur maximale au niveau du plan de fragilisation et se réduisant continûment lorsque l'on s'éloigne de ce plan, c'est-à-dire de la face libre de la couche $Ferro_{lay}$. Le champ électrique généré par ce gradient de concentration est donc dirigé vers la surface libre de la couche $Ferro_{lay}$. Ainsi, même en cas d'application d'un traitement thermique susceptible d'entraîner une inversion de polarisation, puisque la polarisation existante et le champ électrique sont déjà tous deux orientés vers la surface libre de la couche $Ferro_{lay}$, la polarisation restera inchangée. Ainsi, on peut considérer que la structure PreStabStruct n'ayant pas encore subi le traitement thermique de stabilisation constitue déjà la structure de départ StartStruct.

[0068] A une étape S280 de polissage, on applique préférablement à la surface libre de la couche $Ferro_{lay}$, rugueuse depuis l'étape S260 de détachement, une étape de polissage mécano-chimique, similaire à l'étape S140 du procédé 100. Cependant, considérant que la structure StartStruct est de toutes manières destinée à être soumise à un polissage à l'étape S140 du procédé 100, cette étape S270 reste optionnelle.

[0069] A la suite des étapes S210 à S270 et, le cas échéant, de l'étape S280, la structure de départ StartStruct du procédé 100 est obtenue.

[0070] Le substrat donneur $Ferro_{sub}$ illustré en (B) est un substrat constitué du matériau ferroélectrique de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$. Il pourrait alternativement comprendre une épaisseur superficielle de ce matériau. Ainsi, le substrat donneur peut, à titre d'exemple, être formé d'un substrat massif de tantalate de lithium ou de niobate de lithium, ou encore d'un substrat composite formé d'un premier substrat sur lequel repose une épaisseur (au moins égale à celle de la couche $Ferro_{lay}$) de tantalate de lithium ou de niobate de lithium. L'utilisation d'un substrat composite comprenant un substrat de support et une couche de matériau ferroélectrique s'avère nécessaire si la différence de coefficient de dilatation thermique du matériau ferroélectrique et du substrat final est trop grande pour permettre l'application du procédé Smart Cut. Cette

approche est décrite en détail dans les documents WO2019002080 et WO2019186032 qui sont incorporés par référence.

[0071] Le substrat donneur comprend donc au moins une couche de matériau ferroélectrique ayant une première polarisation positive P_{-138} monodomaine inclinée par rapport au plan d'extension de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ qui dépend de l'orientation cristalline choisie de la plaquette. Cette couche est destinée à être fixée à la couche intermédiaire Int avant d'être séparée du substrat donneur.

[0072] La [Fig.5] illustre une situation dans laquelle la couche ferroélectrique provient d'une coupe de $LiTaO_3$ du type -138RY, d'orientation illustrée en (B) de la [Fig.1].

[0073] Plus généralement, le procédé 200 s'applique à une coupe cristalline comprise dans la gamme s'étendant de 0RY à -180RY, de préférence -20RY à -160RY, pour le substrat donneur $Ferro_{sub}$. La polarisation de la structure obtenue StartStruct est donc positive, c'est-à-dire orienté de 0° à 180°, préférablement comprise dans une plage angulaire [Ang] allant de 20° à 160.

[0074] La couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ peut être transférée du substrat donneur ferroélectrique $Ferro_{sub}$ par mise en œuvre de la technologie Smart Cut™, auquel cas le substrat donneur doit être préparé par introduction d'espèce(s) légère(s) telles que de l'hydrogène ou de l'hélium dans ce substrat donneur. Cette introduction peut correspondre à une implantation d'hydrogène, c'est-à-dire, un bombardement ionique d'hydrogène de la face plane Imp du substrat donneur $Ferro_{sub}$. De façon connue en soi, et comme cela est illustré en (B), les ions hydrogène H^+ implantés ont pour but de former un plan de fragilisation Frgl délimitant la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ de matériau ferroélectrique à transférer qui est située du côté de la face Imp et une autre partie $Ferro_{sep}$ formant le reste du substrat et qui sera séparée de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ à une étape ultérieure.

