

Description

Titre de l'invention :

STRUCTURE INTÉGRÉE REPORTÉE SUR UN SUBSTRAT, COMPRENANT UNE COUCHE FERROÉLECTRIQUE À POLARISATION SÉLECTIVEMENT INVERSÉE DANS SON ÉPAISSEUR, ET SON PROCÉDÉ DE FABRICATION

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

- [0001] L'invention concerne une structure intégrée comprenant une couche ferroélectrique reportée sur un support, et un procédé de fabrication de cette structure. Une telle structure peut être exploitée pour former par exemple des composants radiofréquences (RF) en particulier des composants à ondes élastiques de volume.

ARRIÈRE 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 uns aux autres. On peut citer 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 procédé 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 obtenu 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 l'un des 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 et son intégration sur un support.

Exposé de l'invention

- [0007] Un premier objet de l'invention est de fournir une couche ferroélectrique, éventuellement sous une forme intégrée sur un substrat, de polarisation présentant des domaines de polarisation d'orientations opposées et perpendiculaires ou obliques par rapport au plan de cette couche, les domaines se répartissant dans l'épaisseur de la couche ferroélectrique, cette dernière étant apte à être utilisée en vue, par exemple, d'applications basées sur les ondes acoustiques de volume. Un second objet de l'invention est un procédé de fabrication permettant d'obtenir la couche ferroélectrique intégrée mentionnée ci-dessus. Un troisième objet de l'invention est un procédé d'inversion locale et contrôlée de la polarisation d'un élément ferroélectrique quelconque dans son épaisseur.
- [0008] En vue de la réalisation de ces objectifs, un premier aspect de l'invention est une structure comprenant une couche ferroélectrique présentant une première polarisation dans un premier volume et une deuxième polarisation, opposée à la première polarisation, dans un deuxième volume distinct du premier volume, dans laquelle la première polarisation et la deuxième polarisation sont orientées perpendiculairement ou obliquement à la couche ferroélectrique, une surface du premier volume forme une face de la couche ferroélectrique et le premier volume est interposé entre cette face de la couche ferroélectrique et le deuxième volume, le deuxième volume présente une concentration d'hydrogène, dite concentration d'inversion de polarité, plus élevée que le premier volume, et la concentration d'inversion de polarité est comprise entre 10^{19} et 10^{22} atomes d'hydrogène par centimètre cube.
- [0009] Un avantage de la structure selon l'invention est la fourniture d'une structure intégrée, incluant un substrat sur lequel est fixée une couche ferroélectrique présentant une polarisation perpendiculaire ou oblique par rapport aux plans d'extension de la couche et du substrat, cette polarisation étant modulée dans l'épaisseur de la couche ferroélectrique. Une telle structure facilite par exemple l'intégration de fonctions d'acoustique de volume tout en maintenant un coût bas.
- [0010] Selon des caractéristiques additionnelles non-limitative du premier aspect de l'invention, considérées individuellement ou selon toute combinaison techniquement

réalisable :

- la structure peut en outre comprendre un support et une couche métallique interposée entre ce support et la couche ferroélectrique ;
- la couche ferroélectrique peut être formée d'un monocristal ;
- la couche ferroélectrique peut comprendre du niobate de lithium ou du tantalate de lithium ; et
- le support peut comprendre du silicium monocristallin.

[0011] Un second aspect de l'invention porte sur un procédé de fabrication d'une structure dont la polarisation est contrôlée localement, comprenant les étapes de fournir un élément ferroélectrique présentant une première polarisation ; enrichir un volume donné enterré de l'élément ferroélectrique en ions hydrogène par une implantation ionique des ions hydrogène à travers une face de l'élément ferroélectrique, un premier volume de l'élément ferroélectrique étant interposé entre le volume donnée enterré et la face de l'élément ferroélectrique ; et appliquer un recuit à l'élément ferroélectrique après introduction des ions hydrogène, à une température comprise entre 500°C et 700°C, de manière à faire basculer la première polarisation de l'élément ferroélectrique dans le volume donné vers une deuxième polarisation opposée en orientation à la première polarisation, le premier volume présentant, après le recuit, la première polarisation.

[0012] Le procédé selon l'invention est avantageux en ce qu'il est simple, flexible, et s'intègre aisément dans un procédé de fabrication plus large reposant sur des techniques de fabrication connues et éprouvées de l'industrie des semi-conducteurs. En outre, il permet le contrôle de la polarisation d'un élément ferroélectrique dans son épaisseur et est applicable à des couches minces intégrées sur un substrat.

