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 comportant une couche ferroélectrique de polarisation négative, comprenant les étapes de : fournir une plaquette de matériau ferroélectrique ayant une première face et présentant une polarisation orienté vers cette face ; former un plan de fragilisation dans la plaquette de matériau ferroélectrique par une implantation d'ions hydrogène à travers la première face ; assembler la plaquette de matériau ferroélectrique comportant le plan de fragilisation à un ensemble de support par mise en contact de la première face avec une surface libre de l'ensemble de support ; détacher une partie de la plaquette de matériau ferroélectrique de manière à définir une couche ferroélectrique détachée de la plaquette de matériau ferroélectrique et assemblée à l'ensemble de support de manière à obtenir une structure formée de la couche ferroélectrique et de l'ensemble de support, la couche ferroélectrique présentant une polarisation négative ; procéder à une étape d'implantation plein champ d'hydrogène additionnelle, paramétrée de manière à corriger ou à prévenir la survenue

d'inversion de polarisation dans le volume de la couche ferroélectrique et/ou à son interface avec l'ensemble de support ; et appliquer au moins un premier traitement thermique à la structure.

[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] - l'étape d'implantation d'hydrogène additionnelle peut être effectuée après le au moins un premier traitement thermique, le procédé comprenant en outre une étape d'application d'un second traitement thermique à la structure après l'étape d'implantation d'hydrogène additionnelle ;

[0013] - le procédé peut en outre comprendre une étape d'amincissement de la couche ferroélectrique, préférentiellement entre l'étape d'application du premier traitement thermique et l'étape d'application du second traitement thermique ;

[0014] - l'étape d'implantation d'hydrogène additionnelle peut être effectuée avant le au moins un premier traitement thermique ;

[0015] - le procédé pouvant en outre comprendre une étape d'amincissement de la couche ferroélectrique, préférentiellement après l'étape d'application du premier traitement thermique ;

[0016] - le procédé peut comprendre une étape de caractérisation d'une structure de référence, un ajustement de paramètres de l'étape d'implantation d'hydrogène additionnelle pouvant être définis en réponse à cette caractérisation ;

[0017] - l'étape d'implantation additionnelle d'ions hydrogène peut comprendre une première implantation ionique de correction dans la couche ferroélectrique, paramétrée de manière à générer un parcours projeté des ions hydrogène implantés tel qu'une profondeur de son maximum atteigne ou dépasse une profondeur de d'interface entre (i) un volume de polarisation stable de la couche ferroélectrique et (ii) un volume de polarisation inversée en raison de la formation du plan de fragilisation ou de polarisation qui s'inverserait en raison de la formation du plan de fragilisation si un traitement thermique était appliqué ;

[0018] - l'étape d'implantation additionnelle d'ions hydrogène peut comprendre une seconde implantation ionique de correction, paramétrée de manière à générer un parcours projeté des ions hydrogène implantés tel qu'une profondeur de son maximum

atteigne ou dépasse la profondeur de l'interface entre (i) la couche ferroélectrique et (ii) l'ensemble de support, de préférence à une distance à cette interface qui est inférieure à l'épaisseur d'un volume de polarisation qui est limité par cette interface et qui est multidomaine ou inversée par rapport à une polarisation d'un volume de polarisation stable de la couche ferroélectrique ou qui s'inverserait ou deviendrait multidomaine si un traitement thermique était appliqué ;

[0019] - l'étape d'implantation plein champ d'hydrogène additionnelle peut être paramétrée de manière à obtenir une concentration d'hydrogène comprise entre 10^{19} à 10^{22} at/cm^3 dans un volume de la structure ;

[0020] - la couche ferroélectrique peut s'étendre dans un plan d'extension et la polarisation fait un angle avec compris dans une plage angulaire allant de -20° à -160° par rapport au plan d'extension ;

[0021] - la couche ferroélectrique peut être une couche de niobate de lithium ou de tantalate de lithium.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0022] 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 :

[0023] [Fig.1] La [Fig.1] illustre des coupes cristallines de monocristaux ;

[0024] [Fig.2] La [Fig.2] représente la fabrication d'une structure comprenant une couche ferroélectrique reportée sur un support ;

[0025] [Fig.3] La [Fig.3] illustre l'influence de la fabrication de la [Fig.2] sur la polarisation de la couche ferroélectrique reportée ;

