

DESCRIPTION

TITRE DE L'INVENTION : Dispositif à ondes élastiques

[0001] L'invention se rapporte à un dispositif à ondes élastiques et un procédé de fabrication d'un tel dispositif à ondes élastiques.

[0002] Les dispositifs à ondes élastiques de surface (« surface acoustic wave » est abrégé par SAW en anglais) sont utilisés dans un nombre important d'applications, telles que filtres, capteurs et lignes à retard. Des filtres radiofréquences SAW sont par exemple utilisés dans des dispositifs de communication mobile en raison de leurs structures simples avec des faibles pertes et de petites tailles aux fréquences radios (100 MHz - 10 GHz).

[0003] Dans un dispositif à ondes élastiques, un ou plusieurs transducteurs à peignes interdigités (IDT) sont formés sur un substrat piézoélectrique monocristallin. L'effet piézoélectrique direct permet de convertir une onde élastique, généralement de type Rayleigh, se propageant sur la surface du substrat piézoélectrique, en signaux électriques, en excitant électriquement les doigts des peignes. Inversement, un signal électrique peut être induit à travers les doigts des peignes pour créer une onde élastique de surface se propageant dans le substrat piézoélectrique sous le transducteur.

[0004] La vitesse des ondes élastiques est généralement limitée par les propriétés du matériau piézoélectrique. Dans le cas du tantalate de lithium (LiTaO_3), les ondes de Rayleigh présentent une vitesse de phase comprise entre 3.000 m.s^{-1} et 3.500 m.s^{-1} , avec un couplage maximum de l'ordre de 2 %. Les ondes de Rayleigh sur le niobate de lithium (LiNbO_3) présentent des vitesses de phase allant jusqu'à 3.900 m.s^{-1} avec un couplage maximum proche de 5,6 %. Les autres modes liés aux ondes de cisaillement et de compression sont typiquement plus rapides mais ne sont que partiellement guidés en surface et nécessitent des structures de guidages complexes.

[0005] Des plaquettes de type couche piézoélectrique sur isolant (en anglais « piezoelectric on insulator » ou POI) permettent des modes avec des vitesses de phase plus élevées mais qui ne dépassent pas 4.200 m.s^{-1} sur LiTaO_3 et 4.500 m.s^{-1} sur LiNbO_3 sans pertes par rayonnement dans le substrat.

[0006] L'objet de l'invention est donc de surmonter ces inconvénients en fournissant un dispositif à ondes élastiques, ayant un mode de fonctionnement à plus haute vitesse de phase que les ondes Rayleigh ou de cisaillement guidées.

[0007] Pour réaliser l'objet, l'invention propose un dispositif à ondes élastiques, en particulier à ondes de cisaillement, comprenant un matériau piézoélectrique, en particulier un matériau ferroélectrique avec des premiers domaines d'une première direction de polarisation et des deuxièmes domaines avec une deuxième direction de polarisation, la première direction

étant opposée à la deuxième direction, dans laquelle les premiers et deuxièmes domaines sont alternés de manière périodique selon une direction d , dite direction périodique, perpendiculaire à la normale n de surface du matériau piézoélectrique et une paire d'électrodes en peigne interdigitées dont les dents de peigne respectives s'étendent essentiellement perpendiculaires à la direction périodique d et à la normale n et dont les dents de peigne sont agencées au moins partiellement, de préférence entièrement, enterrées dans le matériau piézoélectrique.

[0008] Grâce aux domaines de polarisations opposées, des modes apparaissent ayant des vitesses de phase supérieure à 4.200 m.s^{-1} qui se propagent principalement en surface. Les effets de rayonnement dans le volume associés au fait que l'onde se propage au-delà de la vitesse SSBW (acronyme anglais pour « surface skimming bulk wave »), vitesse au-delà de laquelle la surface du substrat ne guide plus naturellement les modes, sont inférieures à $10^{-3} \text{ dB}/\lambda$, donc des conditions permettant de négliger lesdits effets. Ces modes sont des modes de cisaillements.

[0009] Les dispositifs à ondes élastiques selon l'invention peuvent être utilisés dans un nombre important d'applications, telles que filtres en particulier des filtres à éléments d'impédance (« ladder » en terminologie anglaise) ou à couplage acoustique tels que filtres à couplage longitudinal (LCRF pour « Longitudinally Coupled Resonator Filter » en anglais), à modes couplés doubles (DMS pour « Double-Mode-SAW » en anglais) ou à résonances de cavités couplées (SCAW pour « Surface Cavity Acoustic Wave » en anglais) ainsi que des capteurs et des lignes à retard.

[0010] La ferroélectricité est la propriété selon laquelle un matériau possède une polarisation électrique à l'état spontané. Les matériaux ferroélectriques sont une sous-classe des matériaux piézoélectriques. La propriété ferroélectrique peut aussi être obtenue artificiellement par exemple par des conditions de croissance adaptée pour créer des domaines de polarisation différentes. Dans la suite, on peut donc considérer tout matériau piézoélectrique dans lequel on peut réaliser des domaines de polarisation comme un matériau ferroélectrique.

[0011] Selon une variante de l'invention, les dents de peignes peuvent être agencées de manière périodique.

[0012] Selon une variante de l'invention, le matériau piézoélectrique (3) peut être agencé sous forme d'une couche, en particulier avec une épaisseur e_1 inférieure à la longueur d'onde, préférentiellement inférieure à $\lambda/2$, et encore plus préférentiellement inférieure à $\lambda/4$, au-dessus d'un substrat de base, en particulier un substrat de silicium, d'oxyde de silicium, de carbure de silicium (SiC), de saphir, de la nitrure de silicium (SiN), du nitrure d'aluminium (AlN), de quartz, de carbone, de diamant, de Yags (« Yttrium aluminum garnet » en anglais), de Yigs (« Yttrium iron garnet » en anglais), de silicium amorphe ou poly-silicium ou de

LiNbO₃ et/ou de LiTaO₃. Il peut s'agir d'une structure bi-couches ou d'un empilement à plus que deux couches. Ainsi il devient possible de confiner l'énergie dans la couche mince piézoélectrique, ce qui permet de réduire les pertes.

[0013] Selon une variante de l'invention, une couche diélectrique, en particulier une couche d'oxyde de silicium, de SiN, de Ta₂O₅, de ZrO₂, de HfO₂, de SiON, du poly-silicium ou d'une combinaison de ces matériaux, peut être agencée entre la couche de matériau piézoélectrique et le substrat de base, la couche diélectrique ayant de préférence une épaisseur inférieure à la longueur d'onde et/ou entre 200 nm et 2 µm. En effet, cette couche peut être utilisée pour coller la couche piézoélectrique au substrat de base lors d'un procédé de transfert de couche par exemple par collage, par exemple en utilisant un collage moléculaire ou par un collage adhésif ou par un collage eutectique. Le procédé peut être de type SmartCut™. L'utilisation de l'oxyde de silicium en tant que couche diélectrique permet en outre d'augmenter la stabilité en température du dispositif, ce qui est la conséquence des signes opposés des coefficients de température de la vitesse des ondes élastiques du silicium et de l'oxyde de silicium. Ainsi l'épaisseur de la couche diélectrique dépend également de l'épaisseur choisie pour la couche piézoélectrique et peut de préférence être choisie pour réduire voire minimiser l'effet de la température sur le dispositif.

[0014] Selon une variante de l'invention, une couche de piégeage, en particulier une couche de silicium poly-cristallin ou de l'AlN ou du SiOCH polycristallin, peut être agencée entre le matériau piézoélectrique et le substrat de base ou entre la couche diélectrique et le substrat de base. La couche de piégeage a de préférence une épaisseur entre 300 nm et 2 µm. La présence d'une couche de piégeage permet de réduire les courants de fuites.

[0015] Selon une variante de l'invention, les dents de peigne s'étendent entre des régions de la couche du matériau piézoélectrique à partir de l'interface avec le substrat de base ou la couche diélectrique. Selon encore une autre variante, l'épaisseur des dents de peigne peut être au moins égale ou inférieure à l'épaisseur de la couche du matériau piézoélectrique. En optimisant l'épaisseur des dents de peigne, on peut améliorer la pureté spectrale du ou des modes observés. Ceci permet de réaliser des électrodes avec une épaisseur importante ce qui permet d'utiliser une puissance entrante d'environ 26dBm à 33dBm, voire plus. Ce type de dispositif se prête ainsi à une utilisation de filtres en mode transmission (TX), nécessitant des puissances plus importantes qu'en mode de réception. Pour des dents d'électrodes plus minces, on peut optimiser la pureté des modes observés.

