

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 157 992

②1 N° d'enregistrement national : 23 15551

⑤1 Int Cl⁸ : H 03 H 9/25 (2024.01)

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 31.12.23.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 04.07.25 Bulletin 25/27.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : Soitec Société anonyme à conseil d'administration — FR.

⑦2 Inventeur(s) : Ballandras Sylvain, Courjon Emilie, Bernard Florent et Clairet Alexandre.

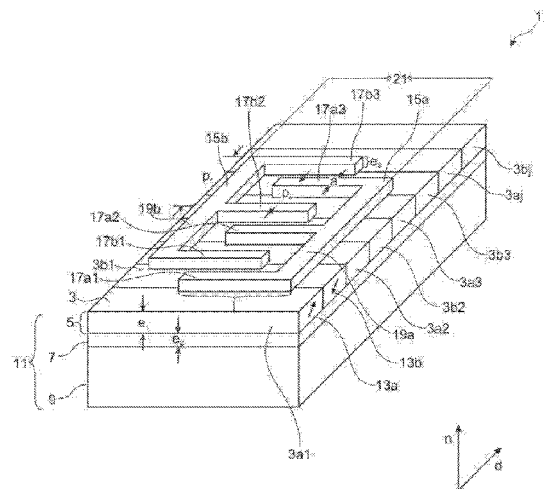
⑦3 Titulaire(s) : Soitec Société anonyme à conseil d'administration.

⑦4 Mandataire(s) : GRÜNECKER.

⑤4 Dispositif à ondes élastiques.

⑤7 La présente invention se rapporte à un dispositif à ondes élastiques comprenant un matériau piézoélectrique 3, en particulier un matériau ferroélectrique avec des premiers domaines 3a d'un premier sens de polarisation 13a et des deuxièmes domaines 3b avec un second sens de polarisation 13b, le premier sens 13a étant opposé au second sens, 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 la surface du matériau piézoélectrique 3, et une paire d'électrodes en peigne interdigitées 15a, 15b au-dessus du, en particulier sur le, matériau piézoélectrique 3 dont les dents de peigne 17a1 à 17a3 et 17b1 à 17b3 respectives s'étendent essentiellement perpendiculairement à la direction périodique d et à la normale n à la surface du substrat.

Figure pour l'abrégé : Fig. 1



FR 3 157 992 - A1



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 d'insertion, typiquement inférieures à 3 dB voire 2 dB dans la bande passante du filtre, et de petites tailles, inférieures au mm², aux fréquences radios (100 MHz - 10 GHz).
- [0003] Dans un dispositif à ondes élastiques, un ou plusieurs transducteurs à peignes interdigués (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 (LiTaO₃), 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 (LiNbO₃) 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 LiTaO₃ et 4.500 m.s⁻¹ sur LiNbO₃ 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 comprenant un matériau piézoélectrique, en particulier un matériau ferroélectrique avec des premiers domaines d'un premier sens de polarisation et des deuxièmes domaines avec un second sens de polarisation, le premier sens étant opposé au second sens, dans

laquelle les premiers et deuxièmes domaines sont alternés de manière périodique selon une direction, dite direction périodique, perpendiculaire à la normale de surface du matériau piézoélectrique, et une paire d'électrodes en peigne interdigitées au-dessus du, en particulier sur le, matériau piézoélectrique dont les dents de peigne respectives s'étendent essentiellement perpendiculaires à la direction périodique et à la normale, et dont chacune des dents de peigne est entièrement positionnée au-dessus d'un seul des premiers domaines ou deuxièmes domaines.

- [0008] Grâce aux domaines de polarisations opposées, des modes apparaissent ayant des vitesses de phase supérieures à 4.200 m.s^{-1} qui se propagent en surface sans rayonnement dans le volume. Cette approche permet d'ailleurs de créer des conditions aux limites différentes des modes opératoires sans domaines, donnant lieu à des modes de polarisation plus complexe que les modes fondamentaux usuels. De plus, lorsque les conditions de mise en œuvre le permettent, la visualisation des domaines alternés permet un alignement aisé des peignes par rapport à la structure ferroélectrique périodique.
- [0009] Les dispositifs à ondes élastiques selon l'invention peuvent être utilisés dans un nombre important d'applications, telles que celles des filtres, en particulier des filtres à éléments d'impédance (« ladder » en terminologie anglaise) ou à couplage acoustique tels que les 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 constituent 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, les dents de peigne de la paire d'électrodes en peigne interdigitées peuvent être agencées de manière périodique. Les dents ont de préférence une forme rectangulaire, c'est-à-dire une forme de parallélepède.
- [0012] Selon une variante, les dents de peigne peuvent être positionnées au-dessus d'interfaces entre les premiers domaines et les deuxièmes domaines de sens de polarisation opposés. Dans une telle configuration, on observe les modes acoustiques à des fréquences deux fois plus élevées comparée à une configuration sans domaine mais avec les mêmes électrodes et matériaux. Ces modes ont donc une vitesse de phase v_{eff}