[0026] [Fig.4] La [Fig.4] illustre un mécanisme d'inversion de polarisation dans une couche de matériau ferroélectrique ;

[0027] [Fig.5] La [Fig.5] illustre un procédé de correction de la polarisation d'un matériau ferroélectrique au moyen d'une première implantation ionique ;

[0028] [Fig.6] La [Fig.6] illustre un procédé de correction de la polarisation d'un matériau ferroélectrique au moyen d'une seconde implantation ionique ;

[0029] [Fig.7] La [Fig.7] illustre une structure comprenant une couche ferroélectrique reportée de polarisation à homogénéité améliorée ;

[0030] [Fig.8] La [Fig.8] illustre un premier procédé de fabrication selon l'invention ;

[0031] [Fig.9] La [Fig.9] illustre une polarisation d'orientation négative ; et

[0032] [Fig.10] La [Fig.10] illustre un second procédé de fabrication selon l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

Premier mode de réalisation de l'invention

[0033] 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.

[0034] 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.

[0035] 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.

[0036] 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.

[0037] 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.

[0038] 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.

[0039] 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.

[0040] 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.

[0041] La figure (2) illustre en (D) une situation dans laquelle la polarisation P1 d'une couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ est négative : elle est orientée vers l'interface entre la couche ferroélectrique P1 et l'ensemble la supportant, 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 négative. Cette composante est obtenue par une projection normale de la polarisation sur la direction Vert.

[0042] Pour obtenir un dispositif piézoélectrique muni, par exemple, 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 tenir compte du procédé de fabrication et de ses impacts potentiels sur la polarisation de la plaquette.

[0043] La [Fig.2] illustre le principe général d'un procédé de fabrication de la structure Struct illustrée en (D), et qui inclut une étape de report d'une couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ sur un ensemble de support Sprt.Set formé de la couche intermédiaire Int sur la couche de support Sprt, la couche intermédiaire étant interposée entre la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ et la couche de support. De manière non-limitative, on peut aussi trouver une couche d'un autre matériau, en particulier une couche d'oxyde de silicium, sur la face de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ avant de l'agencer sur la couche intermédiaire Int. La structure Struct est par exemple conçue pour être intégrée à un dispositif électroacoustique.

[0044] 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 de 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 $Ferro_{lay}$.

[0045] 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 sorte 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 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.

[0046] 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.

[0047] 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 $Ferro_{lay}$.

[0048] La présence d'une couche intermédiaire Int ne représente qu'une option. Toutes les applications ne requièrent pas la présence d'une telle couche.

[0049] De manière conventionnelle, la structure Struct peut 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.

[0050] 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 Struct 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.

[0051] En référence aux figures 2 à 9, la structure Struct peut être réalisée par un procédé 100 de fabrication par report d'une couche ferroélectrique sur un ensemble de support, le procédé état résumé par la [Fig.8] et comprenant :

- une étape S00 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 $Ferro_{sub}$, la plaquette choisie présente une polarisation positive monodomaine -P1, c'est à dire ayant une composante orientée dans 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 en (B) de la [Fig.2] ;
- une étape S10 de préparation d'un ensemble de support Sprt.Ens, constitué ici d'une couche de support Sprt munie d'une couche intermédiaire Int à sa surface comme illustrée en (A) de la [Fig.2] ;
- une étape S20 de préparation du substrat donneur ferroélectrique $Ferro_{sub}$ afin d'y former un plan de fragilisation Frgl en vue de la séparation d'une 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 $Ferro_{sub}$ définissant l'épaisseur de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$;

- une étape S40 d'assemblage de l'ensemble de support Sprt.Ens avec le substrat donneur Ferrosub, par mise en contact de la face libre Fr.Fac de la couche intermédiaire Int avec la face Top du substrat donneur ferroélectrique $Ferro_{sub}$ afin de constituer une structure intermédiaire $Struct_{inter}$ illustrée en (C), avec la couche intermédiaire Int interposée entre la couche de support Sprt et la face Top du donneur du substrat ferroélectrique $Ferro_{sub}$, l'orientation de la polarité de la couche Ferrolay par rapport à la couche support est inversée, passant de -P1 à P1 du fait du retournement du substrat donneur $Ferro_{sub}$ pour l'assemblage ; et
- une étape de S60 de détachement d'une partie du substrat donneur $Ferro_{sub}$ de la structure intermédiaire au niveau du plan de fragilisation, laissant la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ fixée sur le support Sprt et permettant d'obtenir la structure Struct illustrée en (D), la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ ayant comme déjà dit une polarisation négative par rapport à la normale Vert de la surface libre ayant servie comme interface de détachement.