[0013] Selon des caractéristiques additionnelles non-limitative du second aspect de l'invention, considérées individuellement ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- la première polarisation peut être monodomaine, perpendiculaire ou oblique par rapport à une face de l'élément ferroélectrique ;
- lors de l'enrichissement sélectif des ions hydrogène, une dose d'implantation d'ions hydrogène peut être adaptée de manière à obtenir une concentration d'hydrogène comprise entre 10^{19} et 10^{22} atomes d'hydrogène par centimètre cube ;
- l'implantation d'ions hydrogène peut être mise en œuvre à une énergie comprise entre 3 keV et 210 keV ;
- l'élément ferroélectrique peut être une couche de niobate de lithium ou de tantalate de lithium ;
- le procédé peut en outre comprendre l'assemblage d'un substrat ferro-

- électrique et d'un support, suivi d'une séparation ou d'un amincissement du substrat ferroélectrique de manière à définir l'élément ferroélectrique ; et
- le support peut être un substrat de silicium monocristallin, et une couche métallique peut être interposée entre ce substrat de silicium monocristallin et le substrat ferroélectrique.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

- [0014] 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 :
- [0015] [Fig.1] La [Fig.1] représente un élément ferroélectrique de polarisation sélectivement modifiée dans son épaisseur et un procédé de fabrication correspondant selon la présente description ;
- [0016] [Fig.2] La [Fig.2] représente des variantes de l'élément ferroélectrique de la [Fig.1] ;
- [0017] [Fig.3] La [Fig.3] illustre un premier procédé d'intégration d'une couche ferroélectrique sur un support ;
- [0018] [Fig.4] La [Fig.4] illustre un second procédé d'intégration d'une couche ferroélectrique sur un support ;
- [0019] [Fig.5] La [Fig.5] est une vue schématique en coupe d'un dispositif selon la présente description ;
- [0020] [Fig.6] La [Fig.6] est une première variation du dispositif de la [Fig.5] ; et
- [0021] [Fig.7] La [Fig.7] est une seconde variation du dispositif de la [Fig.5].

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

- [0022] Inversion sélective de polarisation selon la profondeur
- [0023] A la suite d'une série d'expérimentations, la demanderesse a réalisé qu'il est possible de basculer la polarisation de domaines de polarisation par implantation d'hydrogène suivi d'un recuit. Ces résultats expérimentaux sont mis en œuvre dans le procédé de fabrication décrit ci-dessous, aboutissant à un élément ferroélectrique 10 présentant des domaines de polarisation inversée à des profondeurs choisies par le praticien.
- [0024] L'élément ferroélectrique 10 peut être un monocristal ferroélectrique en tant que tel, ce monocristal peut se présenter sous la forme d'une couche monocristalline ferroélectrique, ce cristal ferroélectrique ou cette couche monocristalline ferroélectrique peuvent se présenter fixés sur un support Spt au sein d'une structure Struct, comme la couche ferroélectrique Ferro_{lay} illustré en (D) de la [Fig.3].
- [0025] Les figures 1 et 2 illustrent un premier mode de réalisation, dans lequel l'élément ferroélectrique 10 est un monocristal ferroélectrique en tant que tel, c'est-à-dire indépendant de tout support.
- [0026] La [Fig.1] représente en (A) une coupe, selon un plan ZX, de l'élément ferroélectrique 10 ayant deux faces opposées Sup et Inf perpendiculaires à une direction Z

et présentant une première polarisation P1 monodomaine parallèle à la direction Z et perpendiculaire aux faces supérieure Sup et inférieure Inf qui sont chacune parallèles au plan d'extension de l'élément ferroélectrique 10, c'est-à-dire le plan cristallin dans lequel ses dimensions sont les plus grandes.

- [0027] A des fins explicatives, ce mode de réalisation prend l'exemple d'une polarisation perpendiculaire au plan d'extension de l'élément ferroélectrique 10. Cependant, l'invention s'applique également à la situation où la polarisation n'est pas perpendiculaire au plan d'extension de l'élément ferroélectrique 10 mais oblique par rapport à celui-ci. La caractéristique « perpendiculaire » s'entend d'une inclinaison de 90° par rapport au plan d'extension de l'élément ferroélectrique à 10° près, la caractéristique « oblique » ou « obliquement » s'entend d'une inclinaison écartée d'au moins 5° par rapport au plan d'extension de l'élément ferroélectrique. On peut ainsi considérer comme oblique une direction présentant une inclinaison comprise dans la plage allant de 5° à 80°, ou de 30° à 70°, ou encore de 35° à 60°. Par exemples, une couche de LiTaO₃ 50RY et une couche de LiTaO₃ 42RY présentent des polarisation inclinées de 50° et 42° par rapport au plan d'extension de la couche, respectivement, donc des polarisations obliques par rapport au plan d'extension de la couche.
- [0028] A une étape S10, on enrichit l'élément ferroélectrique 10 en hydrogène à une profondeur choisie par implantation ionique sélective d'ion hydrogène H⁺ à travers la surface supérieur Sup, à une énergie d'implantation comprise entre 3 keV et 210 keV. La profondeur de l'implantation et son étendue selon la direction Z sont contrôlées par l'énergie d'implantation et la dose d'ions hydrogène implantés.
- [0029] Comme illustré par la [Fig.1] en (B), cette étape S10 résulte en la formation d'un volume V2 (indiqué par le hachurage sur les figures) relativement riche en hydrogène dans l'élément ferroélectrique 10, directement sous la surface supérieur Sup et sur un volume V1 (zones blanches de l'élément ferroélectrique 10) relativement pauvre en hydrogène, et de profondeur dépendant de l'énergie d'accélération de l'étape d'implantation. Le volume V2 est ainsi interposé entre le volume V1 non implanté et la surface supérieur Sup de l'élément ferroélectrique 10. La dose d'implantation est adaptée à l'énergie d'implantation de manière à obtenir une densité d'hydrogène comprise entre 10¹⁹ et 10²² atomes/cm³ dans le volume V2. Il est possible de procéder à plusieurs implantations successives à différentes énergies d'implantation et doses afin de mieux définir le volume V2 en homogénéisant la répartition de l'hydrogène implanté dans ce volume.
- [0030] A ce stade, la polarisation de l'ensemble de l'élément ferroélectrique 10 reste inchangée dans les volumes implantés, le volume V2 implanté et les régions du volume V1 non implanté formant toujours un unique monodomaine dans lequel la polarisation ne possède qu'une seule orientation.