[0016] Selon une alternative, les dents de peigne sont agencées dans des creux dans la couche piézoélectrique et donc ne s'étendent pas jusqu'à l'interface avec le substrat de base ou la couche diélectrique. De préférence, l'épaisseur des dents est au minimum plus que la moitié de l'épaisseur de la couche piézoélectrique. Ainsi il devient possible de moduler le couplage du mode utilisé en fonction de l'épaisseur des dents.

[0017] Selon une variante de l'invention, les dents de peigne peuvent être positionnées entre des domaines de direction de polarisation différente. Dans ce cas, les électrodes peuvent être utilisées pour créer les domaines avant d'utiliser les électrodes dans des filtres, de capteurs ou des lignes à retard. De plus, on observe des vitesses de phase effectives plus grandes que pour les POI standards.

[0018] Selon une variante de l'invention, les dents de peigne peuvent être positionnées telles que la direction de polarisation des deux côtés de chaque dent est la même, en particulier telles que la direction de polarisation est différente pour des dents d'électrodes différentes. Pour ce mode de réalisation un seul mode est excité ce qui rend son utilisation pour des filtres, capteurs ou lignes à retard etc. particulièrement appropriée.

[0019] Selon une variante de l'invention, les dents de peigne d'une des deux électrodes peuvent être positionnées telles que la direction de polarisation des deux côtés de chaque dent est la même, et les dents de peigne de la seconde électrode peuvent être positionnées entre des domaines de direction de polarisation différente.

[0020] Selon une variante, la largeur a des dents des électrodes en peigne interdigitées est entre 40 % et 60 %, de préférence de 50 %, de la largeur des domaines, et/ou d'au moins 280 nm, de préférence d'au moins 350 nm. Ainsi, il devient possible de fournir des filtres, des capteurs ou des lignes de retard fonctionnant à des fréquences plus élevées que normalement accessibles en utilisant la lithographie I-line.

[0021] Selon une variante de l'invention, le matériau piézoélectrique peut être du LiTaO_3 ou du LiNbO_3 . Il peut également s'agir de pérovskites de type ABO_3 , en particulier du KNbO_3 et de PbTiO_3 , du PZT, du PMnPt, ou de l'AlScN. Les modes observés, en particulier les modes de cisaillement pour ces matériaux ont des facteurs de qualité et des couplages électromécaniques permettant une utilisation industrielle dans des applications de type filtre ou ligne à retard.

[0022] Selon une variante le dispositif à ondes élastiques peut comprendre une première électrode qui comprend des premiers commutateurs et une deuxième électrode qui comprend des deuxièmes commutateurs, les premiers commutateurs sont configurés tels qu'ils peuvent mettre en contact ou non la première électrode avec des dents respectivement et les deuxièmes commutateurs sont configurés tels qu'ils peuvent mettre en contact ou non la deuxième électrode avec des dents respectivement, en particulier pour former la paire d'électrodes en peigne. Ainsi, il devient possible d'adapter le schéma d'excitation des dents par exemple en passant d'un schéma dans lequel les dents sont connectées de manière alternée aux deux électrodes à un schéma dans lequel deux dents directement adjacentes sont connectées à la première électrode et les deux dents directement adjacentes suivantes sont connectées à la deuxième électrode. En changeant le schéma d'excitation, on peut faire

bouger la fréquence des modes et ainsi adapter un même dispositif à différents paramètres d'exploitation.

[0023] De préférence, la commutation des dents est appliquée de manière à ne pas mettre la première électrode et la deuxième électrode en court-circuit.

[0024] Selon une variante de l'invention, le dispositif peut comprendre un moyen d'alimentation configuré pour fournir un signal radio-fréquence d'une fréquence d'au moins 2 GHz, de préférence d'au moins 6 GHz, aux électrodes en peignes interdigités. Ainsi il devient possible de fournir des filtres, des capteurs ou des lignes de retard fonctionnant à des fréquences plus élevées que normalement accessibles en utilisant la lithographie I-line.

[0025] Selon une variante de l'invention, la paire d'électrodes en peigne interdigitées peut être le seul élément électriquement conducteur en contact avec le matériau piézoélectrique. Selon une variante de l'invention, le dispositif à ondes élastiques peut être dépourvu de toute autre moyen d'électrode hormis la paire d'électrodes en peigne interdigitées, notamment dépourvu de toute électrode flottante. Ainsi on évite qu'une partie de l'énergie introduite dans le système soit utilisée pour la formation de modes autres que les modes de cisaillement.

[0026] Pour réaliser l'objet, l'invention propose également l'utilisation d'un dispositif à ondes élastiques tel que décrit ci-dessus, en particulier avec des dents des électrodes en peignes interdigités ayant une largeur d'au moins 280 nm, de préférence d'au moins 350 nm, dans un dispositif acousto-électrique, en particulier un filtre, un capteur ou une ligne de retard, ayant des fréquences de fonctionnement de 2 GHz et plus, en particulier de 6 GHz ou plus. Ainsi il devient possible de fournir des filtres, capteurs ou lignes de retard fonctionnant à des fréquences plus élevées que normalement accessibles en utilisant la lithographie I-line.

[0027] Pour réaliser l'objet, l'invention propose également un procédé de fabrication d'un dispositif à ondes élastiques tel que décrit ci-dessus et comprenant les étapes : fournir un matériau piézoélectrique, en particulier un matériau ferroélectrique, réaliser la paire d'électrodes en peignes interdigités au moins partiellement, de préférence entièrement, enterrée dans le matériau piézoélectrique et ensuite appliquer un champ électrique plus fort, en particulier au moins dix fois plus fort, que le champ coercitif du matériau piézoélectrique pour réaliser les premiers et deuxièmes domaines alternant de manière périodique et ayant des polarisations opposées. Avantageusement, on peut utiliser les électrodes pour créer les domaines, ce qui simplifie le processus de fabrication.

[0028] Selon une variante de l'invention, le champ électrique peut être appliqué une fois que le matériau piézoélectrique a été chauffé à une température d'au moins 150 °C, de préférence à une température d'au moins 170 °C. Ainsi, la polarisation peut être obtenue même en absence d'une contre électrode avec un champ appliqué moins élevé qu'à température ambiante.

[0029] L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée à titre non limitatif, et grâce aux figures annexées parmi lesquelles :

[0030] La [Fig. 1] est un schéma illustrant schématiquement un dispositif à ondes élastiques selon un premier mode de réalisation de l'invention.

[0031] La [Fig. 2] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie du dispositif à ondes élastiques selon le premier mode de réalisation de l'invention ainsi qu'un schéma du mode de cisaillement.

[0032] La [Fig. 3] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et l'admittance harmonique Y pour un dispositif à ondes élastiques selon le premier mode de réalisation de l'invention.

[0033] La [Fig. 4] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et la l'admittance harmonique Y pour deux épaisseurs différentes de la couche diélectrique d'un dispositif à ondes élastiques selon le premier mode de réalisation de l'invention.

[0034] La [Fig. 5] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie du dispositif à ondes élastiques selon une variante du premier mode de réalisation de l'invention.

[0035] La [Fig. 6] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et la l'admittance harmonique Y pour trois épaisseurs différentes des dents d'un dispositif à ondes élastiques selon la variante du premier mode de réalisation de l'invention.

[0036] La [Fig. 7] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie du dispositif à ondes élastiques selon une deuxième variante du premier mode de réalisation de l'invention.

[0037] La [Fig. 8] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et la l'admittance harmonique Y pour trois épaisseurs différentes des dents d'un dispositif à ondes élastiques selon la deuxième variante du premier mode de réalisation de l'invention.

[0038] La [Fig. 9] est un schéma illustrant schématiquement une partie d'un dispositif à ondes élastiques selon un deuxième mode de réalisation de l'invention.

[0039] La [Fig. 10] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et l'admittance harmonique Y pour un dispositif à ondes élastiques selon le deuxième mode de réalisation de l'invention.