effective environ deux fois plus grande, avec $v_{\text{eff}} = \lambda \times f = p_{\text{el}} \times f$ 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.

- [0013] Selon une variante, les dents de peigne peuvent être positionnées de façon symétrique par rapport aux interfaces entre les premiers domaines et les deuxièmes domaines. Dans cette configuration, dans laquelle le plan central des dents coïncide avec le plan des interfaces, des contributions de modes parasites peuvent être réduites voire être supprimées.
- [0014] Selon une variante, les dents de peigne directement voisines des deux électrodes en peigne interdigitées peuvent être positionnées au-dessus des interfaces entre les premiers domaines et les deuxièmes domaines directement voisines. Ainsi on obtient une périodicité égale à la périodicité des domaines.
- [0015] L'exploitation de dispositifs à plus hautes fréquences nécessite des dimensions de dents de peignes plus fines, imposant ainsi une utilisation de photolithographie à plus haute résolution, par exemple en utilisant des lasers à excimère KrF ou ArF, nettement plus onéreuse. De plus, des structures plus fines engendrent des pertes électriques, c'est à dire ohmiques, plus importantes.
- [0016] Selon une variante, la largeur des dents des électrodes en peigne interdigitées peut être entre 25 % et 75 %, de préférence entre 40 % et 60 %, encore plus favorablement 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 à retard fonctionnant à des fréquences plus élevées que normalement accessibles en utilisant la lithographie I-line.
- [0017] Selon une variante, chacune des dents de peigne peut avoir une largeur correspondant à la largeur d'un premier domaine et d'un deuxième domaine. Ainsi, en particulier quand les électrodes sont agencées de façon symétrique par rapport aux interfaces entre les premiers domaines et les deuxièmes domaines, le courant qui passe entre les électrodes peut être augmenté.
- [0018] Selon une variante, chacune des dents de peigne peut être entièrement positionnée au-dessus d'un seul des premiers domaines ou deuxièmes domaines.
- [0019] Selon une alternative de cette variante, les dents de peigne directement voisines des électrodes peuvent être positionnées au-dessus de domaines avec le même sens de polarisation, en particulier des domaines avec le même sens de polarisation seulement séparés par un domaine avec le sens de polarisation opposé. Dans cette configuration le mode d'ordre deux est supprimé et l'on favorise un mode harmonique d'ordre trois par rapport au mode de cisaillement fondamental avec une vitesse de phase effective trois fois plus grande. Il devient ainsi possible d'atteindre des vitesses de phase très supérieures à celle du mode fondamental, en particulier on peut observer dans des si-

mulations des vitesses de phase plus grande que 10 km.s^{-1} , ce qui permet d'atteindre des fréquences au-delà de la bande C du spectre électromagnétique avec la technologie I-line.