- [0031] A titre d'exemple, on peut employer une dose d'ions hydrogène implantés comprise entre 10^{14} et 10^{15} at/cm² accélérés par une tension de 6kV pour créer un volume V2 de retournement de polarisation s'étendant sur environ 50 nm dans la direction Z d'épaisseur, volume V2 dans lequel la concentration d'hydrogène est comprise entre 10^{19} et 10^{22} , préférablement entre $5 \cdot 10^{19}$ et $2 \cdot 10^{21}$ at/cm³. Dans tous les cas, le volume V2, enrichi en hydrogène, présente une concentration d'hydrogène, dite concentration d'inversion de polarité, plus élevée que le premier volume V1.
- [0032] Dans le présent document, les plans YX et ZX sont définis par les axes X, Y Z d'un repère orthogonal, le plan YX étant défini par les axes Y et X du repère, le plan ZX étant défini par les axes Z et X du repère. Les faces Sup et Inf de l'élément ferroélectrique 10 s'étendent parallèlement au plan YX, perpendiculairement à l'axe Z qui définit la direction d'extension de l'épaisseur de l'élément ferroélectrique 10. On entend par profondeur une distance selon l'axe Z considérée à partir de la surface supérieure Sup. En outre, Une modulation de la polarisation ou de la concentration en hydrogène de l'élément ferroélectrique 10 selon son épaisseur s'entendent respectivement comme des variations de concentration en hydrogène ou des changements de sens de la polarisation dans le volume de cet élément selon la direction Z.
- [0033] A une étape S20, on soumet l'élément ferroélectrique 10 sélectivement enrichi en hydrogène à un recuit à une température comprise entre 500°C et 800°C, préférablement entre 500°C et 700°C, plus préférablement entre 550°C et 600°C. Cette étape de recuit entraîne une inversion de la première polarisation P1 de l'élément ferroélectrique 10 seulement au niveau du volume V2 enrichi en hydrogène pour donner une deuxième polarisation P2, de même direction d'alignement que la première polarisation P1 mais de sens opposé à celle-ci, comme illustré en (C₀). On définit comme polarisations antiparallèles des polarisation alignées selon des directions parallèles mais de sens opposés. Inversement, on définit des polarisation parallèles des polarisation alignées selon des directions parallèles mais de même sens. La définition du volume V2 par l'enrichissement en hydrogène permet la sélectivité de l'inversion de la polarisation, qui se propage depuis la surface supérieur Sup jusque dans l'ensemble du volume V2 et passe ainsi d'une polarisation parallèle entre les volumes V1 et V2 à une polarisation antiparallèle entre les volumes V1 et V2. Le recuit se fait de préférence sous atmosphère d'oxygène pour réduire l'exodiffusion d'oxygène de la couche ferroélectrique, mais peut aussi se faire par exemple sous atmosphère d'azote ou d'air, à une pression atmosphérique pour une durée comprise entre 100 secondes et 10 heures.
- [0034] La concentration en hydrogène dans le volume V2 obtenue à la suite de l'étape S10 est nécessaire à l'inversion de polarisation obtenue à l'étape S20, et peut à ce titre être qualifiée de concentration d'inversion de polarisation.
- [0035] La [Fig.2] illustre en (C1) et (C2) des variantes pour le volume V2, obtenues en

ajustant le nombre d'implantation et leurs énergies et doses respectives. En (C1), l'énergie d'implantation a été suffisante pour enrichir une partie de l'élément ferroélectrique 10 éloignée de la surface Sup et atteignant la surface inférieure Inf. Le volume V2 s'étend donc à partir de la face inférieure Inf de l'élément ferroélectrique, tout en laissant un volume V1 non implanté du côté de la surface supérieure sup, de sorte qu'une surface du volume V1 forme une face (Sup) de la couche ferroélectrique. En (C2), l'enrichissement en hydrogène à une concentration adéquate a affecté la totalité du volume de l'élément ferroélectrique 10, l'inversion de polarisation est effective sur la totalité de l'épaisseur du cristal de sorte que le volume V1 disparaît, entièrement remplacé par le volume V2. Ces variantes peuvent être obtenues en employant des séquences d'implantations d'ions hydrogène de paramètres adaptés.