[0052] Le substrat donneur $Ferro_{sub}$ illustrée 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.

[0053] Le substrat donneur comprend donc au moins une couche de matériau ferroélectrique ayant une première polarisation positive -P1 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. De manière non-limitative, on peut aussi trouver une couche d'un autre matériau, en particulier une couche d'oxyde de silicium, sur la face de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$ avant de l'agencer sur la couche intermédiaire Int.

[0054] La [Fig.2] illustre une situation dans laquelle la couche ferroélectrique provient d'une coupe de $LiTaO_3$ du type 42RY, d'orientation illustrée en (A) de la [Fig.1]. La

polarisation de la couche est orientée vers le haut en (B) de la [Fig.2] comme en (A) de la [Fig.1].

[0055] Plus généralement, le procédé 100 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 finale est donc négative, c'est-à-dire orienté de 0° à -180°, préférablement comprise dans une plage angulaire [Ang] allant de -20° à -160°, par rapport au plan de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$, comme illustré par la [Fig.9].

[0056] 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 et/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 Top 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 Top 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.

[0057] 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.

[0058] En (C) de la [Fig.2], la polarisation P1 est orientée vers 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 négative.

[0059] 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, ou encore avant ou après nettoyage d'un dépôt d'une couche de collage.

[0060] 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.

[0061] 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.

[0062] 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.

[0063] 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].

[0064] 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.

[0065] A la suite de l'étape S60 qui a mené à l'obtention de la structure illustrée en (D) de la [Fig.2] par séparation de la couche $Ferro_{lay}$ du reste du substrat donneur $Ferr_{sub}$, on applique un traitement thermique H.Treat-1 de stabilisation à la structure Struct, à une étape S80. 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 LiTaO3, ce traitement thermique est 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 5 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.

[0066] Cependant, les inventeurs ont constaté que le traitement thermique H.Treat-1, combiné aux précédentes étapes de fabrication et à la structure Struct elle-même, a plusieurs effets modifiant localement la polarisation de la couche $Ferro_{lay}$, comme expliqué à l'aide de la [Fig.3].

[0067] L'un de ces effets est particulièrement gênant, modifiant la polarisation du cœur de la couche $Ferro_{lay}$, c'est-à-dire une partie de la couche se situant à distance de sa surface ou de son interface avec l'ensemble de support. En effet, la présence d'un gradient de concentration d'ions hydrogène dans une couche ferroélectrique combinée à un traitement thermique à une température de l'ordre de 300° à 600°C, tel le traitement H.Treat-1, provoque une inversion de la polarisation du matériau ferroélectrique dans le volume où le gradient est suffisamment fort. Il est interprété que le gradient d'ions H+ implantés provoque l'apparition d'un champ électrique E_H qui, à la faveur de l'activation thermique provoquée par la hausse de température, peut induire l'inversion de la polarisation dans un volume du matériau. Plus spécifiquement, lors d'un traitement thermique à suffisamment haute température, 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.

[0068] La [Fig.3] illustre en quatre lignes Lin.A à Lin.D l'impact du traitement thermique H.Treat-1 de l'étape S80 sur la polarisation dans le volume de la couche $Ferro_{lay}$, en liaison avec certaines étapes de fabrication. Chaque ligne correspond à une étape de fabrication et est divisée en deux colonnes. Une première colonne Col.1 illustre la polarisation de la couche $Ferro_{lay}$ en l'absence du traitement thermique et correspond aux étapes de fabrication de la [Fig.2], tandis qu'une seconde colonne Col.2 illustre les effets entraînés par ces différentes étapes lors de l'application du traitement thermique de l'étape S80. Il sera en particulier prêté attention à l'apparition et l'évolution de volumes de polarisations distinctes apparaissant dans la couche $Ferro_{lay}$.