[0040] La [Fig. 11] est un schéma illustrant schématiquement une partie d'un dispositif à ondes élastiques selon un troisième mode de réalisation de l'invention.

[0041] La [Fig. 12] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et l'admittance harmonique Y pour un dispositif à ondes élastiques selon le troisième mode de réalisation de l'invention pour deux schémas d'excitation électrique.

[0042] La [Fig. 13] est un schéma illustrant schématiquement une paire d'électrodes interdigitées alternative pour réaliser le quatrième mode de réalisation de l'invention.

[0043] La [Fig. 14] est un schéma illustrant schématiquement une deuxième paire d'électrodes interdigitées alternative pour réaliser le quatrième mode de réalisation de l'invention.

[0044] La [Fig. 15] est un schéma illustrant les étapes d'un procédé de fabrication d'un dispositif à ondes élastiques selon un cinquième mode de réalisation de l'invention.

[0045] L'invention va être décrite plus en détail en utilisant des modes de réalisation avantageux, à titre d'exemple, et par référence aux dessins. Les modes de réalisation décrits sont simplement des configurations possibles de sorte que les caractéristiques individuelles telles que décrites peuvent être fournies indépendamment les unes des autres ou peuvent être omises lors de la mise en œuvre de la présente invention.

[0046] Le dispositif à ondes élastiques 1, en particulier dispositif à ondes de cisaillement, selon le premier mode comprend un matériau piézoélectrique 3, en particulier un matériau ferroélectrique, agencé sous forme d'une couche 5 au-dessus, en particulier directement sur une couche diélectrique 7. La couche diélectrique 7 est agencée au-dessus, en particulier directement sur un substrat 9. La couche 5, la couche diélectrique 7 et le substrat 9 forment un substrat composite 11, obtenu par exemple par un procédé de transfert de couche de style SmartCut™. Le substrat composite 11 est également appelé substrat piézoélectrique sur isolant ou substrat POI. Dans un procédé de transfert de couche, la couche diélectrique 7 peut jouer le rôle de couche de collage entre le substrat de base 9 et la couche piézoélectrique 5.

[0047] La ferroélectricité est la propriété selon laquelle un matériau possède une polarisation électrique à l'état spontané. Les matériaux ferroélectriques sont une sous-classe des matériaux piézoélectriques. La propriété ferroélectrique peut aussi être obtenue artificiellement par exemple par des conditions de croissance adaptée pour créer des domaines de polarisation différentes. Dans la suite, on peut donc considérer tout matériau piézoélectrique dans lequel on peut réaliser des domaines de polarisation comme un matériau ferroélectrique.

[0048] Selon l'invention, le matériau piézoélectrique de la couche 5 comprend des premiers domaines 3ai, avec i allant de 1 à j, d'un premier sens de polarisation 13a et des deuxièmes domaines 3bi, avec i allant de 1 à j, avec un second sens 13b de polarisation, le premier sens 13a étant opposé au second sens 13b. De plus, les premiers et deuxièmes domaines 3ai et 3bi forment des bandes d'une même épaisseur qui sont alternées de manière périodique avec un pas p_r , selon une direction d, dite direction périodique, perpendiculaire à la normale de surface n du matériau piézoélectrique 3.

[0049] Dans ce mode de réalisation l'axe de polarisation Z des domaines forme un angle différent de zéro avec la normale n. De plus l'axe de polarisation Z a au moins une contribution dans la direction périodique d. Cette contribution est opposée pour les deux types de domaines. L'axe de polarisation Z est de préférence dans le plan défini par la normale n et la direction d, donc l'angle φ égale 0. On ne considère ici que des coupes à simple rotation définie autour de l'axe cristallin X sans perte de généralité. En particulier, pour ces coupes dites à simple rotation, l'angle φ défini autour de l'axe cristallin Z est nul.

[0050] Pour une telle configuration des ondes de cisaillement peuvent être induites dans la couche piézoélectrique, en particulier pour les matériaux monocristal trigonal classe 3m, comme le tantalate de lithium LiTaO_3 monocristallin ou du niobate de lithium LiNbO_3 , et les matériaux perovskites de type ABO_3 . De par de leurs propriétés ferroélectriques, ils satisfont les conditions nécessaires pour l'excitation des modes de cisaillement selon l'invention.

Dans ces matériaux pour la mise en œuvre de l'invention on s'attachera en particulier à la seule polarisation selon l'axe Z.

[0051] Dans ce mode de réalisation, le matériau piézoélectrique de la couche 3 peut être du tantalate de lithium LiTaO_3 monocristallin ou du niobate de lithium LiNbO_3 monocristallin.

D'autres matériaux piézoélectriques peuvent également être utilisés, tels que décrit ci-dessus. La couche 5 a, de préférence, une épaisseur e_1 inférieure à la longueur d'onde λ , préférentiellement inférieure à $\lambda/2$, et encore plus préférentiellement inférieure à $\lambda/4$, typiquement inférieure à $1\text{ }\mu\text{m}$.

[0052] Dans le cas du tantalate de lithium (LiTaO_3), l'orientation cristalline définie selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949 du premier sens 13a des premiers domaines 3ai de la couche 3 est de préférence $(YXI)/\theta$ avec la valeur de l'angle θ choisie entre -30° et 110° . L'orientation cristalline du second sens 13b des seconds domaines 3bi de la couche 3 est alors $(YXI)/\theta + 180^\circ$ selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949. L'axe de polarisation étant l'axe Z, en partant d'une plaque orientée (YX), cet axe est colinéaire à la largeur de la plaque. Après rotation de θ qui donne l'orientation $(YXI)/\theta$, cet axe forme un angle de $\theta-90^\circ$ avec la normale n à la plaque et de θ avec l'axe colinéaire à la surface de la plaque. Dans ce repère, la normale n correspond donc à la direction $90^\circ - \theta$, et forme un angle θ avec Z, et dans un mode particulier la direction d est orthogonale à n et colinéaire à Z.

[0053] Dans le cas du niobate de lithium (LiNbO_3), l'orientation cristalline définie selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949 du premier sens 13a des premiers domaines 3ai de la couche 3 est de préférence $(YXI)/\theta$ avec la valeur de l'angle θ choisie dans une plage de -40 à $+110^\circ$ et préférentiellement de -10 à $+50^\circ$. L'orientation cristalline du second sens 13b des seconds domaines 3bi de la couche 3 est alors $(YXI)/\theta + 180^\circ$ selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949.

[0054] Pour le tantalate de lithium et le niobate de lithium, la direction de polarisation n'est que selon l'axe Z. Sous l'influence d'un champ électrique dépassant le champ coercitif, un atome de la maille cristalline se déplace du barycentre dans cette direction pour polariser la molécule.

[0055] La couche diélectrique 7 est de préférence une couche d'oxyde de silicium avec une épaisseur e_2 inférieure à la longueur d'onde et/ou entre 200 nm et 2 μ m. La couche diélectrique peut aussi être en SiN, en Ta₂O₅, en ZrO₂, en HfO₂, en SiON ou en une combinaison de ces matériaux. Elle peut également comprendre entre autres du poly-silicium.

[0056] Le substrat de base 9 est de préférence un substrat en silicium, par exemple du silicium (100) ou (110) ou (111). L'écart d'orientation entre les méplats des deux cristaux du silicium et du tantalate de lithium de la structure peut varier de 0 à 180° sans perte de généralité sur les propriétés fondamentales du transducteur. On observe également essentiellement les mêmes résultats pour les trois orientations du silicium. Le substrat peut aussi être en oxyde de silicium, en carbure de silicium (SiC), en saphir, en nitrure de silicium (SiN), en nitrure d'aluminium (AlN), en quartz, en carbone, en diamant, en grenat aluminium yttrium (Yag), en Yigs (« Yttrium ion garnet » en anglais), en silicium amorphe ou poly-silicium ou en LiNbO₃ ou en LiTaO₃.