- [0020] Selon l'autre alternative de cette variante, les dents de peigne d'une des deux électrodes en peigne peuvent être positionnées au-dessus des premiers domaines et les dents de peigne de la seconde électrode en peigne peuvent être positionnées au-dessus des deuxièmes domaines. Dans ce mode de réalisation, le mode de deuxième ordre est favorisé par rapport au mode fondamental et donc une augmentation de la vitesse de phase effective d'un facteur deux est observée.
- [0021] Selon une variante, la largeur des dents de peigne des électrodes en peigne interdigitées peut être la même que la largeur des domaines, et/ou d'au moins 280 nm, de préférence d'au moins 350 nm pour être compatible avec les limites de la technologie I-line. Ainsi, il devient possible de fournir des filtres, des capteurs ou des lignes à retard fonctionnant à des fréquences plus élevées que normalement accessibles en utilisant la lithographie I-line. De plus dans le cas des dents toujours positionnées sur des domaines d'une même polarisation, on peut utiliser les électrodes pour créer des domaines.
- [0022] Selon une variante, chacune des dents de peigne d'une des deux électrodes peut être entièrement positionnée au-dessus d'un seul des premiers et/ou deuxièmes domaines pendant que chacune des dents de peigne de la seconde électrode est positionnée au-dessus d'interfaces entre les premiers domaines et les deuxièmes domaines. On observe plusieurs modes avec des vitesses de phase effectives supérieures à la vitesse de phase du mode de base.
- [0023] Selon une variante, le dispositif peut être réalisé tel qu'il y ait au moins un domaine entier dépourvu de doigts d'électrode entre deux domaines sur lesquels sont positionnées deux dents au moins partiellement. En éloignant les électrodes, il devient possible de varier les modes et les fréquences et ainsi les vitesses de phase effectives.
- [0024] Selon une variante de l'invention, le matériau piézoélectrique peut être agencé sous forme d'une couche, en particulier avec une épaisseur inférieure à la longueur d'onde, préférentiellement inférieure à $\lambda/2$, et encore plus préférentiellement inférieure à $\lambda/4$, typiquement inférieure à $1 \mu\text{m}$, au-dessus d'un substrat de base, en particulier un substrat de silicium, de silicium amorphe ou poly-silicium, d'oxyde de silicium, de carbure de silicium (SiC), de saphir, de nitrure de silicium (SiN), de nitrure d'aluminium (AlN), de quartz, de carbone, de diamant, de Yags, de Yigs (respectivement « Ytrium aluminum garnet » et « Ytrium iron garnet » en terminologie anglaise), ou de LiNbO_3 et/ou de LiTaO_3 . Il peut s'agir d'une bi-couche 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 globales du mode.

- [0025] 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, de de 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, de préférence ayant une épaisseur inférieure à la longueur d'onde et/ou d'une épaisseur entre 0,2 µm (soit 200 nm) et 2 µm, simplifie la réalisation de la structure en multicouches. 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'ajuster 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. Un effet similaire peut-être obtenu avec du pentoxide de thallium (Ta₂O₅). 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.
- [0026] 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. Cette couche de piégeage a de préférence une épaisseur comprise entre 300 nm (soit 0,3 µm) et 2 µm. La présence d'une couche de piégeage permet de réduire les courants de fuites.
- [0027] Selon une variante de l'invention, une couche métallique peut être agencée sur la surface du matériau piézoélectrique opposée de la paire d'électrodes en peignes interdigués, en particulier entre la couche de matériau piézoélectrique et le substrat de base ou entre la couche diélectrique et le substrat de base. La présence de la couche métallique simplifie la création des domaines alternés par application locale d'un champ électrique opposé au sens de polarisation natif et dépassant le champ coercitif du matériau ferroélectrique.
- [0028] Quand la couche métallique est localisée entre la couche diélectrique et le substrat de base, le couplage du nouveau mode est plus élevé, car plus la couche métallique est distante de la couche piézoélectrique plus les lignes de champs électriques dans la couche piézoélectrique sont parallèles à la surface. De préférence, le métal peut être encapsulé pour réduire ou même éviter les contaminations métalliques, par exemple lors des étapes d'un procédé SmartCut™. Il peut également être avantageux de limiter la localisation de la couche métallique sous la zone d'interpénétration des électrodes du transducteur en peignes interdigués afin de limiter les éléments parasites liés là a

présence de métal sous les pistes et plots de connexion du dispositif résultant.

[0029] Selon une variante de l'invention, le matériau piézoélectrique peut être au moins un parmi du LiTaO_3 , du LiNbO_3 , du KNbO_3 , du PZT, du PMnPt, de PbTiO_3 ou de l'AlScN. Les modes observés 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.

[0030] Selon une variante de l'invention, 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 peuvent être configurés tels qu'ils peuvent mettre en contact ou non la première électrode avec des dents respectivement et les deuxièmes commutateurs peuvent être 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.

[0031] De préférence, la commutation des dents est appliquée de manière à ne pas mettre la première et la deuxième électrode en court-circuit.

[0032] 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, en particulier d'au moins 3 GHz et encore plus en particulier d'au moins 6 GHz, aux électrodes en peignes interdigités. Ainsi, il devient possible de fournir des filtres, des capteurs ou des lignes à retard fonctionnant à des fréquences plus élevées que normalement accessibles en utilisant la lithographie I-line.