[0069] La ligne Lin.A illustre le substrat donneur ferroélectrique $Ferro_{sub}$ à l'étape S00. Sa polarisation est indiquée par -P1 car opposée en direction à la polarisation P1 de la structure Struct finale à obtenir, illustrée en (D) de la [Fig.2]. Cette polarisation est homogène dans l'ensemble du volume V_B qui est défini, à ce moment, par le volume de l'ensemble du substrat donneur $Ferro_{sub}$. Les deux colonne Col.1 et Col.2 ne présentent pas de différence : en l'absence d'ions hydrogène implantés selon un profile inhomogène dans le volume V_B de $Ferro_{sub}$, le traitement thermique n'amène pas de retournement de polarisation.

[0070] La ligne Lin.B illustre l'état du substrat donneur $Ferro_{sub}$ après la formation du plan de fragilisation Frgl à l'étape S20. Sans le traitement thermique (voir Col.1),

la polarisation du substrat donneur n'est pas modifiée. En revanche, à la suite du traitement thermique, ou si l'on appliquait le traitement thermique immédiatement sans procéder aux étapes S40 et S60, la polarisation serait inversée dans un volume de matériau V_C issu du volume matériau V_B, au voisinage du plan de fragilisation Frgl. La polarisation du volume V_C correspond alors à celle d'une coupe -138RY de matériau ferroélectrique $LiTaO_3$, comme indiquée par le nombre -138 sur la figure. En dehors du volume Vc, la polarisation reste inchangée.

[0071] Ce mécanisme est illustré par la [Fig.4], qui montre la répartition des ions hydrogène implantés dans la couche $Ferro_{lay}$ sous forme d'une concentration en hydrogène [H] selon la profondeur d'implantation Dpth à partir de la surface de la couche $Ferro_{lay}$ (représentation aussi désignée par « parcours projeté » dans le domaine de l'implantation ionique). Une telle répartition, fortement inhomogène selon la profondeur de la couche $Ferro_{lay}$, génère le champ électrique E_H, susceptible d'entraîner l'inversion de polarisation du volume concerné lorsqu'un traitement thermique à température suffisamment haute est appliqué. En effet, la polarisation tend dans ces conditions à prendre la même orientation que le champ électrique E_H. Ici, une partie du volume V_B, influencée par le gradient de concentration des ions hydrogène et le champ électrique qu'il génère, a vu sa polarisation s'inverser, passant P1 à -P1 dans le volume V_C.

[0072] La ligne Lin.C illustre l'état du substrat donneur à la suite de son assemblage à l'ensemble de support à l'étape S40. Pour ce faire, le substrat donneur est retourné. Par symétrie, on se retrouve dans la situation que l'on aurait si l'on avait employé une coupe -138RY de matériau ferroélectrique LiTaO3 en tant que substrat $Ferro_{sub}$ sans que le retournement lors de l'assemblage ait été effectué. En pratique, les polarisations des deux volume V_B et V_C se retrouvent inversées, comme indiqué par les flèches de polarisation P1 et -P1 et par les indications 42 et -138 correspondant aux coupe 42RY et -138RY.

[0073] La ligne Lin.D illustre, outre la présence des deux volumes V_B et V_C déjà décrits, la présence de deux autres volumes V_A et V_D de polarisations inversées, issus respectivement des volume V_B et V_C à la suite du traitement thermique de l'étape S80. Ces deux volumes apparaissent aux deux faces de la couche Ferrolay. Le volume V_D est défini par une partie du volume V_C tel que défini à la ligne Lin.C, dont la polarisation s'inverse partiellement ou totalement au niveau de la surface libre de la couche $Ferro_{lay}$. Le volume V_A est défini par une partie du volume V_B tel que défini à la ligne Lin.C, dont la polarisation s'inverse partiellement ou totalement au niveau de l'interface de la couche $Ferro_{lay}$ avec l'ensemble de support, et donc avec la couche Int de cet exemple. Ces inversions de polarités s'opèrent en raison d'interactions physico-

chimiques de surface et d'interface en lien avec la température de traitement thermique appliqué, et provoquent la transformation de portions superficielles de cette couche ferroélectrique, qui passe d'une structure ferroélectrique monodomaine d'une première polarisation à une structure ferroélectrique d'une seconde polarisation opposée à la première polarisation ou à une structure ferroélectrique multidomaine à sa surface libre et/ou à son interface avec l'ensemble de support. Ces portions superficielles sont dites multidomaines lorsqu'elles possèdent une structure ferroélectrique présentant des zones d'orientations de polarisation diverses. Ces portions superficielles ont typiquement des épaisseurs de l'ordre de 150 nm ou moins, et peuvent se développer sur toute l'étendue de la couche ferroélectrique.