[0036] Comme déjà mentionné, ce premier mode de réalisation est illustratif et n'est pas limité au contrôle de la polarisation d'un simple cristal ferroélectrique, mais peut également s'appliquer à des structures plus complexes comme un cristal ferroélectrique rapporté sur un support, comme cela deviendra apparent dans la suite de cet exposé.

Intégration sur un support – Solution 1

[0037] Le procédé d'inversion sélective de polarisation selon la profondeur dans la couche ferroélectrique décrit ci-dessus est illustré dans les figures 1 et 2 dans la situation où il est appliqué à un cristal ferroélectrique seul, utilisé comme l'élément ferroélectrique 10. Ce procédé d'inversion sélective selon la profondeur peut également s'appliquer à un ensemble formé d'un cristal ferroélectrique intégré sur un substrat, cet ensemble pouvant alors constituer l'élément ferroélectrique 10 illustré par les figures 1 et 2.

[0038] L'intégration sur un substrat peut être effectuée comme expliqué ci-dessous à l'aide la [Fig.3], et en référence à la publication WO 2020/200986 A1 qui décrit en particulier le report d'une couche mince ferroélectrique monodomaine sur un substrat.

[0039] La [Fig.3] représente un procédé de fabrication d'une structure Struct intégrée illustrée en (D), comportant une couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ fixée sur un support Sprt avec une couche métallique M1 électriquement conductrice interposée entre ces deux éléments. Dans cet exemple, la couche métallique M1 est en contact direct avec chacun du support Sprt et de la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$. La couche M1 pourra être utilisée par la suite en tant qu'électrode enterrée destinée à appliquer un champ électrique à la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$. La présence d'une couche M1 métallique ne représente qu'une option et d'autres applications que celles de cet exemple ne requièrent pas la présence d'une telle couche.

[0040] 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.

[0041] La couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ est constituée d'un matériau ferroélectrique mono-

cristallin, tel que du tantalate de lithium LiTaO_3 ou du niobate de lithium LiNbO_3 , ou encore des matériaux tels que LiAlO_3 , BaTiO_3 , PbZrTiO_3 , KNbO_3 , BaZrO_3 , CaTiO_3 , PbTiO_3 ou de KTaO_3 . Ces matériaux présentent également des propriétés piézo-électriques. 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 préférentiellement une première polarisation P1 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 la perpendiculaire au plan de la couche ferroélectrique, c'est-à-dire perpendiculaire à la face libre de cette couche, ou encore perpendiculaire à un plan de surface de cette couche.

[0042] Pour des raisons de disponibilité et de coût, le support Sprt est préférentiellement choisi, quant à lui, 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. Le support Sprt, lorsque celui-ci est formé d'un substrat massif présente typiquement une épaisseur de plusieurs centaines de microns. En silicium monocristallin, le support Sprt est conducteur électrique, mais, préférentiellement, présente une résistivité élevée, supérieure à 1000 ohms. On limite de la sorte la densité des charges, trous ou électrons, qui sont susceptibles de se déplacer, ce qui pourrait affecter le bon fonctionnement d'un composant RF qui serait formé sur la base de la structure Struct. Mais l'invention n'est pas limitée à un support présentant de telles caractéristiques.

[0043] La couche métallique peut présenter une épaisseur comprise entre quelques nanomètres et plusieurs microns, par exemple 100 nm ou plus. Elle peut typiquement être formée d'un métal tel que du chrome, du nickel, de l'aluminium, du platine, du titane, du tungstène, de l'or ou toutes combinaisons de ces éléments entre eux ou avec d'autres éléments métalliques, en une couche unique ou en une combinaison de couches.

[0044] En référence à la [Fig.3], la structure Struct peut être réalisée par un procédé de fabrication par report de couche comprenant :

- la préparation du support Sprt illustré en (A) avec ici la formation de la couche métallique M1 à sa surface ;

- l'éventuelle préparation d'un substrat donneur ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{sub}}$ illustré en (B);
- l'assemblage d'une première face du support Sprt et d'une face du substrat donneur ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{sub}}$ afin de constituer une structure intermédiaire $\text{Struct}_{\text{inter}}$ illustrée en (C) avec la couche métallique M1 interposée entre le support Sprt et la face du donneur du substrat ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{sub}}$; et
- le détachement d'une partie du substrat donneur $\text{Ferro}_{\text{sub}}$ de la structure intermédiaire pour définir la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ sur le support Sprt et obtenir la structure Struct illustrée en (D).