[0075] La nature, la dose des espèces implantées et l'énergie d'implantation sont choisies en fonction de l'épaisseur de la couche que l'on souhaite transférer et des propriétés physico-chimiques du substrat donneur $Ferro_{sub}$. Dans le cas d'un substrat donneur en $LiTaO_3$, on pourra choisir d'implanter une dose d'hydrogène comprise entre 10^{16} et 5.10^{17} at/cm² avec une énergie comprise entre 30 et 300 keV pour délimiter une couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ de l'ordre de 200 à 2000 nm d'épaisseur.

[0076] En (C) de la [Fig.5], la polarisation P_{42} est orientée à l'opposé de l'interface entre la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ et la couche intermédiaire Int, de sorte que la polarisation de la couche ferroélectrique est considérée comme positive.

[0077] Le substrat support Sprt peut présenter la même dimension et la même forme que celles du substrat donneur $Ferro_{sub}$, mais l'invention ne se limite pas à une telle configuration et des dimensions, des formes et des configurations différentes peuvent

être employées. Préalablement à l'assemblage, il peut être envisagé de préparer les faces des substrats à assembler par une étape de nettoyage, brossage, séchage, polissage, ou une activation par plasma.

[0078] L'assemblage peut correspondre à la mise en contact intime du substrat donneur $Ferro_{sub}$ avec le support Sprt par adhésion moléculaire et/ou collage électrostatique, comme mentionné par exemple dans la demande de brevet français publiée sous le n°2 914 492.

[0079] Comme cela est bien connu, au cours d'un procédé d'adhésion moléculaire, les surfaces exposées du support Sprt et du substrat donneur $Ferro_{sub}$, parfaitement propres, planes et lisses, sont mises en contact intime pour favoriser un collage électrostatique ou 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.

[0080] L'assemblage peut comprendre l'application d'un traitement thermique de faible température (compris par exemple entre 50 et 300°C, typiquement 100°C) permettant de guérir des défauts cristallins présents dans la couche ferroélectrique et de renforcer suffisamment l'énergie de collage pour permettre une éventuelle étape ultérieure d'amincissement.

[0081] Dans le présent mode de réalisation, l'étape de détachement d'une partie du substrat donneur est réalisée par application de la technologie Smart Cut™, selon laquelle une couche destinée à former la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ est délimitée par le plan de fragilisation Frgl défini par implantation d'ions hydrogène dans le substrat donneur, comme illustré en (B) de la [Fig.2]. Après l'étape d'assemblage, cette couche est détachée du substrat donneur par fracture au niveau du plan de fragilisation Frgl et ainsi reportée sur le support Sprt, comme illustré en (D) de la [Fig.2].

[0082] Cette étape de détachement peut ainsi comprendre l'application à la structure intermédiaire $Struct_{inter}$ d'un traitement thermique dans une gamme de température de l'ordre de 80°C à 300° pour permettre le détachement de la partie du substrat donneur de la couche ferroélectrique $Ferrol_{ay}$ et ainsi compléter le transfert de celle-ci sur l'ensemble de support. En remplacement ou en complément du traitement thermique, cette étape peut comprendre l'application d'une lame ou un jet de fluide gazeux ou liquide, ou de tout autre effort de nature mécanique au niveau du plan de fragilisation Frgl.

[0083] Procédé alternatif 2

[0084] Les figures 7 et 8 illustrent le procédé alternatif 2 d'obtention de la structure StartStruct, procédé 300 résumé par le diagramme de la [Fig.7].

[0085] Le procédé alternatif 2 est très proche du procédé alternatif 1, avec des étapes S310 à S380 sensiblement identiques aux étapes S210 à S280, respectivement, en dehors des points détaillés ci-dessous.

[0086] A l'étape S320, au lieu de choisir un substrat donneur de polarisation négative comme à l'étape S220, on choisit un substrat donneur de polarisation positive, P_{42} sur la [Fig.8].

[0087] A l'étape S340 de formation du plan de fragilisation Frgl, au lieu d'implanter des ions hydrogène comme à l'étape S240, on va cette fois implanter des ions hélium He^+ pour former ce plan.

[0088] La couche $Ferro_{lay}$ de la structure intermédiaire $Struct_{inter}$ obtenue à l'étape S350 présente une polarisation négative P_{-138}, opposée à la polarisation positive P_{42} en raison du retournement du substrat donneur pour sa fixation sur l'ensemble de support Sprt.Set. Ainsi, l'étape S360 de séparation d'une partie du substrat donneur Ferrosep pour laisser la couche Ferrolay sur l'ensemble de support débouche sur l'obtention d'un structure PreStabStruct. Cette structure PreStabStruct est distincte de la structure StartStruct souhaitée en ce que la polarisation de la couche $Ferro_{lay}$ est d'orientation opposée à celle souhaitée, comme illustré en (D) de la [Fig.8].