[0074] Nous voyons que le procédé de fabrication de la structure Struct, doit préférablement prendre en compte la formation des volume V_A, V_C et V_D à partir du volume V_B, pour améliorer l'homogénéité de la polarisation de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$, inhomogène en profondeur, et donc menant à des caractéristiques mal contrôlées pour les dispositifs intégrant cette couche. La partie du volume V_B ne subissant aucune inversion de polarisation est considérée comme un volume de polarisation stable de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$.

[0075] Le volume V_D peut être simplement éliminé par polissage superficielle de la couche $Ferro_{lay}$.

[0076] A une étape S100 suivant l'étape S80 au cours de laquelle le traitement thermique est appliqué, on amincit la couche ferroélectrique. Cet amincissement peut correspondre au 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. Il permet de préparer la face libre pour qu'elle présente une rugosité faible, par exemple inférieure à 0,5nm RMS 5x5 µm par mesure par force atomique (AFM) et d'enlever le volume V_D de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$. On prévoit généralement un enlèvement de 50 à 300 nm d'épaisseur pour atteindre l'épaisseur cible de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$, et dans tous les cas une épaisseur supérieure à celle du volume V_D. On améliore ainsi l'homogénéité de la polarisation de la couche $Ferro_{lay}$.

[0077] Afin d'améliorer l'homogénéité de la polarisation de la couche $Ferro_{lay}$ en profondeur, il est proposé de procéder, après l'étape S100, à une étape S120 d'implantation Corr.Imp d'ions hydrogène de correction dans l'épaisseur de la structure Struct suivie d'un second traitement thermique H.Treat-2 au cours d'une étape S140, de manière à corriger la polarisation des volumes V_A et V_C. L'étape S120 peut éventuellement comporter plusieurs phases d'implantation ionique, mais en comporte au moins une. Bien entendu, pour d'autres modes de réalisation, et sans que cela soit limitatif pour l'invention, il est également possible de procéder à l'étape

S120 d'implantation Corr.Imp d'ions hydrogène de correction avant ladite étape S100 d'amincissement.

[0078] La [Fig.5] illustre une première implantation ionique de correction menant à un parcours projeté R_P des ions hydrogène implantés tel que la profondeur $D1(R_P)$ de son maximum atteigne ou dépasse la profondeur de l'interface entre les volumes V_B et V_C et se situe au niveau de cette interface ou proche de l'interface soit dans le volume V_C soit dans le volume V_B, de préférence à une distance prédéterminée telle que la concentration d'hydrogène dans le volume V_C dépasse 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 $Ferro_{lay}$. Cette première implantation ionique de correction aura un effet contrecarrant celui de l'implantation ionique ayant formé le plan de fragilisation et corrigera donc la polarisation du volume V_C en inversant de nouveau sa polarisation et la réorientant comme celle du volume V_B.

[0079] La [Fig.6] illustre une seconde implantation ionique de correction menant à un parcours projeté R_P des ions hydrogène implantés tel que la profondeur $D2(R_P)$ de son maximum atteigne ou dépasse la profondeur de l'interface entre le volumes V_A et la couche Int, c'est-à-dire l'interface entre la couche ferroélectrique Ferrolay et l'ensemble de support Sprt.Ens, et se situe au niveau de cette interface ou dans la couche Int, de préférence à une distance prédéterminée telle que la concentration d'hydrogène dans le volume V_A dépasse 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 $Ferro_{lay}$. Cette seconde implantation ionique de correction, combinée au second traitement thermique H.Treat-2, aura un effet contrecarrant celui des effets physico-chimiques se produisant à l'interface entre V_A et Int, et corrigera donc la polarisation du volume V_A en inversant de nouveau sa polarisation et la réorientant comme celle du volume V_B.

[0080] La première implantation et la seconde implantation sont effectuées « plein champ », c'est-à-dire sur l'ensemble de la surface de la couche $Ferro_{lay}$, sans masque destiné à créer des motifs d'implantation dans une zone utile de la couche. Un système de maintien peut cependant être utilisé pour maintenir la structure en cours d'opération et masquer certaines parties de la couche $Ferro_{lay}$, en particulier la périphérie, ces parties masquées n'étant pas considérée comme faisant partie de la zone utile de la structure Struct. On peut considérer des énergies d'implantation comprises entre 30 keV et 300 keV, et doses entre 1.10^{15} et 9.10^{16} atomes/cm^2.