[0033] 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 à retard, ayant des fréquences de fonctionnement de 2 GHz et plus, en particulier de 3 GHz ou plus, et encore plus en particulier de 6 GHz ou plus. Ainsi il devient possible de fournir des filtres, capteurs ou lignes à retard fonctionnant à des fréquences plus élevées que normalement accessibles en utilisant la lithographie I-line.

[0034] 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 suivantes

: fournir un matériau piézoélectrique, en particulier un matériau ferroélectrique, 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, et réaliser la paire d'électrodes en peignes interdigités au-dessus, en particulier directement sur, le matériau piézoélectrique.

- [0035] Pour réaliser l'objet, l'invention propose également un procédé de fabrication d'un dispositif à ondes élastiques tel que décrit ci-dessus et pour lequel les dents de peigne directement voisines sont positionnés au-dessus de domaines avec le même sens de polarisation et comprenant les étapes suivantes : fournir un matériau piézoélectrique, en particulier un matériau ferroélectrique, réaliser la paire d'électrodes en peignes interdigités au-dessus, en particulier directement sur, le matériau piézoélectrique et appliquer un champ électrique plus fort, en particulier au moins dix fois plus fort, que le champ coercitif du matériau piézoélectrique en utilisant la paire d'électrodes en peignes interdigités pour réaliser les premiers et deuxièmes domaines alternant de manière périodique et ayant des polarisations opposées. Ainsi on peut simplifier le processus de fabrication.
- [0036] Selon une variante de l'invention, la paire d'électrodes peut être réalisée par dépôt d'une couche métallique, en particulier 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, suivi d'une étape de formation des électrodes par lithographie et gravure. La paire d'électrodes 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.
- [0037] Selon une variante de l'invention, le champ électrique peut être appliqué en forme de bandes parallèles, en particulier en utilisant des électrodes électrolytiques, en préférence du chlorure de lithium.
- [0038] 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, afin d'abaisser le champ coercitif au-delà duquel il est possible de retourner les domaines ferroélectriques de la couche supérieure par application d'un champ électrique orienté dans le sens opposé de sa polarisation native. Ainsi, la polarisation peut être obtenue même en absence d'une contre électrode.
- [0039] Selon une variante de l'invention, le matériau piézoélectrique est fourni sous forme d'une couche sur un substrat de base. Ce type de substrat composite peut être obtenu

par un transfert d'une couche piézoélectrique à partir d'un substrat donneur sur le substrat de base. Ce transfert peut être fait par un procédé de type SmartCut™ avec la réalisation d'une zone de fragilisation dans le substrat donneur, en implantant des ions dans le substrat donneur. Selon l'invention, la formation des domaines peut être réalisée avant ou après le transfert de la couche piézoélectrique.

[0040] 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 :

[0041] La [Fig.1] est un schéma illustrant schématiquement un dispositif à ondes élastiques selon un premier mode de réalisation de l'invention.

[0042] 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.

[0043] La [Fig.3] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et la admittance harmonique Y pour un dispositif à ondes élastiques selon l'état de l'art.

[0044] La [Fig.4] 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.

[0045] La [Fig.5] illustre l'admittance harmonique Y et la susceptance harmonique B pour les trois paires d'angles $\theta/\theta+180^\circ$: $30^\circ/210^\circ$, $42^\circ/222^\circ$ et $50^\circ/230^\circ$ du matériau piézoélectrique LiTaO_3 (XYI)/ θ et $\theta+180^\circ$.

[0046] La [Fig.6] 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 ainsi qu'un schéma des deux modes de cisaillement.

[0047] La [Fig.7] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et l'admittance harmonique Y pour un dispositif à ondes élastiques selon la variante du premier mode de réalisation de l'invention.

[0048] La [Fig.8] 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 ainsi qu'un schéma des deux modes de cisaillement.

[0049] La [Fig.9] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et l'admittance harmonique Y pour un dispositif à ondes élastiques selon la deuxième variante du premier mode réalisation de l'invention.

[0050] La [Fig.10] est un schéma illustrant schématiquement une partie d'un dispositif à ondes élastiques selon un deuxième mode de réalisation de l'invention.

[0051] La [Fig.11] 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.