[0057] En utilisant le silicium et l'oxyde de silicium en tant que substrat de base 9 et couche diélectrique 7, la stabilité en température du dispositif 1 peut être améliorée. Ceci est dû au fait que les coefficients de température de la vitesse (CTV) des modes de cisaillement dans les matériaux constitutifs de l'empilement présentent des signes opposés et que le silicium dont l'épaisseur est supérieure à celles des couches diélectrique et piézoélectrique déposées sur sa surface, en particulier supérieures à 50 fois l'épaisseur des deux couches, limite les effets de dilatation thermique de la couche piézoélectrique. En particulier, les matériaux dont la dilatation thermique est inférieure à 10 ppm.K⁻¹, préférablement 5 ppm.K⁻¹, s'avèrent efficaces pour la limitation des effets de température sur les modes guidés par la structure.

[0058] Une paire d'électrodes en peignes interdigités 15a, 15b peut être agencées telle qu'au moins partiellement, de préférence entièrement, enterrées dans le matériau piézoélectrique 3. Les dents de peignes 17a1 à 17a3 et 17b1 à 17b3 respectives s'étendent essentiellement perpendiculaire à la direction périodique d, c'est-à-dire parallèlement aux bandes des domaines 3ai et 3bi. Le nombre des dents illustrées par électrodes en peignes est ici de trois, étant précisé que chacune des électrodes peut avoir plus de trois dents. Les dents ont de préférence une forme rectangulaire (c'est-à-dire en forme de parallépipède). Les dents 17a1 à 17a3 sont reliées entre elles par une barre conductrice 19a. Les dents 17b1 à 17b3 sont reliées entre elles par une barre conductrice 19b. Les deux barres 19a et

19b peuvent être connectées aux pôles d'une source radiofréquence pour l'excitation des modes d'intérêt.

[0059] Les dents des électrodes sont agencées de manière périodique avec un pas mécanique p_e et donc une périodicité électrique de $2p_e$. Il reste néanmoins possible d'introduire une ou plusieurs ruptures de périodicités selon une variante, en omettant par exemple une ou plusieurs dents. Le pas mécanique des électrodes p_e est de la moitié du pas p_r des domaines 3ai et 3bi. Cette donnée peut varier pour augmenter, voire maximiser, par exemple le couplage ou ajuster la vitesse du mode pour atteindre une valeur de fréquence spécifiée.

[0060] Les électrodes en peignes 15a et 15b sont faites d'un matériau métallique, par exemple en aluminium (Al) ou molybdène (Mo) ou or (Au) ou argent (Ag) ou en un alliage de type cuivre aluminium (AlCu) ou un alliage principalement à base d'aluminium et d'un autre métal, le titane (Ti) par exemple. La paire d'électrodes 15a et 15b peut en particulier être réalisée avec de l'AlCu, ou de l'AlSi, ou de l'AlTi avec des dopages en Cu, Ti et/ou Si compris entre 0,5 et 5% et potentiellement avec des sous-couches de Ti, de Ta, de Mo, de Pd, ou de Pt, ou des combinaisons Ti/Pt, Ti/Au, Ta/Pt, Cr/Au ou avec du Zr. Les électrodes en peignes 15a et 15b ont de préférence des épaisseurs e_3 comprises entre 50 nm et 200 nm ou selon une alternative les épaisseurs peuvent être égales ou supérieures à celle de la couche 5, par exemple au moins 1 μm . Les dents 17a1 à 17a3, 17b1 à 17b3 ont une largeur a , dans la direction d , qui est de préférence égale ou supérieure à 280 nm, de préférence supérieure à 350 nm. Ainsi les électrodes en peignes 15a, 15b peuvent être réalisées par photolithographie I-line.

[0061] Le rapport de métallisation a/p_e , a étant la largeur des dents 17a1 à 17a3, 17b1 à 17b3 et p_e leur pas mécanique, est de préférence compris entre 0,25 et 0,75, et en particulier compris entre 0,4 et 0,6. Ce rapport a/p_e et/ou l'épaisseur e_3 peuvent être ajustés pour régler le couplage électromécanique et/ou pour réduire les pertes.

[0062] Dans ce mode de réalisation, les dents ont toutes la même forme ; selon des variantes, les dents peuvent aussi être réalisées avec des longueurs l différentes.

[0063] De préférence, le dispositif ne comprend aucun autre moyen d'électrode, comme par exemple une électrode flottante ou des électrodes planes, ni sur ni sous la couche ferroélectrique 5. En particulier, toute électrode et, plus en particulier de type flottante, créera des capacités parasites dégradant le couplage du mode de cisaillement et potentiellement dégradant la pureté spectrale du dispositif.

[0064] Dans le mode de réalisation de la [Fig. 1], un moyen d'alimentation 21 est relié aux électrodes en peignes interdigités 15a, 15b. De préférence, ce moyen d'alimentation 21 est configuré pour fournir un signal radio-fréquence d'une fréquence d'au moins 2 GHz, de préférence d'au moins 6 GHz, aux électrodes en peignes interdigités 15a, 15b.

[0065] Lorsque le dispositif 1 est configuré pour convertir des ondes élastiques en signaux électriques, un récepteur électrique est mis à la place du moyen d'alimentation 21.

[0066] Selon des variantes du premier mode de réalisation, le substrat composite 9 peut comprendre une ou plusieurs autres couches dans sa structure. Une couche de piégeage de charges libres, par exemple du silicium polycristallin, de l'AlN ou du SiOCH polycristallin peut être prévue entre la couche diélectrique 7 et le substrat de base 9 pour pouvoir limiter le libre parcours moyen des charges libre engendrées à l'interface silicium/couche diélectrique par le champ acousto-électrique lié à la propagation de l'onde, permettant de réduire les courants de fuites. Une telle couche de piégeage présente une épaisseur de préférence comprise entre 0,3 μm et 2 μm aux fréquences radios considérées pour les télécoms, typiquement entre 500 MHz et 6 GHz.

[0067] Au lieu d'utiliser un substrat composite 11, l'invention peut également être réalisée avec un substrat massif de matériau ferroélectrique, donc sans présence d'une couche diélectrique et sans substrat de base.

[0068] La [Fig. 2] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie du dispositif à ondes élastiques selon le premier mode de réalisation de l'invention représentant une maille périodique. La [Fig. 2] montre deux moitiés des premiers domaines 3a1 et 3a2 mettant en sandwich un deuxième domaine 3b1 de polarisation opposée. Pour chaque électrode en peigne 15a et 15b une dent 17a1 et 17b1 est représentée. Les dents 17a1 et 17b1 sont enterrées dans la couche 5 de matériau piézoélectrique. [Fig. 2] représente également la couche diélectrique 7 et le substrat de base 9.

[0069] La dent 17a1 est positionnée entre deux domaines de polarisation opposées, notamment 3a1 et 3b1. La dent 17b1 est également positionnée entre deux domaines de polarisation opposées, notamment 3b1 et 3a2. Dans ce mode de réalisation les dents 17a1 et 17b1 s'étendent de la surface/interface 21 de la couche diélectrique 7 à travers toute l'épaisseur e_1 de la couche piézoélectrique 5. L'épaisseur e_3 des dents 17a1 et 17b1 est donc la même que l'épaisseur e_1 de la couche piézoélectrique 5. La largeur a des dents 17a1 et 17b1 est 50% de la largeur a_2 des domaines. Dans des variantes, la largeur peut avoir une valeur comprise entre 40% et 60% de a_2 .

[0070] Des simulations numériques réalisées selon la méthode décrite dans S. Ballandras et al., « Finite element analysis of periodic piezoelectric transducers », Journal of Applied Physics 93, 702 (2003), mettent en évidence que pour un dispositif 1 selon la [Fig. 1] et [Fig. 2] les fréquences des modes fondamentaux sont deux fois plus grandes en comparaison avec un dispositif sans domaines de polarisation opposées ce qui est dû à une réduction de la longueur d'onde par un facteur deux. En bas de la [Fig. 2] sont illustré les déformations de la maille dans un mode cisaillement qui a une longueur d'onde de 2 μm donc correspondant à la période mécanique p_e des dents et ne pas à la période électrique $2p_e$ pour un dispositif

sans domaines. Le mode existe seulement quand la vibration des électrodes est antisymétrique.