[0045] Le substrat donneur $\text{Ferro}_{\text{sub}}$ illustrée en (B) est un substrat constitué du matériau ferroélectrique de la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$, ou comprenant une épaisseur superficielle en 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 $\text{Ferro}_{\text{lay}}$) de tantalate de lithium ou de niobate de lithium. Le substrat donneur présente de préférence une première polarisation P1 monodomaine perpendiculaire à la face d'implantation Imp par laquelle des ions hydrogène H^+ seront implantés dans le substrat donneur en vue d'une étape de détachement ultérieure. Cette orientation se fait conventionnellement en choisissant le mode de croissance du cristal et son plan de coupe.

[0046] La couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ peut être transférée du substrat donneur ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{sub}}$ 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 $\text{Ferro}_{\text{sub}}$. 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 $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ de matériau ferroélectrique à transférer qui est située du côté de la face Imp et une autre partie $\text{Ferro}_{\text{sep}}$ formant le reste du substrat et qui sera séparée de la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ à une étape ultérieure.

[0047] 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 $\text{Ferro}_{\text{sub}}$. Dans le cas d'un substrat donneur en LiTaO_3 , on pourra choisir d'implanter une dose d'hydrogène comprise entre 10^{16} et $5 \cdot 10^{17}$ at/cm² avec une énergie comprise entre 30 et 300 keV pour délimiter une couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ de l'ordre de 200 à 2000 nm d'épaisseur.

[0048] Suite aux préparations du support Sprt et du substrat donneur $\text{Ferro}_{\text{sub}}$, incluant la

formation de la couche métallique M1 sur le support ou le substrat donneur, ces deux éléments sont assemblés par leur mise en contact, de manière à ce que la couche métallique M1 soit interposée entre le support Sprt et la couche ferroélectrique Ferro_{lay}, cette dernière se situant en vis-à-vis du support Sprt, de manière à obtenir la structure intermédiaire Struct_{inter} illustrée en (C) de la [Fig.4]. 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.

- [0049] 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.
- [0050] 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.
- [0051] 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.
- [0052] 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.
- [0053] 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. 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.
- [0054] 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 Ferro_{lay} et le transfert de celle-ci sur le substrat support Sprt. 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.

- [0055] Alternativement à la mise en œuvre du procédé Smart Cut™ détaillé ci-dessus, l'étape de détachement d'une partie du substrat donneur peut être remplacée par une étape d'amincissement mécano-chimique de ce substrat ferroélectrique donneur Ferro_{sub}.
- [0056] Que l'élimination d'une partie de l'épaisseur du substrat donneur soit réalisée par amincissement ou par fracture, on peut appliquer à la structure Struct ainsi formée tout type de traitement de finition permettant de conformer la couche ferroélectrique Ferro_{lay} à des spécifications d'épaisseur, d'uniformité d'épaisseur, de rugosité, de qualité cristalline ou à tout autre type de spécifications.
- [0057] En particulier, dans l'optique d'utiliser une couche ferroélectrique Ferro_{lay} qui aurait une polarisation monodomaine, on peut appliquer un traitement particulier à la couche ferroélectrique Ferrolay reportée sur le substrat Subst, le tout dans le but d'obtenir une polarisation monodomaine de la couche ferroélectrique Ferro_{lay}.
- [0058] On peut par exemple appliquer à la couche ferroélectrique Ferro_{lay} un traitement thermique de préparation suivi d'une étape d'amincissement.
- [0059] Le traitement thermique de préparation permet de guérir des défauts cristallins présents dans la couche ferroélectrique. En outre, il peut aussi contribuer à consolider le collage entre cette couche ferroélectrique Ferro_{lay} et le support Sprt. Il a également pour effet, s'il présente une température suffisante, de provoquer la diffusion de l'hydrogène contenue dans la couche ferroélectrique et la transformation multidomaine d'une portion superficielle de cette couche ferroélectrique. Cette portion superficielle peut présenter une épaisseur de l'ordre de 50 nm ou moins et se développer sur toute l'étendue de la couche ferroélectrique. A l'issue du traitement thermique de préparation, la couche ferroélectrique présente une concentration d'hydrogène relativement constante dans son épaisseur. Dans le cas du LiTaO₃, ce traitement thermique de préparation 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° pour favoriser la diffusion de l'hydrogène) 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, c'est à dire sans recouvrir cette face de la couche mince d'une couche de protection qui pourrait prévenir l'exodiffusion de l'hydrogène.
- [0060] A la suite du traitement thermique de préparation, on opère l'amincissement de 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 in-

férieure à 0,5nm RMS 5x5 μm par mesure par force atomique (AFM) et d'enlever la portion superficielle multidomaine de la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$. On prévoit généralement un enlèvement de 50 à 300 nm d'épaisseur pour atteindre l'épaisseur cible de la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$, et dans tous les cas une épaisseur supérieure à celle de la portion superficielle multidomaine. On constitue ainsi une couche mince monodomaine présentant les qualités requises d'état de surface, de qualité cristalline et de polarisation.