[0081] Selon les caractéristiques de la couche ferroélectrique $Ferro_{lay}$, et en particulier son épaisseur, la seconde implantation peut être suffisante pour corriger les orientations

des polarisations des deux volumes V_A et V_C. En effet, le champ électrique générée par le gradient de concentration d'hydrogène peut être suffisamment étendu et intense pour comprendre le volume V_C dans sa zone d'influence et influer la polarisation lors du traitement thermique H.Treat-2. On comprend alors qu'une couche ferroélectrique relativement mince bénéficiera plus aisément de cet avantage qu'une couche ferroélectrique relativement épaisse.

[0082] La première implantation de correction et la seconde implantation de correction peuvent être réalisées successivement au cours de l'étape de correction S120. Alternativement, la première implantation ou la seconde implantation peuvent être réalisées seules.

[0083] Un ajustement des paramètres d'implantation de l'étape S120 de correction est préférablement réalisé en fonction des caractéristiques géométriques (épaisseur, localisation) des volumes V_A et V_C de la couche $Ferro_{lay}$. Dans ce but, une première étape préparatoire Prep-S00 consiste à fabriquer une structure Ref de référence selon les mêmes paramètres que la structure Struct que l'on souhaite réaliser, donc selon les étapes S00 à S100.

[0084] Une deuxième étape préparatoire Prep-S10 consiste à effectuer une analyse de la polarisation selon un plan transverse de la couche $Ferro_{lay}$ de l'échantillon de référence, de manière à obtenir les caractéristiques Char de la polarisation de l'échantillon Ref. Pour ce faire, on effectue une coupe en biseau de la couche $Ferro_{lay}$ puis une analyse de cette coupe par microscopie à force piézoélectrique (ou PFM en terminologie anglaise, pour Piezoresponse Force Microscopy). Une telle analyse permet de déterminer l'orientation de la polarisation de la couche $Ferro_{lay}$ sur tout son épaisseur, et donc de déterminer l'absence ou la présence de volumes de polarisations inversées et, le cas échéant, localiser les volume V_A, V_B, V_C et V_D, c'est-à-dire les épaisseurs de chacun de ces volumes et donc les profondeurs auxquelles se situent les interfaces entre V_A et V_B, V_B et V_C, et V_C et V_D, mesurées depuis la surface libre de la couche $Ferro_{lay}$.

[0085] L'étape S120 peut être appliquée avec des paramètres d'implantations ajustés en réponse à l'analyse pratiquée lors de l'étape Prep-S10. Spécifiquement, l'énergie d'implantation de la première implantation ionique sera déterminée de manière telle que la profondeur $D1(R_P)$ du maximum du parcours projeté R_P des ions hydrogène atteigne ou se situe proche de la profondeur de l'interface entre les volumes V_B et V_C ou encore se situe au niveau de cette interface ou même dans le volume V_c ou dans le volume V_B, de préférence à une distance prédéterminée déjà mentionnée ci-dessus pour dépasser le seuil de concentration. Le même principe s'applique pour la profondeur $D2(R_P)$ de la deuxième implantation, dont l'énergie d'implantation sera déterminée de manière telle que la profondeur $D2(R_P)$ du maximum du parcours projeté R_P des ions

hydrogène atteigne ou se situe proche de la profondeur de l'interface entre le volume V_A et la couche Int, ou encore se situe au niveau de cette interface, dans le volume V_A ou même dans la couche Int.

[0086] Le second traitement thermique H.Treat-2 de l'étape S140, appliqué à la structure Struct après l'étape S120 d'implantation de correction Corr.Imp, peut être 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 5 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. H.Treat-2 amène à une inversion de la polarisation des volumes VC et/ ou VA et donc à une homogénéisation de la polarisation de la couche ferroélectrique Ferrolay. Idéalement, cette couche est faite, en fin de traitement, d'un monodomaine unique de polarisation négative P1, orientée vers l'interface entre la couche Ferrolay et l'ensemble de support, comprenant ici la couche intermédiaire Int et la couche de support Sprt, comme illustré par la [Fig.7].

Second mode de réalisation de l'invention

[0087] Selon le premier mode de réalisation de l'invention, on applique une étape d'implantation d'hydrogène et un traitement thermique associé destinés à la correction de la polarisation de la couche ferroélectrique en réponse aux inversions de polarisations non souhaités, provoquées par un premier traitement thermique. Il s'agit d'un procédé de réparation de la polarisation.