[0071] La [Fig. 3] illustre les résultats de la simulation pour un dispositif 1 tel que montré à la [Fig. 1] et à la [Fig. 2]. Un substrat composite avec un substrat de base de Si(100) avec le méplat orienté à 45° par rapport à celui de la couche de LiTaO₃, une couche de piégeage de Si polycristallin d'une épaisseur de 1 µm, une couche diélectrique de 500 nm d'épaisseur de SiO₂ et une couche de LiTaO₃ d'une épaisseur de 600 nm a été utilisé pour la simulation. Les domaines sont considérés infiniment longs et alternés avec une périodicité p_f de 4 µm coïncidant avec la période électrique du réseau et avec des directions (YXI)/42°/30° et (YXI)/222°/210°. Dans les deux cas, les électrodes sont en AlCu et ont une épaisseur de 400 nm et un rapport a/p_e de 0,5 et un pas mécanique p_e de 2 µm.

[0072] Sur la [Fig. 3], qui montre les résultats de la simulation avec le module de l'admittance harmonique Y en dB sur l'axe de gauche et le module de la conductance harmonique G en dB sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz. On observe le mode fondamental de cisaillement 31 vers 2 GHz qui domine et trois autres contributions à plus haute fréquence. Un mode 33 vers 3,3 GHz, un mode 35 vers 5,8 GHz et un mode 37 vers 6,9 GHz.

[0073] Le mode 33 peut être réduit en réduisant l'épaisseur de la couche piézoélectrique. Les modes 35 et 37 dépendent fortement de l'épaisseur de la couche diélectrique 7. La [Fig. 4] montre cet effet en comparant les résultats de la simulation pour deux épaisseurs de la couche diélectrique avec le module de l'admittance harmonique Y en dB sur l'axe de gauche et le module de la conductance harmonique G en dB sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz. Pour une épaisseur de la couche diélectrique 7 de 300 nm au lieu de 500 nm, les modes sont moins prononcées. La flèche 41 illustre la baisse dans la conductance harmonique G du mode vers 6,8 GHz et le numéro de référence 43 illustre la baisse dans l'admittance harmonique Y en passant de 500 nm à 300 nm d'épaisseur.

[0074] Le mode 31 a donc une vitesse de phase v_{eff} effective apparente d'environ 8 km⁻¹ et donc environ deux fois plus grande par rapport à une couche piézoélectrique sans domaines avec des polarisations alternantes, avec $v_{eff} = \lambda \times f = p_{el} \times f$ du mode, λ étant la longueur d'onde de cohérence des charges dans les électrodes, p_{el} étant la période électrique des électrodes et f la fréquence du mode. Utiliser une paire d'électrodes en peignes interdigitées déposées en surface de la couche piézoélectrique avec des domaines alternants permet donc d'augmenter la vitesse de phase tout en préservant les avantages d'un couplage électromécanique supérieur à 7% voire à 10%, des coefficients de qualité de plusieurs milliers au-delà de 1 GHz et des effets de température maîtrisés.

[0075] D'ailleurs pour une configuration avec des électrodes ayant la même épaisseur que la couche piézoélectrique de tantalate de lithium, en l'occurrence comprise entre 300 nm et 1

μm , une orientation cristalline de la couche à simple rotation (YXl)/ θ avec θ compris entre $+10$ et $+60^\circ$ et une épaisseur de la couche diélectrique en SiO_2 d'épaisseur comprise entre 300 nm et 2 μm , il est loisible de minimiser le coefficient de température de la fréquence (CTF) de la résonance ou de l'anti-résonance à une valeur inférieure à 20 ppm.K^{-1} en valeur absolue et idéalement inférieure à 10 ppm.K^{-1} .

[0076] La [Fig. 5] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie d'un dispositif à ondes élastiques 51 selon une variante du premier mode de réalisation de l'invention. La seule différence par rapport au mode de réalisation illustré sur la [Fig. 1] et la [Fig. 2] est que les dents 17a1 et 17b1 ne s'étendent pas à partir de l'interface 21 entre la couche diélectrique 7 et la couche piézoélectrique 5 mais les dents 17a1 et 17b1 sont incorporées dans des évidements 53a et 53b de la couche piézoélectrique 5. Les surfaces 55a et 55b des dents 17a1 et 17b1 sont alignées avec la surface 57 de la couche piézoélectrique 5. Selon d'autres variantes, les dents 17a1 et 17b1 peuvent dépasser la surface 57 ou être en retrait par rapport à la surface 57. La [Fig. 5] représente également la couche diélectrique 7 et le substrat de base 9. La couche de piégeage n'est pas illustrée comme pour le premier mode de réalisation de la [Fig. 1] ou de la [Fig. 2].

[0077] La [Fig. 6] est un graphique illustrant la conductance harmonique G en dB sur l'axe de gauche et l'admittance harmonique Y en dB sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz d'un dispositif à ondes élastiques selon la variante du premier mode de réalisation de l'invention. Un mode 59 apparaît en dessous de 2 GHz.

[0078] Pour la simulation, l'épaisseur des électrodes était de 500 nm pour une épaisseur de couche piézoélectrique de 600 nm. Le LiTaO_3 était d'orientation (YXl)/ 42° - 222° , la couche diélectrique était du SiO_2 avec une épaisseur de 500 nm, la couche de piégeage avait une épaisseur de 1 μm , et le substrat de base était du Si(111) avec un méplat avec un désalignement de 45° par rapport au méplat de la couche de LiTaO_3 . La période électrique était de 4 μm ce qui donne lieu à un mode dont la vitesse est supérieure à 7200 m.s^{-1} pour un couplage électromécanique de plus de 10 %. On observe essentiellement les mêmes résultats pour les autres orientations du silicium.

[0079] La contribution à 3,5 GHz est liée aux couches sous le tantalate. Elle peut être réduite en jouant sur les rapports d'épaisseur des différentes couches.

[0080] Les simulations montrent que si les dents sont totalement enterrées dans la couche et qu'elles n'atteignent pas la surface supérieure de la couche piézoélectrique, on peut encore améliorer la pureté spectrale et très sensiblement le couplage électromécanique du mode. La qualité de la résonance est également améliorée par rapport au cas précédent.

[0081] Selon une variante, le dispositif à ondes élastiques 51, la partie de la couche piézoélectrique 5 sous-jacente aux dents 17a1, 17b1 reste dans son état de polarisation

initiale, avec ou sans domaine. Les simulations montrent que le mode de vibration reste essentiellement le même qu'illustré sur la [Fig. 6].

[0082] La [Fig. 7] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie d'un dispositif à ondes élastiques 61 selon une deuxième variante du premier mode de réalisation de l'invention. La seule différence par rapport au mode de réalisation illustré sur la [Fig. 1] et la [Fig. 2] est que les surfaces 63a et 63b des dents 17a1 et 17b1 ne sont plus alignées avec la surface 65 de la couche piézoélectrique 5 mais en retrait. Ainsi, $e_3 < e_1$. Selon une autre variante, les dents 17a1 et 17b1 peuvent dépasser la surface 65. Ainsi $e_3 > e_1$. La [Fig. 7] représente également la couche diélectrique 7 et le substrat de base 9. La couche de piégeage n'est pas illustrée comme pour le premier mode de réalisation de la [Fig. 1] ou de la [Fig. 2].

[0083] La [Fig. 8] est un graphique illustrant la conductance harmonique G en dB sur l'axe de gauche et l'admittance harmonique Y en dB sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz du dispositif à ondes élastiques 61 selon la deuxième variante du premier mode de réalisation de l'invention.

[0084] Comme dans la variante de la [Fig. 6], la simulation montre que la pureté spectrale et la qualité de la résonance s'améliorent par rapport au mode illustré à la [Fig. 3] si les dents n'atteignent pas la surface supérieure de la couche piézoélectrique. Le mode est également mieux couplé que lorsque l'électrode remplit complètement la cavité. La [Fig. 7] illustre d'ailleurs que pour des raisons de conditions aux limites, les dents 17a1 et 17b1 des électrodes vibrent de façon synchrone pour ce mode 67, comme pour les modes 31 et 59 illustrés sur la [Fig. 3] et la [Fig. 6].