- [0061] A la suite des opérations décrites ci-dessus, une inversion sélective de polarisation comme illustré par les figures 1 et 2 appliqué à la structure Struct illustrée en (D) de la [Fig.3] permet de former la structure Struct illustrée en (D) de la [Fig.4].

Intégration sur un support – Solution 2

- [0062] La solution 1 illustre un procédé d'assemblage d'un substrat donneur $\text{Ferro}_{\text{sub}}$ présentant de préférence une première polarisation P1 monodomaine perpendiculaire à une face plane du substrat. Par la suite, une inversion sélective de polarisation peut être appliquée à la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ de la structure Struct obtenue pour arriver à deux polarisations verticales de sens opposées au sein de cette couche ferroélectrique.
- [0063] La présente section présente une solution 2 alternative à la solution 1 en ce qu'au lieu d'appliquer une inversion sélective de la polarisation après l'assemblage, une inversion sélective de polarisation est appliquée à un substrat ferroélectrique donneur avant l'assemblage, comme illustré par la [Fig.4].
- [0064] Ainsi, sauf indications contraires, on peut se reporter à la solution 1 pour l'ensemble des étapes du procédé d'assemblage illustré par la [Fig.4], y compris l'alternative par amincissement du substrat donneur $\text{Ferro}_{\text{sub}}$ plutôt que par fracture de celui-ci. En revanche, dans cette solution 2, le substrat donneur $\text{Ferro}_{\text{sub}}$ présente deux polarisations verticales P1 et P2 de sens opposés. Un tel substrat peut par exemple être obtenu à partir d'un substrat de polarisation monodomaine par inversion sélective de polarisation selon la profondeur comme illustré par les figures 1 à 2 et le procédé de fabrication associé.
- [0065] Cette solution permet d'obtenir une couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ dont la polarisation en surface est contrôlé sans avoir à utiliser une implantation à forte énergie
- [0066] Cette solution permet en outre de déterminer lequel du volume V1 et du volume V2 se trouvera en surface de la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ dans la structure illustrée en (D) de la [Fig.4]. En effet, selon la localisation en profondeur du plan de fragilisation Frgl, celui-ci pourra se trouver soit (1) dans le volume V1 comme illustrée par la [Fig.4], soit (2) dans le volume V2 (situation non illustré). Dans le premier cas, c'est le volume V1, et donc la polarisation P1, qui se trouvera en surface libre de la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$, le volume V2 étant enterré sous le volume V1, comme illustré par

la [Fig.4]. Dans le second cas, c'est le volume V2, et donc la polarisation P2, qui se trouvera en surface libre de la couche ferroélectrique Ferro_{lay}, le volume V1 étant enterré sous le volume V2.

- [0067] Alternativement, à partir de la structure illustrée en (D) de la [Fig.4], une étape de polissage mécano-chimique appliquée à la couche ferroélectrique Ferro_{lay} permet d'amincir celle-ci, éventuellement jusqu'à exposer le volume V2, de sorte que sa surface constitue la face libre de la couche ferroélectrique Ferro_{lay}.

Variantes

- [0068] Les exemples ci-dessus illustrés par les figures 3 et 4 ne comprennent explicitement qu'une couche métallique M1, située entre le support Sprt et la couche ferroélectrique Ferro_{lay}. Optionnellement, la structure peut comprendre une couche métallique supplémentaire ou des couches diélectriques optionnelles au niveau de l'interface entre le support Sprt et la couche ferroélectrique Ferro_{lay}.
- [0069] La [Fig.5] illustre une structure Struct comprenant une seconde couche métallique M2 située en surface de la couche ferroélectrique, la couche ferroélectrique Ferro_{lay} étant interposée entre les deux couches métalliques M1 et M2. Cette configuration peut être utilisée dans le cadre d'un dispositif à ondes acoustiques de volume, les couches métalliques M1 et M2 servant d'électrodes pour l'application d'un champ électrique à la couche ferroélectrique Ferro_{lay}.
- [0070] La [Fig.6] illustre une structure Struct comportant en outre une première couche diélectrique telle qu'une couche d'oxyde Ox1 interposée entre le substrat Sprt et la première couche métallique M1. Il peut par exemple s'agir du résultat d'un procédé de fabrication de la structure Struct dans lequel la couche métallique M1 est formée sur la couche diélectrique Ferro_{lay}, la couche diélectrique Ox1 est formée sur le support Sprt, puis la couche ferroélectrique Ferro_{lay} est assemblée au support Sprt par mise en contact intime de la couche métallique avec la couche diélectrique, selon un procédé analogue à celui expliqué en rapport avec la [Fig.3], avec ici un contact oxyde-métal.
- [0071] La [Fig.7] illustre une structure Struct similaire à celle de la [Fig.6], comportant en outre une seconde couche diélectrique telle qu'une couche d'oxyde Ox2 interposée entre la première couche métallique M1 et la première couche diélectrique Ox1. Il peut par exemple s'agir du résultat d'un procédé de fabrication de la structure Struct dans lequel la couche métallique M1 et la seconde couche diélectrique Ox2 sont formées successivement et dans cet ordre sur la couche diélectrique Ferro_{lay}, la couche diélectrique Ox1 est formée sur le support Sprt, puis la couche ferroélectrique Ferro_{lay} est assemblée au support Sprt par mise en contact intime des deux couches diélectriques Ox1 et Ox2, selon un procédé analogue à celui expliqué en rapport avec la [Fig.3], avec ici un contact diélectrique-diélectrique, et plus spécifiquement oxyde-oxyde dans cet exemple.