- [0052] La [Fig.12] est un schéma illustrant schématiquement une partie d'un dispositif à ondes élastiques selon un troisième mode de réalisation de l'invention.
- [0053] La [Fig.13] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et la l'admittance harmonique Y pour un dispositif à ondes élastiques selon le troisième mode de réalisation de l'invention.
- [0054] La [Fig.14] est un schéma illustrant schématiquement une partie d'un dispositif à ondes élastiques selon un quatrième mode de réalisation de l'invention.
- [0055] La [Fig.15] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et la susceptance B pour deux réalisations un dispositif à ondes élastiques selon le quatrième mode de réalisation de l'invention.
- [0056] La [Fig.16] est un schéma illustrant schématiquement une paire d'électrodes interdigitées alternative pour réaliser le quatrième mode de réalisation de l'invention.
- [0057] La [Fig.17] est un schéma illustrant schématiquement une deuxième paire d'électrodes interdigitées alternative pour réaliser le quatrième mode de réalisation de l'invention.
- [0058] La [Fig.18] 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.
- [0059] 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.
- [0060] La [Fig.1] illustre un dispositif à ondes élastiques 1 selon un premier mode de réalisation de l'invention.
- [0061] Le dispositif à ondes élastiques 1 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.
- [0062] 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.

- [0063] 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_f , selon une direction d, dite direction périodique, perpendiculaire à la normale de surface n du matériau piézoélectrique 3.
- [0064] 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. La couche 5 a présente, 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 $1 \mu\text{m}$.
- [0065] 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 $(YX)/\theta$ 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 $(YX)/\theta + 180^\circ$ selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949. Dans ce repère, la normale n correspond à la direction $90^\circ - \theta$, et la direction d est orthogonale à n et colinéaire à Z.
- [0066] 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 $(YX)/\theta$ avec la valeur de l'angle θ choisie dans une plage de -30° à $+120^\circ$ et de préférence de 0 à 70° . L'orientation cristalline du second sens 13b des seconds domaines 3bi de la couche 3 est alors $(YX)/\theta + 180^\circ$ selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949.
- [0067] 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 $2 \mu\text{m}$. La couche diélectrique peut aussi être en SiN, en Ta_2O_5 , en ZrO_2 , en HfO_2 , en SiON ou en une combinaison de ces matériaux. Elle peut également comprendre entre autres du polysilicium.
- [0068] Le substrat de base 9 est de préférence un substrat en silicium, par exemple du silicium (100) ou (110) ou (111). 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 polysilicium ou en LiNbO_3 et/ou en LiTaO_3 .

- [0069] 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.
- [0070] Une paire d'électrodes en peignes interdigités 15a, 15b est agencée au-dessus, en particulier directement sur la couche 5 de matériau ferroélectrique. 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 parallélépipède). 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.
- [0071] 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_f des domaines 3ai et 3bi en l'occurrence.
- [0072] Les électrodes en peignes 15a et 15b sont fait 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. 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.
- [0073] 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.
- [0074] 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.

- [0075] 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.
- [0076] 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.
- [0077] 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.
- [0078] 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.
- [0079] 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. 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 agencées directement sur la surface 31 de la couche 5 de matériau piézoélectrique. [Fig.2] représente également la couche diélectrique 7 et le substrat de base 9.
- [0080] Les dents 17a1 et 17b1 sont positionnées sur les interfaces 33a et 33b entre les domaines 3a1, 3b1 et 3a2 de polarisations opposées. Les plans centraux 35a et 35b de chaque dent 17a1 et 17b1 sont de préférence alignés avec les interfaces 33a et 33b. Ainsi les dents 17a1 et 17b1 sont positionnées de façon symétrique par rapport aux interfaces 33a et 33b respectivement dans la direction périodique d .
- [0081] 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 la [Fig.2] les fréquences des modes fondamentaux sont deux fois plus grands en comparaison avec un dispositif sans domaines de polarisations opposées ce qui est dû à une réduction de la longueur d'onde par un facteur deux. En bas de la [Fig.2] sont illustrées 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 correspondant pas à la période électrique $2p_e$ pour un dispositif sans domaines. Le mode existe seulement quand la vibration des électrodes est antisymétrique. La vibration de l'électrode est anti-symétrique et les deux électrodes vibrent de façon similaire compte tenu des conditions aux limites égales et opposées auxquelles elles sont soumises.