[0085] La [Fig. 9] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie d'un dispositif à ondes élastiques 71 selon un deuxième mode de réalisation de l'invention. Le dispositif à ondes élastiques 71 a la même structure et utilise les mêmes matériaux que le dispositif à ondes élastiques 1 du premier mode de réalisation, sauf que les dents 73a1 et 73b1 des électrodes en peignes interdigités sont positionnées telles que la direction de polarisation des deux côtés de chaque dent est la même, mais la direction de polarisation des domaines voisins est différente pour les dents 73a1 et 73b1 qui sont d'électrodes différentes. Ainsi, la dent 73a1 de la première électrode 15a se trouve au milieu d'un premier domaine 75a1, pendant que la dent 73b1 de la deuxième électrode 15b se trouve au milieu d'un deuxième domaine 75b1 de polarisation opposée. Dans ce mode de réalisation les dents sont positionnées de manière centrale dans un domaine, dans une variante les dents peuvent aussi être positionnées en dehors du centre d'un domaine. La [Fig. 9] représente également la couche diélectrique 7 et le substrat de base 9. La couche de piégeage n'est pas illustrée comme pour le premier mode de réalisation de la [Fig. 1] ou de la [Fig. 2].

[0086] Dans ce mode de réalisation, l'épaisseur e_3 des dents 73a1 et 73b1 est plus grande que l'épaisseur e_1 des domaines 75a1 et 75b1. Selon des variantes e_1 peut aussi être égale ou plus petite que e_3 . De plus, comme pour la première variante du premier mode de réalisation illustrée dans la [Fig. 5] les électrodes 73a1 et 73b1 peuvent aussi être positionnées dans des évidements dans les domaines 75a1 et 75b1 et ne pas s'étendre jusqu'à l'interface 77 entre la couche piézoélectrique 5 et la couche diélectrique 7.

[0087] La largeur a des dents 73a1 et 73b1 est environ la moitié des largeurs a_{2_1} et a_{2_2} des deux parts des domaines 75a1 et 75b1 ensemble. Dans d'autres variantes, la largeur a peut avoir une valeur comprise entre 40% et 60% de la somme des largeurs a_{2_1} et a_{2_2} .

[0088] Un mode de vibration est illustré en bas de la [Fig. 9]. Ce mode a été obtenu par la simulation telle que décrite ci-dessus pour le premier mode de réalisation, mais pour une cellule du dispositif 71 avec une largeur d'un domaine de 1 μm et une orientation LiTaO_3 (YXI)/42° et (YXI)/222° et un substrat de base en Si(111). On observe essentiellement les mêmes résultats pour les autres orientations du silicium. Le pas mécanique p_e est ainsi de 3 μm , la cellule pour la simulation a donc une largeur de 6 μm . Les vibrations du mode ont une longueur d'onde λ égale à un pas mécanique p_e des électrodes.

[0089] La [Fig. 10] illustre la conductance harmonique G en dB sur l'axe gauche et l'admittance harmonique Y sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz pour l'orientation (YXI)/42° et (YXI)/222°. Un seul mode très prononcé de vibration par rapport aux autres est visible.

[0090] Le mode apparaît vers 1,3 GHz, visible dans l'admittance harmonique Y , voir numéro 81, et la conductance harmonique G , voir numéro 83. Les simulations montrent que pour le mode observé, le mouvement des électrodes est toujours en phase. La vitesse de phase équivalente est de 7,8 km.s^{-1} , donc proche du double de la vitesse du mode de cisaillement dans un substrat POI comparable mais sans domaines de polarisations opposées alternants.

[0091] Les simulations montrent également que pour des épaisseurs $e_3 > e_1$ la pureté spectrale du mode s'améliore par rapport à des épaisseurs plus faibles.

[0092] La [Fig. 11] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie d'un dispositif à ondes élastiques 91 selon un troisième mode de réalisation de l'invention. Le dispositif à ondes élastiques 91 a la même structure et utilise les mêmes matériaux que le dispositif à ondes élastiques 1 du premier mode de réalisation, sauf que les dents 93a1, 93a2 de la première électrode en peigne interdigités sont positionnées telles que la direction de polarisation des domaines 3a1 et 3b1 respectivement 3b1 et 3a2 des deux côtés de chaque dent 93a1, 93a2 est opposée tandis que les dents 93b1, 93b2 de la seconde électrode sont positionnées telles que la direction de polarisation des deux côtés des dents est la même. En fait, la dent 93b1 est arrangée au milieu du domaine 3b1 et la dent 93b2 est arrangée au milieu du domaine 3a2. Seulement une partie du premier domaine 3a1 est

illustrée comme pour le domaine 3a2 pour retrouver les mêmes conditions de bord au début et à la fin de la cellule. La [Fig. 11] représente également la couche diélectrique 7 et le substrat de base 9. La couche de piégeage n'est pas illustrée comme pour le premier mode de réalisation de la [Fig. 1] ou de la [Fig. 2].

[0093] La [Fig. 12] est un graphique illustrant en haut et en bas la conductance harmonique G et l'admittance harmonique Y pour deux réalisations d'un dispositif à ondes élastiques selon le troisième mode de réalisation de l'invention. La différence entre les deux réalisations réside dans le fait que les électrodes sont soumises à des schémas de potentiel différents. Ces schémas sont montrés au-dessus de chaque graphique de la [Fig. 12] avec les signes « + » et « - » dans les dents des électrodes.

[0094] La simulation a été réalisée telle que décrite ci-dessus pour le premier mode de réalisation pour une cellule du dispositif 91 avec une largeur d'une cellule de 6 μm avec une largeur des électrodes de 750 nm et une largeur des domaines égaux. On trouve une période de répétition de la structure de 6 μm . L'orientation du LiTaO_3 est $(\text{YXI})/42^\circ$ et $(\text{YXI})/222^\circ$ et le substrat de base 9 est du $\text{Si}(111)$. On observe essentiellement les mêmes résultats pour les autres orientations du silicium.

[0095] La [Fig. 12] illustre dans un premier graphique la conductance harmonique G en dB sur l'axe gauche et l'admittance harmonique Y en dB sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz pour l'orientation $(\text{YXI})/42^\circ$ et $(\text{YXI})/222^\circ$. Ces résultats ont été obtenus pour un potentiel $+V/-V$ alternant appliqué aux dents 93a1, 93b1, 93a2 et 93b2 tel qu'illustré au-dessus du premier graphique de la [Fig. 12].

[0096] Plusieurs modes apparaissent dans l'admittance et la conductance. Notamment dans l'admittance harmonique Y avec le numéro 95₁ vers 600 MHz et dans la conductance harmonique G avec le numéro 95₂ vers 2 GHz, avec le numéro 95₃ vers 3 GHz et avec 95₄ vers 4 GHz.

[0097] La simulation montre que le mode 95₁ est un mode de Rayleigh avec sa vitesse de phase d'environ $\sim 3600 \text{ m.s}^{-1}$. Les autres contributions vers 2 et 3 GHz présentent plus de pertes par rayonnement mais ont des vitesses de phase plus grandes.

[0098] Le second mode 95₂ avec des pertes par rayonnement, a un facteur de qualité $Q < 100$ et correspond à la combinaison d'une onde de cisaillement et d'un mode vibratoire des dents des électrodes.

[0099] La troisième contribution 95₃ vers 3 GHz a une vitesse de phase effective d'environ $\sim 18 \text{ km.s}^{-1}$ et montre moins de pertes que le précédent mode 95₂ est également une combinaison d'une onde de cisaillement et d'un mode vibratoire des dents des électrodes comme illustré dans la [Fig. 11].

[0100] La quatrième contribution 95₄ vers 4 GHz a une vitesse de phase effective d'environ 24 km.s⁻¹ et montre dans la simulation une longueur d'onde complète dans l'électrode. C'est un mode vibratoire d'électrode d'ordre deux.

[0101] La [Fig. 12] illustre dans un deuxième graphique, en dessous du premier graphique, la conductance harmonique G en dB sur l'axe gauche et l'admittance harmonique Y en dB sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz pour l'orientation (YXI)/42° et (YXI)/222°. Ces résultats ont été obtenus pour un potentiel +V appliqué aux dents 93a1 et 93a2' et un potentiel -V appliqué aux dents 93b1 et 93b2' tel qu'illustré au-dessus du deuxième graphique de la [Fig. 12]. Trois modes apparaissent dans l'admittance et la conductance à des fréquences différentes par rapport à la réalisation précédente. Notamment dans l'admittance harmonique Y avec le numéro 97₁ vers 1,5 GHz et avec le numéro 97₂ vers 2,5 GHz et dans la conductance harmonique G avec le numéro 97₃ proche de 3,15 GHz.