- [0072] Les deux procédés expliqués ci-dessus par rapport aux figures 6 et 7 ne sont que deux exemples, et d'autres procédés sont envisageables, aboutissant aux mêmes résultats ou à d'autres variantes de la structure Struct. On peut ainsi former un miroir de Bragg adjacent à la couche ferroélectrique Ferrolay, de préférence entre cette couche et le support Sprt, par exemple sous la couche métallique M1, en formant un empilement de paires de couches comprenant une couche de SiO₂ et une couche de HfSO₂ ou une couche de SiO₂ et une couche de Mo ou autres structures et matériaux connus pour former des miroirs de Bragg. La couche métallique M2 peut avoir la même composition que la couche M1 ou peut avoir une composition différente. Les couches d'oxyde Ox1 et Ox2 peuvent être par exemples des couches d'oxyde de silicium ou d'oxyde de nitrure de silicium.
- [0073] En outre, le support Sprt peut être préparé par adjonction d'une couche diélectrique pouvant être formée d'un empilement de couches diélectriques de nature différentes. La couche diélectrique peut être élaborée directement sur le support Sprt selon différentes techniques connues de l'état de l'art, telles des traitements thermiques d'oxydation ou de nitruration, des dépôts chimiques selon des techniques dites LPCVD (acronyme de l'expression anglo-saxonne « Low Pressure Chemical Vapor Deposition » ou dépôt chimique en phase vapeur à pression sous atmosphérique) ou PECVD (acronyme de l'expression anglo-saxonne « Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition » ou dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma) ou encore PVD (Physical Vapor Deposition) ou ALD (Atomic Layer Deposition).
- [0074] L'assemblage du support avec la couche ferroélectrique peut provoquer une accumulation d'hydrogène à l'interface entre eux, constituant un gradient de concentration d'hydrogène rendant possible la transformation multidomaine d'une portion de la couche ferroélectrique à proximité de cette interface, par exemple au cours du traitement thermique de séparation de la couche ferroélectrique Ferro_{lay} du substrat ferroélectrique Ferro_{sub}.
- [0075] On peut s'assurer que la couche métallique et les couches diélectriques optionnelles adjacentes à la couche ferroélectrique Ferro_{lay} présentent une concentration d'hydrogène inférieure à celle présente dans la couche ferroélectrique Ferro_{lay}, de sorte que l'hydrogène en excès dans la couche ferroélectrique peut être absorbé dans ces couches adjacentes lors de la diffusion provoquée par le traitement thermique de séparation de la couche Ferro_{sep}. On prévient ainsi l'accumulation d'hydrogène à l'interface d'assemblage et on évite une transformation multidomaine dans la portion de la couche ferroélectrique à proximité de cette interface.
- [0076] La concentration d'hydrogène de la couche métallique et des couche diélectrique optionnelles peut être réduite par exemple au moyen d'une étape de recuit qui vise à porter ces couches adjacentes à une température supérieure à celle du traitement

thermique de préparation de la couche ferroélectrique $\text{Ferro}_{\text{lay}}$ reportée, que l'on présentera ultérieurement dans cette description. On peut ainsi porter cette couche à une température de recuit de 600°C, 700°C, voire même 800°C ou plus. La concentration moyenne en hydrogène dans la couche diélectrique, après cette étape d'exodiffusion, peut ainsi être inférieure $5 \cdot 10^{20} \text{ at/cm}^3$, ou avantageusement inférieure à 10^{18} at/cm^3 .