[0089] Cependant, comme illustré en (D') de la [Fig.8], la concentration [He] d'hélium dans la couche $Ferro_{lay}$ présente un gradient avec une concentration maximale au niveau de la surface libre de la couche, comme illustré par la [Fig.8], qui représente la structure PreStabStruct obtenue juste après la séparation, les ions hélium ayant servi à former la couche de fragilisation Frgl présentent un gradient de concentration [He] de valeur maximale au niveau du plan de fragilisation et se réduisant continûment lorsque l'on s'éloigne de ce plan, c'est-à-dire de la face libre de la couche $Ferro_{lay}$. Le champ électrique généré par ce gradient de concentration est donc dirigé vers la surface libre de la couche $Ferro_{lay}$, à l'opposé de la polarisation P_{-138}.

[0090] Ainsi, l'application d'un traitement thermique de stabilisation à l'étape S370, selon des paramètres pouvant être ceux décrits en relation avec l'étape S130, entraîne une inversion de la polarisation P_{-138} pour donner la polarisation P_{42}, pour les raisons expliquées plus haut en relation avec l'étape S130. En effet, la concentration d'hélium implanté pour former le plan de fragilisation est suffisante pour générer un champ électrique $E_{H\ e}$ inversant la polarisation lors de l'application du traitement thermique. De cette manière, la structure PreStabStruct est modifiée pour donner la structure StartStruct souhaitée. Autrement dit, dans le procédé alternatif 2, l'étape de traitement thermique S370 suivant l'étape de séparation est nécessaire à l'obtention de la structure StartStrct, à la différence de l'étape de traitement thermique S270 du procédé alternatif 1, où elle n'est qu'optionnelle et n'influence pas la polarisation de la couche $Ferro_{lay}$.

[0091] Bien entendu, une étape S380 de polissage similaire à l'étape S280 peut être appliquée pour lisser la surface libre de la couche $Ferro_{lay}$.

[0092] Comme expliqué ci-dessus, chacun des deux procédés alternatifs 1 et 2, le premier employant un substrat donneur de polarité négative et une implantation d'hydrogène définissant un plan de fragilisation, et le second employant un substrat donneur de polarité positive et une implantation d'hélium définissant un plan de fragilisation, permettent d'obtenir la structure de départ StartStruct du procédé 100 d'obtention d'une structure composite comprenant une couche ferroélectrique de polarité négative et homogène dans l'épaisseur de la couche.

[0093] Bien qu'illustré ici pour une couche de coupe cristalline 42RY, le procédé 100 s'applique plus généralement à des couches de coupes cristallines comprises dans la gamme s'étendant de 0RY à 180RY, de préférence 20RY à 160RY, pour la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ de la structure de départ StartStruct. Autrement dit, en considérant que la couche ferroélectrique s'étend selon une direction horizontale Hnz perpendiculaire à la direction verticale Vert normale à la couche, la polarisation positive P_{42} de la structure de départ StartStruct fait un angle compris dans une plage angulaire [Ang] allant de 20° à 160° par rapport à cette direction horizontale Hnz, comme illustré par la [Fig.9]. La polarisation de la structure finale EndStruct est négative, c'est-à-dire orienté de 0° à -180°, préférablement comprise dans une plage angulaire allant de -20° à -160°, par rapport au plan de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$. Bien entendu, les procédés 200 et 300 peuvent être adaptés de manière choisir des coupes cristallines adéquates pour obtenir la structure StartStruct présentant une polarisation souhaitée de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$.

[0094] Dans ce document, les figures ne sont pas nécessairement à l'échelle. Certaines caractéristiques et certains composants peuvent être représentés exagérés par rapport à d'autres composants ou sous une forme quelque peu schématique, et certains détails d'éléments conventionnels peuvent ne pas être représentés dans l'intérêt de la clarté et de la concision.

[0095] 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.