[0088] Le second mode de réalisation consiste, en alternative au premier mode de réalisation, à prévenir les inversions de polarisation qui, bien que non souhaitées, peuvent être attendues.

[0089] La [Fig.10] illustre un procédé 200 de fabrication de la structure Struct illustrée par la [Fig.2]. Les étapes S00 à S60 sont les mêmes que celles du procédé 100 du premier mode de réalisation.

[0090] Dans le second mode de réalisation, c'est à la suite du détachement de la couche $Ferro_{lay}$ du substrat donneur $Ferro_{sub}$, à l'étape S60, que l'on met en œuvre une étape S270 d'implantations ioniques. Cette étape est similaire à l'étape S120 du premier mode de réalisation, à la différence près qu'il faut tenir compte du fait de la couche $Ferro_{lay}$ n'a pas encore été amincie ou n'a pas encore été soumise à un traitement thermique. Le principe reste cependant le même, pouvant être appliqué après les étapes de préparation et de caractérisation d'un échantillon Ref' de référence.

[0091] L'échantillon Ref' de référence est un échantillon obtenu dans une étape Prep-S00 au moyen des étapes S00 à S60, en outre soumis à une étape d'application d'un traitement

thermique de stabilisation tel que celui de l'étape S80 du premier mode de réalisation. Ce traitement thermique permet de révéler les effets sur la polarisation de la couche $Ferro_{lay}$ des étapes de fabrication S00 à S60, comme expliqué plus haut, en particulier dans les commentaires en référence à la [Fig.3], concernant les volumes de polarisation inversés. L'étape d'analyse Prep-S10 permet d'obtenir les caractéristique Char' des volumes V_A, V_B, V_C et V_D sur la base desquelles les paramètres d'implantation de l'étape S270 sont choisis, comme dans le premier mode de réalisation.

[0092] A la suite de l'étape S270, une étape S80 d'application d'un traitement thermique H.Treat' à la structure Struct est appliquée au cours d'une étape S280. Le traitement H.Treat' remplace les deux traitement H.Treat-1 et H.Treat-2 du premier mode de réalisation, avec ici un effet de stabilisation de la structure Struct comme le traitement H.Treat-1. L'étape S270 résulte en la formation de gradients de concentrations d'ions hydrogène générant des champs électriques s'opposant à aux inversions de polarisation dans le volume de la couche ferroélectrique. Ainsi, les volumes V_A et V_C d'inversion de la polarisation du volume V_B dans le premier mode de réalisation ne se forment pas. L'étape S270 permet de prévenir les inversions de polarisations susceptibles de survenir dans le volume de la couche ferroélectrique, à l'interface enterrée de la couche ferroélectrique avec l'ensemble de support, ou au niveau de ces deux régions.

[0093] Toutefois, le traitement thermique H.Treat' peut provoquer l'apparition d'un volume multidomaine en surface de la couche $Ferro_{lay}$, comme précédemment expliqué. Il est alors nécessaire de procéder à une étape S290 similaire à l'étape S100 de premier mode de réalisation, qui permet d'éliminer la couche multidomaine superficielle et de mettre la couche $Ferro_{lay}$ à l'épaisseur désirée.

[0094] Le procédé 200 a pour avantage sur le procédé 100 d'être plus simple, une seule étape de traitement thermique étant nécessaire au lieu de deux.

[0095] 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.

[0096] 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 de fabrication d'une structure comportant une couche ferroélectrique de polarisation négative (P1), comprenant les étapes de :
- fournir (S00) une plaquette de matériau ferroélectrique ($Ferro_{sub}$) ayant une première face (Top) et présentant une polarisation (-P1) orienté vers cette face ;
- former (S20) un plan de fragilisation (Frgl) dans la plaquette de matériau ferroélectrique ($Ferro_{sub}$) par une implantation d'ions hydrogène à travers la première face (Top) ;
- assembler (S40) la plaquette ($Ferro_{sub}$) de matériau ferroélectrique comportant le plan de fragilisation (Frgl) à un ensemble de support (Sprt.Set) par mise en contact de la première face avec une surface libre de l'ensemble de support ;
- détacher (S60) une partie de la plaquette de matériau ferroélectrique de manière à définir une couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) détachée de la plaquette de matériau ferroélectrique ($Ferro_{sub}$) et assemblée à l'ensemble de support (Sprt.Set) de manière à obtenir une structure (Struct) formée de la couche ferroélectrique et de l'ensemble de support, la couche ferroélectrique présentant une polarisation (P1) négative ;
- procéder (S120 ; S270) à une étape d'implantation plein champ d'hydrogène additionnelle, paramétrée de manière à corriger ou à prévenir la survenue d'inversion de polarisation dans le volume de la couche ferroélectrique et/ou à son interface avec l'ensemble de support (Sprt.Ens) ; et
- appliquer (S80, S280) au moins un premier traitement thermique (H.Treat-1 ; H. Treat') à la structure (Strct).