[0102] Le mode 97₁ à 1,5 GHz avec une vitesse de phase effective d'environ ~9 km.s⁻¹ est quasiment sur le franchissement de la fréquence SSBW. Il peut encore être amélioré par rapport aux pertes en augmentant la masse. La simulation montre qu'il s'agit d'une combinaison entre un mode vibratoire des dents d'électrodes et l'onde de cisaillement classique. Selon les résultats de la simulation, il est probable que seules deux des quatre électrodes contribuent de façon significative à la résonance.

[0103] Le deuxième mode 97₂ vers 2,5 GHz avec une vitesse effective proche de 15 km.s⁻¹ est un mode de cisaillement anti-symétrique au niveau des électrodes qui vibrent toutes en phase. En fait, comme auparavant, seules deux électrodes contribuent réellement à la réponse électrique. Selon les résultats des simulations, il est probable que seules les électrodes localisées entre deux domaines de polarisation opposée puissent réellement contribuer à la résonance, les deux autres doivent avoir un bilan de charge qui s'équilibre.

[0104] Le mode 97₃ à 3,15 GHz avec une vitesse effective proche de 20 km.s⁻¹ est un mode vibratoire des dents des électrodes, tel qu'illustré en bas de la [Fig.11].

[0105] Il peut être avantageux d'utiliser ce type de structures en favorisant une contribution particulière par un filtrage grossier ou pour des applications de sources de fréquence n'exploitant en pratique qu'un domaine limité du spectre, ce qui revient à filtrer d'une manière ou d'une autre le spectre par le système électronique exploitant le composant. L'avantage de la solution proposée ici est une fois encore de permettre l'exploitation de réponses électriques notablement supérieures en fréquence à celles classiquement atteignables avec des matériaux non polarisés.

[0106] Dans cette deuxième réalisation, un autre type de paire d'électrodes interdigitées est utilisé, qui est illustré schématiquement dans la [Fig. 13]. Ici deux dents d'un même potentiel sont agencées directement adjacentes suivi ensuite par deux dents du potentiel opposé qui

sont également agencées directement adjacentes. Donc 13a1' et 13a2', 13a3' et 13a4', 13a5' et 13a6' pour l'électrode 15a' et 13b1' et 13b2', 13b3' et 13b4', 13b5' et 13b6' pour l'électrode 15b'.

[0107] Selon une variante, un circuit de commande peut être configuré pour changer l'agencement des électrodes de la configuration telle que montrée en haut à gauche vers une configuration telle que montrée en haut à droite, par exemple en utilisant des commutateurs tels que montrés sur la [Fig. 14].

[0108] La [Fig. 14] illustre une électrode 151 avec des commutateurs 153a, 153b, 153c, 153d en face d'une deuxième électrode 155 avec des commutateurs 157a, 157b, 157c et 157d. Les commutateurs 153a, 153b, 153c, 153d sont configurés tels qu'ils peuvent mettre en contact ou non l'électrode 151 avec des dents 159a, 159b, 159c et 159d respectivement. De même, les commutateurs 157a, 157b, 157c et 157d sont configurés tels qu'ils peuvent mettre en contact ou non l'électrode 155 avec des dents 159a, 159b, 159c et 159d respectivement. Ainsi, on peut réaliser des schémas d'application de potentiels tels que montrés en haut à gauche et droite de la [Fig. 12] par un seul dispositif. La commutation est de préférence appliquée telle qu'un court-circuit entre électrodes est évité. La [Fig. 14] illustre à gauche la situation dans laquelle les dents 159a à 159d ont un potentiel alternant d'une dent à la suivante. A gauche de la [Fig. 14] deux dents successives donc 159a et 159b et 159c et 159d ont le même potentiel.

[0109] Les électrodes 151 et 155 peuvent aussi être utilisées dans les configurations des autres modes de réalisations pour permettre de changer le schéma d'excitation électrique.

[0110] La [Fig. 15] est un schéma illustrant les étapes d'un procédé de fabrication d'un dispositif à ondes élastiques selon un mode de réalisation de l'invention, en particulier un dispositif à ondes élastiques selon le premier mode de réalisation. Le procédé commence avec l'étape 101 pendant laquelle un matériau piézoélectrique, en particulier un matériau ferroélectrique, est fourni.

[0111] Cette étape peut consister à fournir un substrat massif, comme un wafer en matériau piézoélectrique monocristallin ou à fournir un substrat composite 11 comprenant une couche 5 de matériau piézoélectrique 3, une couche diélectrique 7, par exemple une couche d'oxyde de silicium et un substrat de base 9, par exemple en silicium par exemple du Si(100), Si(110) ou Si(111) ou du quartz.

[0112] Le matériau piézoélectrique de la couche 3 est du tantalate de lithium LiTaO_3 monocristallin ou du niobate de lithium LiNbO_3 monocristallin. D'autres matériaux piézoélectriques peuvent également être utilisés tels que définis ci-dessus.

[0113] Dans le cas du tantalate de lithium (LiTaO_3), l'orientation cristalline définie selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949 du premier sens 13a des premiers domaines 3ai de la couche 3 est de préférence $(YXI)/\theta$ avec la valeur de l'angle θ choisie entre 30° et 110° .

L'orientation cristalline du second sens 13b des seconds domaines 3bi de la couche 3 est alors $(YXI)/\theta + 180^\circ$ selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949. Il est également envisageable d'avoir les domaines dans le plan orthogonal $(YXI\bar{t})/\theta/90^\circ$ et $(YXI\bar{t})/\theta + 180^\circ/90^\circ$ par rapport à celle décrite ci-dessus en gardant les dents de peignes parallèles aux domaines.

[0114] Dans le cas du niobate de lithium (LiNbO_3), l'orientation cristalline définie selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949 du premier sens 13a des premiers domaines 3ai de la couche 3 est de préférence $(YXI)/\theta$ avec la valeur de l'angle θ choisie dans une plage -40° à $+110^\circ$ et préférentiellement de -10° à $+50^\circ$. L'orientation cristalline du second sens 13b des seconds domaines 3bi de la couche 3 est alors $(YXI)/\theta + 180^\circ$ selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949.

[0115] Un tel substrat composite 11 peut être obtenu par un procédé de transfert de couche, tel qu'un procédé de SmartCut™. Lors d'un procédé de type SmartCut™ on implante des ions dans un substrat donneur, ici un substrat du matériau piézoélectrique pour créer une zone fragilisée à l'intérieur du substrat donneur. Ensuite on attache le substrat donneur à un substrat de base. Ici le substrat de base est un substrat de silicium monocristallin, par exemple du Si(100) ou Si(110) ou Si(111) avec sa couche d'oxyde naturelle ou avec un oxyde de silicium thermique ou réalisé par dépôt chimique en phase vapeur (« CVD ») ou physique en phase vapeur (« PVD »). Cette couche d'oxyde facilite l'attachement des deux substrats, notamment par collage moléculaire. On peut choisir l'orientation dans le plan du silicium par rapport au plan de la couche piézoélectrique pour réduire, voire même minimiser, des modes d'ordre plus élevés que le fondamental.

[0116] Selon une variante, une couche de piégeage est réalisée sur le substrat de base avant la formation de l'oxyde. La couche de piégeage est typiquement du silicium polycristallin et de façon générale toute couche minimisant le libre parcours moyen des charges engendrées à l'interface entre le silicium et la couche d'oxyde par le passage de l'onde acousto-électrique.

[0117] Une fois les deux substrats attachés, un apport en énergie mécanique et/ou thermique emmène la zone de fragilisation jusqu'à la rupture. Ainsi une couche d'une épaisseur de $1\text{ }\mu\text{m}$ ou moins, peut être transférée sur le substrat de base.

[0118] Ensuite lors de l'étape 103, la paire d'électrodes en peignes interdigités est réalisée dans le matériau piézoélectrique pour obtenir le dispositif à ondes élastiques selon le premier mode de réalisation en utilisant des étapes de lithographie, de gravure, de dépôt et éventuellement de polissage, connues de l'homme de l'art.

[0119] Le procédé de l'étape 103 peut être adapté aux autres modes de réalisations décrits ci-dessus en adaptant le masque et l'alignement du masque lors des étapes de lithographie.