Revendications

[Revendication 1] Procédé (100) de fabrication d'une structure composite (EndStruct) comprenant une couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) de polarisation négative (P_{-138}) reposant sur un ensemble de support (Sprt.Set), comprenant les étapes de :
- fournir (S110) une structure composite de départ (StartStruct) comprenant une couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) de polarisation positive (P_{42}) reposant sur l'ensemble de support (Sprt.Set) ; et
- implanter (S120) des ions hydrogène (H+) dans la structure composite de départ (StartStruct) puis appliquer (S130) un traitement thermique à la structure composite de départ (StartStruct) de manière à inverser la polarisation (P_{42}) de la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) de la structure composite de départ (StartStruct).

[Revendication 2] Procédé (100) selon la revendication 1, dans lequel les ions hydrogène sont implantés de manière à ce que la structure composite de départ présente une concentration d'atomes hydrogène comprise entre 10^{19} et 10^{22} at/cm^3.

[Revendication 3] Le procédé selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le traitement thermique appliqué (S130) est paramétré pour amener la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) à une température comprise entre 300°C et la température de Curie de cette couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$), et préférentiellement supérieure ou égale à 450°C, 500° ou 550° et inférieure à 600°C.

[Revendication 4] Procédé (100) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la couche ferroélectrique s'étend selon une direction horizontale (Hnz) et la polarisation positive (P_{42}) de la structure composite de départ (StartStruct) fait un angle compris dans une plage angulaire ([Ang]) allant de 20° à 160° par rapport à cette direction horizontale (Hnz).

[Revendication 5] Procédé (100) selon l'une quelconque des revendications précédente, dans lequel la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) est une couche de niobate de lithium ou de tantalate de lithium.

[Revendication 6] Procédé (100) selon l'une quelconque des revendications précédente, comprenant en outre une étape (S140) de polissage de la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$).

[Revendication 7] Procédé (100) selon l'une quelconque des revendications précédente 1 à 6, comprenant en outre l'obtention de la structure de départ (StartStruct) au moyen d'un procédé (200) comprenant les étapes de :
- fournir (S110) l'ensemble de support (Sprt.Set) ;
- fournir (S220) un substrat donneur (Ferrosub) de matériau ferroélectrique monocristallin présentant une polarisation négative (P_{-138}) par rapport à une face (Top) de substrat donneur ($Ferro_{sub}$) ;
- former (S240) un plan de fragilisation dans le substrat donneur ($Ferro_{sub}$) ;
- assembler (S250) le substrat donneur ($Ferro_{sub}$) à l'ensemble de support (Sprt.Set) par mise en contact de la face (Top) avec l'ensemble de support (Sprt.Set) ; et
- détacher (S260) une partie du substrat donneur ($Ferro_{sub}$) au niveau du plan de fragilisation de manière à laisser la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) fixée sur l'ensemble de support (Sprt.Set) et obtenir la structure de départ (StartStruct).

[Revendication 8] Procédé (100) selon l'une quelconque des revendication précédentes 1 à 6, comprenant en outre l'obtention de la structure de départ (StartStruct) au moyen d'un procédé (300) comprenant les étapes de :
- fournir (3110) l'ensemble de support (Sprt.Set) ;
- fournir (S320) un substrat donneur (Ferrosub) de matériau ferroélectrique monocristallin présentant une polarisation positive (P_{42}) par rapport à une face (Top) de cette plaquette ;
- former (S340) un plan de fragilisation dans le substrat donneur ($Ferro_{sub}$) par implantation d'hélium (He^{+}) à travers la face (Top) ;
- assembler (S350) le substrat donneur ($Ferro_{sub}$) à l'ensemble de support (Sprt.Set) par mise en contact de la face (Top) avec l'ensemble de support (Sprt.Set) ;
- détacher (S360) une partie du substrat donneur ($Ferro_{sub}$) au niveau du plan de fragilisation de manière à laisser la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) fixée sur l'ensemble de support (Sprt.Set) pour obtenir une structure (PreStabStruct) intermédiaire ; et
- appliquer (S370) un traitement thermique à la structure (PreStabStruct) intermédiaire de manière à inverser la polarisation (P_{-138}) de la couche ferroélectrique (Ferrolay) et obtenir la structure de départ (StartStruct).

[Revendication 9] Le procédé (100) selon la revendication 8, dans lequel le traitement thermique appliqué (S370) à la structure (PreStabStruct) est paramétré pour amener la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) à une température comprise entre 300°C et la température de Curie de cette couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$), et préférentiellement supérieure ou égale à 450°C, 500° ou 550° et inférieure à 600°C.