[Revendication 2] Le procédé selon la revendication 1, dans lequel l'étape (S120) d'implantation d'hydrogène additionnelle est effectuée après le au moins un premier traitement thermique (S80, Htreat-1), le procédé comprenant en outre une étape (S140) d'application d'un second traitement thermique (H.Treat-2) à la structure après l'étape (S120) d'implantation d'hydrogène additionnelle.

[Revendication 3] Le procédé selon la revendication 2, comprenant en outre une étape (S100) d'amincissement (S.Pol) de la couche ferroélectrique, préférentiellement entre l'étape (S80) d'application du premier

traitement thermique (H.Treat-1) et l'étape (S140) d'application du second traitement thermique (H.Treat-2).

[Revendication 4] Le procédé selon la revendication 1, dans lequel l'étape (S270) d'implantation d'hydrogène additionnelle est effectuée avant le au moins un premier traitement thermique (S280, Htreat').

[Revendication 5] Le procédé selon la revendication 4, comprenant en outre une étape (S290) d'amincissement (S.Pol') de la couche ferroélectrique, préférentiellement après l'étape (S280) d'application du premier traitement thermique (H.Treat').

[Revendication 6] Le procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 5, comprenant une étape (Prep-S10) de caractérisation d'une structure de référence (Ref ; Ref'), un ajustement de paramètres de l'étape d'implantation d'hydrogène additionnelle (S120 ; S270) étant définis en réponse à cette caractérisation.

[Revendication 7] Le procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 6, dans lequel l'étape d'implantation additionnelle d'ions hydrogène (S120 ; S270) comprend une première implantation ionique de correction dans la couche ferroélectrique (Ferrolay), paramétrée de manière à générer un parcours projeté des ions hydrogène implantés tel qu'une profondeur ($D1(R_P)$) de son maximum atteigne ou dépasse une profondeur de d'interface entre (i) un volume (V_B) de polarisation stable de la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) et (ii) un volume (V_C) de polarisation inversée en raison de la formation du plan de fragilisation ou de polarisation qui s'inverserait en raison de la formation du plan de fragilisation si un traitement thermique était appliqué.

[Revendication 8] Le procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 7, dans lequel l'étape d'implantation additionnelle d'ions hydrogène (S120 ; S270) comprend une seconde implantation ionique de correction, paramétrée de manière à générer un parcours projeté des ions hydrogène implantés tel qu'une profondeur ($D2(R_P)$) de son maximum atteigne ou dépasse la profondeur de l'interface entre (i) la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) et (ii) l'ensemble de support (Sprt.Ens), de préférence à une distance à cette interface qui est inférieure à l'épaisseur d'un volume (V_A) de polarisation qui est limité par cette interface et qui est multidomaine ou inversée par rapport à une polarisation d'un volume (V_B) de polarisation stable de

la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) ou qui s'inverserait ou deviendrait multidomaine si un traitement thermique était appliqué.

[Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 8, dans lequel l'étape d'implantation plein champ d'hydrogène additionnelle est paramétrée de manière à obtenir une concentration d'hydrogène comprise entre 10^{19} à 10^{22} at/cm^3 dans un volume (V_A, V_B, V_C) de la structure.

[Revendication 10] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 9, dans lequel la couche ferroélectrique s'étend dans un plan d'extension et la polarisation (P1) fait un angle avec compris dans une plage angulaire ([Ang]) allant de -20° à -160° par rapport au plan d'extension.

[Revendication 11] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 10, dans lequel la couche ferroélectrique ($Ferro_{lay}$) est une couche de niobate de lithium ou de tantalate de lithium.