[0120] Ensuite lors de l'étape 105, un champ électrique est appliqué qui est plus fort que le champ coercitif du matériau piézoélectrique, en particulier le matériau ferroélectrique, pour réaliser les premiers et deuxièmes domaines alternant de manière périodique et ayant des polarisations opposées. Le champ électrique appliqué doit être plus fort que $22 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ qui représente le champ coercitif généralement mesuré pour le niobate de lithium et le tantalate de lithium.

[0121] Ainsi on peut utiliser les dents du paire d'électrodes de peignes interdigités pour aussi réaliser la structure des domaines de polarisations opposées.

[0122] Pour réaliser le deuxième mode et le troisième mode de réalisation, il suffit de réaliser l'étape 105 avant l'étape 103 en utilisant des électrodes pour créer un champ électrique en forme de bandes parallèles, de préférence perpendiculaire à la surface du matériau piézoélectrique.

[0123] Un tel procédé est par exemple décrit dans Thorlabs, « Periodically Poled Lithium Niobate (PPLN) – Tutorial », page 686 à 687 disponible sur www.thorlabs.com en utilisant des électrodes structurées qui sont ensuite enlevées. D'autres alternatives utilisent un faisceau d'électron, on peut se référer à la publication : C. Restoin, C. Darraud-Taupiac, J. L. Decossas, J. C. Vareille, J. Hauden et A. Martinez : « Ferroelectric domain inversion by electron beam on LiNbO₃ and Ti : LiNbO₃ » Journal of Applied Physics, 88:6665–6668, 2000, ou M. Yamada et K. Kishima : « Fabrication of periodically reversed domain structure for SHG in LiNbO₃ by direct electron beam lithography at room temperature », Electronics Letters, 27:828–829, 1991.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif à ondes élastiques, en particulier à ondes de cisaillement, comprenant un matériau piézoélectrique (3), en particulier un matériau ferroélectrique avec des premiers domaines (3a) d'une première direction de polarisation (13a) et des deuxièmes domaines (3b) avec une deuxième direction de polarisation (13b), la première direction (13a) étant opposée à la deuxième direction (13b), dans laquelle les premiers et deuxièmes domaines (3a, 3b) sont alternés de manière périodique selon une direction (d), dite direction périodique, perpendiculaire à la normale (n) de surface du matériau piézoélectrique (3), et une paire d'électrodes en peigne interdigitées (15a, 15b) dont les dents de peigne (17a1 à 17a3, 17b1 à 17b3) respectives s'étendent essentiellement perpendiculaires à la direction périodique (d) et à la normale (n) et dont les dents de peigne (17a1 à 17a3, 17b1 à 17b3) sont agencées au moins partiellement, de préférence entièrement, enterrées dans le matériau piézoélectrique (3) et dans lequel les dents de peigne sont positionnées telles que la direction de polarisation des deux côtés de chaque dent est la même, en particulier telles que la direction de polarisation est différente pour des dents d'électrodes différentes.
2. Dispositif à ondes élastiques selon la revendication 1, dans lequel les dents de peignes (17a1 à 17a3, 17b1 à 17b3) sont agencées de manière périodique.
3. Dispositif à ondes élastiques selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le matériau piézoélectrique (3) est agencé sous forme d'une couche (5), en particulier avec une épaisseur (e_1) inférieure à la longueur d'onde, préférentiellement inférieure à $\lambda/2$, et encore plus préférentiellement inférieure à $\lambda/4$, au-dessus d'un substrat de base (9), en particulier un substrat de silicium, de silicium amorphe ou poly-silicium, d'oxyde de silicium, de carbure de silicium (SiC), de saphir, de la nitrure de silicium (SiN), de la nitrure d'aluminium (AlN), de quartz, de carbone, de diamant, de Yags (Yttrium aluminum garnet), de Yigs (Yttrium iron garnet) ou de LiNbO_3 et/ou de LiTaO_3 .
4. Dispositif à ondes élastiques selon la revendication 3, dans lequel une couche diélectrique (7), en particulier une couche d'oxyde de silicium, de SiN, de Ta_2O_5 , de ZrO_2 , de HfO_2 , de SiON, de poly-silicium ou d'une combinaison de ces matériaux, est agencée entre la couche (5) de matériau piézoélectrique et le substrat de base (9), la couche diélectrique (7) ayant de préférence une épaisseur inférieure à la longueur d'onde et/ou entre 200 nm et 2 μm .

5. Dispositif à ondes élastiques selon l'une des revendications 3 ou 4, dans lequel une couche de piégeage, en particulier une couche de silicium poly-cristallin ou de l'AlN ou du SiOCH polycristallin, est agencée entre le matériau piézoélectrique (3) et le substrat de base (9) ou entre la couche diélectrique (7) et le substrat de base (9), la couche de piégeage ayant de préférence une épaisseur entre 300 nm et 2 μ m.
6. Dispositif à ondes élastiques selon l'une des revendications 3 à 5, dans lequel les dents de peigne s'étendent entre des régions de la couche (5) du matériau piézoélectrique à partir de l'interface (21) avec le substrat de base (9) ou la couche diélectrique (7).
7. Dispositif à ondes élastiques selon une des revendications 3 à 6, dans lequel l'épaisseur des dents de peigne est au moins égale ou inférieure à l'épaisseur de la couche (5) du matériau piézoélectrique (3).
8. Dispositif à ondes élastiques selon une des revendications 1 à 7, dans lequel la largeur (a) des dents des électrodes en peigne interdigitées (15a, 15b) est entre 40 % et 60 %, de préférence de 50 %, de la largeur des domaines, et/ou d'au moins 280 nm, de préférence d'au moins 350 nm.
9. Dispositif à ondes élastiques selon l'une des revendications 1 à 8, le matériau piézoélectrique (3) est au moins un parmi du LiTaO₃, du LiNbO₃, des perovskites de type ABO₃, en particulier du KNbO₃ et de PbTiO₃, du PZT, du PMnPt, ou de AlScN.
10. Dispositif à ondes élastiques selon une des revendications 1 à 9, dans lequel une première électrode (151) comprend des premiers commutateurs (153a, 153b, 153c, 153d) et une deuxième électrode (155) comprend des deuxièmes commutateurs (157a, 157b, 157c et 157d), les premiers commutateurs (153a, 153b, 153c, 153d) sont configurés tels qu'ils peuvent mettre en contact ou non la première électrode (151) avec des dents (159a, 159b, 159c et 159d) respectivement et les deuxièmes commutateurs (153a, 153b, 153c, 153d) sont configurés tels qu'ils peuvent mettre en contact ou non la deuxième électrode (151) avec des dents (159a, 159b, 159c et 159d) respectivement, en particulier pour former la paire d'électrodes en peigne.
11. Dispositif à ondes élastiques selon une des revendications 1 à 10, comprenant un moyen d'alimentation (21) configuré pour fournir un signal radio-fréquence d'une fréquence d'au moins 2 GHz, de préférence d'au moins 6 GHz, aux électrodes en peigne interdigitées (15a, 15b).

12. Dispositif à ondes élastiques selon une des revendications 1 à 11, dans lequel la paire d'électrodes en peigne interdigitées est le seul élément électriquement conducteur en contact avec le matériau piézoélectrique.

13. Dispositif à ondes élastiques selon une des revendications 1 à 12, dépourvu de toute autre moyen d'électrode hormis la paire d'électrodes en peigne interdigitées, notamment dépourvu de toute électrode flottante.

14. Utilisation d'un dispositif à ondes élastiques selon la revendication 11, dans un dispositif acousto-électrique, en particulier un filtre, un capteur ou une ligne de retard, ayant des fréquences de fonctionnement de 2 GHz et plus, en particulier de 6 GHz ou plus.

15. Procédé de fabrication d'un dispositif à ondes élastiques selon l'une des revendications 1 à 13 et comprenant les étapes suivantes :

- fournir un matériau piézoélectrique, en particulier un matériau ferroélectrique,
- réaliser la paire d'électrodes en peignes interdigités au moins partiellement, de préférence entièrement, enterrée dans le matériau piézoélectrique (3).et ensuite
- appliquer un champ électrique plus fort, en particulier au moins 10 fois plus fort, que le champ coercitif du matériau piézoélectrique pour réaliser les premiers et deuxièmes domaines alternant de manière périodique et ayant des polarisations opposées.