[0082] La [Fig.3] illustre les résultats de la simulation pour le dispositif sans domaines alternés et la [Fig.4] 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), une couche de piégeage de Si polycristallin d'une épaisseur de 1 μm , une couche diélectrique de 500 nm d'épaisseur de SiO_2 et une couche de LiTaO_3 d'une épaisseur de 600 nm ont été utilisées pour le dispositif de comparaison. Un substrat composite avec un substrat de base de Si(100), une couche de piégeage de Si polycristallin d'une épaisseur de 1 μm , une couche diélectrique de SiO_2 et une couche de LiTaO_3 d'épaisseurs respectives de 500 nm et 600 nm avec des domaines infiniment longs et alternés avec une périodicité p_f de 4 μm et avec des directions $(\text{YX})/42^\circ$ et $(\text{YX})/222^\circ$ ont été utilisées pour le dispositif selon l'invention. Dans les deux cas, les électrodes sont en AlCu et ont une épaisseur de 150 nm et un rapport a/p_e de 0,5 et un pas mécanique p_e de 2 μm .

[0083] La [Fig.3] illustre le module de la conductance harmonique G en dB sur l'axe gauche et le module de l'admittance harmonique Y en dB sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz. On observe le mode de Rayleigh 41 vers 700 MHz dans la conductance harmonique seulement. Le mode de cisaillement 43 se trouve vers 1 GHz et le mode SSBW (acronyme du nom anglais « surface skimming bulk wave ») 45 vers 1,15 GHz.

[0084] La [Fig.4] illustre le module de la conductance harmonique G en dB sur l'axe gauche et le module de l'admittance harmonique Y en dB sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz pour le dispositif 1 selon l'invention tel qu'illustré à la [Fig.1] et la [Fig.2] avec les domaines alternés. On observe les modes à une fréquence environ deux fois plus élevée, notamment le mode de Rayleigh 51 vers 1400 MHz dans la conductance harmonique seulement, le mode de cisaillement 53 vers 2 GHz et le mode SSBW 55 vers 2,3 GHz. Le mode de cisaillement 53 observé vers 2 GHz de la structure selon l'invention se caractérise par une vitesse de phase effective de 8 km.s^{-1} , un couplage autour de 3,1% et un facteur de qualité de plus de 10.000 pour la résonance et de plus de 20.000 pour l'anti résonance. Pour des orientations $(\text{YX})/30^\circ$ et $(\text{YX})/210^\circ$ le couplage monte à une valeur de 5%. Des modes parasites apparaissent également qui sont dus à la présence de la couche diélectrique et de la couche de piégeage.

[0085] Le même phénomène peut être observé avec du LiNbO_3 qui pour des mêmes paramètres structurels montre un mode avec un couplage d'environ 10% et un facteur de

qualité également supérieur. En optimisant l'épaisseur de la couche diélectrique, ici la couche d'oxyde de silicium, le coefficient de température de la fréquence (CTF) définissant la dépendance de la fréquence en fonction de la température $\Delta f/f = \text{CTF} \times (T - T_0)$, avec T_0 la température de référence prise généralement à 25°C, peut être minimisé, voire annulé. En effet, pour une épaisseur de la couche d'oxyde de silicium d'environ 1 μm , le CTF est minimum et proche de zéro. De plus, les paramètres CTF de résonance et anti-résonance ont quasiment la même dépendance en fonction de la température et une différence de seulement quelques ppm.K⁻¹ entre eux.

[0086] La [Fig.5] illustre l'admittance harmonique Y sur l'axe de gauche et la susceptance harmonique B sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz pour trois paires d'angles $\theta/\theta+180^\circ$ du matériau piézoélectrique LiTaO₃ (XY)/ θ et $\theta+180^\circ$. Les courbes 57₁ et 59₁ correspondent respectivement à l'admittance en dB et à la susceptance en S.m⁻¹ pour $\theta=30^\circ$ pour les premiers domaines et $\theta=210^\circ$ pour les deuxièmes domaines. Les courbes 57₂ et 59₂ correspondent respectivement à l'admittance en dB et à la susceptance en S.m⁻¹ pour $\theta=42^\circ$ pour les premiers domaines et $\theta=222^\circ$ pour les deuxièmes domaines. Les courbes 57₃ et 59₃ correspondent respectivement à l'admittance en dB et à la susceptance en S.m⁻¹ pour $\theta=50^\circ$ pour les premiers domaines et $\theta=230^\circ$ pour les deuxièmes domaines. Pour les trois orientations on observe le mode de cisaillement vers 2 GHz. On voit que le couplage peut être optimisé en fonction de l'orientation. Plus les pics de résonance et d'anti-résonance sont séparés, plus le couplage est élevé. Ce résultat permet également de mettre en évidence que la résolution des pics d'anti-résonance varie avec l'orientation de la couche piézoélectrique.