- [0077] Les exemples illustrés dans cette description se limitent à un volume V2 continu formant une couche unique de polarisation inversée dans l'épaisseur de la couche ferroélectrique, mais il est possible de produire une paire de tels volumes V2 s'étendant respectivement à partir de deux surfaces opposées d'une couche piézoélectrique, un volume V1 de polarisation non inversée et donc opposée à celle des deux volumes V2 étant interposé entre ces deux volumes V2. Les deux volumes V2 distincts peuvent être formés en procédant à plusieurs implantations successives d'ions hydrogène d'énergies d'accélération et donc de profondeurs d'implantation différentes, de manière à définir deux volumes V2 chacun ouverts sur une surface de la couche ferroélectrique et d'épaisseurs fonctions des énergies d'implantation associées. On peut ainsi obtenir une alternance de polarisations opposées selon la direction d'épaisseur de la couche ferroélectrique.
- [0078] Exemples d'applications
- [0079] Chacune des structures illustrées par les figures 5, 6 et 7 peut constituer un dispositif à onde acoustique de volume ou être intégrée dans un tel dispositif formant par exemple un filtre passe-bande BAW.
- [0080] Des simulations numériques ont permis de déterminer qu'un tel dispositif présenterait une sensibilité réduite de la fréquence à l'épaisseur et une amélioration de la tenue en puissance, la densité d'énergie dans la couche étant répartie sur l'ensemble de l'épaisseur de la couche ferroélectrique.
- [0081] 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.
- [0082] 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] Structure (Struct) comprenant une couche ferroélectrique (Ferro_{lay}) présentant une première polarisation (P1) dans un premier volume (V1) et une deuxième polarisation (P2), opposée à la première polarisation, dans un deuxième volume (V2) distinct du premier volume, **caractérisée en ce que** la première polarisation et la deuxième polarisation sont orientées perpendiculairement ou obliquement à la couche ferroélectrique, une surface du premier volume (V1) forme une face (Sup) de la couche ferroélectrique (Ferro_{lay}) et le premier volume (V1) est interposé entre cette face de la couche ferroélectrique et le deuxième volume (V2), dans laquelle le deuxième volume (V2) présente une concentration d'hydrogène, dite concentration d'inversion de polarité, plus élevée que le premier volume (V1), et dans laquelle la concentration d'inversion de polarité est comprise entre 10^{19} et 10^{22} atomes d'hydrogène par centimètre cube.
- [Revendication 2] Structure selon la revendication 1, comprenant en outre un support (Sprt) et une couche métallique (M1) interposée entre ce support et la couche ferroélectrique.
- [Revendication 3] Structure selon l'une quelconque des revendications 1 à 2, dans laquelle la couche ferroélectrique est formée d'un monocristal.
- [Revendication 4] Structure selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans laquelle la couche ferroélectrique comprend du niobate de lithium ou du tantalate de lithium.
- [Revendication 5] Structure selon l'une quelconque des revendications 2, dans laquelle le support comprend du silicium monocristallin.
- [Revendication 6] Procédé de fabrication d'un élément ferroélectrique (10), comprenant les étapes de :
- fournir un élément ferroélectrique (10, Ferrolay) présentant une première polarisation (P1) ;
 - enrichir un volume donné (V2) enterré de l'élément ferroélectrique en ions hydrogène (H⁺) par une implantation ionique des ions hydrogène (H⁺) à travers à travers une face (Sup) de l'élément ferroélectrique, un premier volume (V1) de l'élément ferroélectrique (10) étant interposé entre le volume donnée (V2) enterré et la face (Sup) de l'élément ferroélectrique ; et
 - appliquer un recuit à l'élément ferroélectrique après introduction des ions hydrogène, à une température comprise entre 500°C et 700°C, de

- manière à faire basculer la première polarisation (P1) de l'élément ferroélectrique dans le volume donné (V2) vers une deuxième polarisation (P2) opposée en orientation à la première polarisation (P1), le premier volume (V1) présentant, après le recuit, la première polarisation (P1).
- [Revendication 7] Procédé selon la revendication 6, dans lequel la première polarisation (P1) est monodomaine, perpendiculaire ou oblique par rapport à une face (Sup) de l'élément ferroélectrique.
- [Revendication 8] Procédé selon la revendication 6 ou 7, dans lequel, lors de l'enrichissement sélectif des ions hydrogène, une dose d'implantation d'ions hydrogène (H⁺) est adaptée de manière à obtenir une concentration d'hydrogène comprise entre 10¹⁹ et 10²² atomes d'hydrogène par centimètre cube dans le volume donné (V2).
- [Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 8, dans lequel l'implantation ionique d'ions hydrogène est mise en œuvre à une énergie comprise entre 3 keV et 210 keV.
- [Revendication 10] Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 9, dans lequel l'élément ferroélectrique (10, Ferro_{lay}) est une couche de niobate de lithium ou de tantalate de lithium.
- [Revendication 11] Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 10, comprenant en outre l'assemblage d'un substrat ferroélectrique (Ferro_{sub}) et d'un support (Sprt), suivi d'une séparation ou d'un amincissement du substrat ferroélectrique de manière à définir l'élément ferroélectrique (Ferro_{lay}).
- [Revendication 12] Procédé selon la revendication 11, dans lequel le support (Sprt) est un substrat de silicium monocristallin, et une couche métallique (M1) est interposée entre ce substrat de silicium monocristallin et le substrat ferroélectrique (Ferro_{sub}).