[0087] La [Fig.6] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie d'un dispositif à ondes élastiques 111 selon une variante du premier mode de réalisation de l'invention. La [Fig.6] montre les premiers domaines 3a1 à 3a4, pour les domaines 3a1 et 3a4 seulement la moitié du domaine respectif est montrée et les seconds domaines 3b1 à 3b3 de polarisation opposée entre les domaines 3a1 à 3a4. Une dent 113a1 et 113b1 est représentée pour chaque électrode en peigne 15a et 15b. La [Fig.6] représente également la couche diélectrique 7 et le substrat de base 9.

[0088] Les dents 113a1 et 113b1 sont positionnées, de façon centrale, sur les interfaces 115a et 115b entre les domaines de polarisations opposées 3b1 et 3a2 et 3a3 et 3b3 respectivement. Ainsi les dents 113a1 et 113b1 sont positionnées de façon symétrique par rapport aux interfaces 115a et 115b respectivement dans la direction périodique d.

[0089] La seule différence entre la variante de la [Fig.6] et le dispositif 1 de la [Fig.2] est que la distance entre les dents 113a1 et 113b1 est plus grande que dans le mode de réalisation de la [Fig.1]. En effet le domaine 3b2 est entièrement dépourvu de dent d'électrode. Ainsi le pas mécanique p_c correspond à la largeur de trois domaines ou 1,5 fois le pas p_f de la périodicité des domaines au lieu de une fois la largeur de domaine

ou 0,5 fois le pas p_f pour la variante de la [Fig.2].

- [0090] La simulation telle que décrite ci-dessus pour le premier mode de réalisation a été réalisée pour la présente variante pour une cellule du dispositif 111 avec une largeur d'un domaine de $1 \mu\text{m}$ et les orientations de LiTaO_3 (YX)/ 42° et (YX)/ 222° pour les premier et second domaines et un substrat de base en Si(111) (XZ*wlt*)/ $-45^\circ/+54.7^\circ/\psi$ avec ψ le désalignement angulaire entre les méplats du silicium et du LiTaO_3 choisi entre 0 et 360° . On note que ce choix n'est pas restrictif et que les orientations de silicium (100), (111), (211) etc. peuvent être exploitées selon l'invention. Le choix de l'angle ψ suivra la même règle que pour le Si(111). Le pas mécanique p_e est ainsi de $3 \mu\text{m}$. La largeur de la cellule pour faire les simulations est de $6 \mu\text{m}$. Ici la cellule représente l'unité de la structure qui se répète à l'infini pour réaliser la simulation. Des simulations numériques réalisées mettent en évidence que l'on observe deux modes pour un dispositif 111 qui sont illustrés en bas de la [Fig.6]. Un mode présente des déformations de cisaillement avec deux longueurs d'ondes de cisaillement par période électrique $2p_e$ et un mode présente des déformations avec trois longueurs d'ondes par période électrique $2p_e$.
- [0091] La [Fig.7] illustre 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 (YX)/ 42° et (YX)/ 222° .
- [0092] Un mode apparaît vers $1,4 \text{ GHz}$, visible dans l'admittance, voir numéro 117, et la conductance harmonique G , voir numéro 119. Un deuxième mode vibratoire apparaît vers $2,7 \text{ GHz}$ dans l'admittance harmonique Y indiqué par 121 et la conductance harmonique G indiqué par 123. Les vitesses de phase équivalentes sont de $8,6 \text{ km.s}^{-1}$ et 16 km.s^{-1} respectivement. Les couplages électromécaniques de ces modes sont respectivement de $4,1$ et $6,4 \%$. Les coefficients de qualité de la résonance et de l'anti-résonance du premier du premier mode sont nettement supérieures à 10.000 mais restent inférieures à 500 pour le second dont on voit que le pic de conductance harmonique G est notablement évasé. Le premier mode est directif, ce qui se traduit par une contribution en entrée et en sortie de bande d'arrêt.
- [0093] La [Fig.8] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie d'un dispositif à ondes élastiques 131 selon une deuxième variante du premier mode de réalisation de l'invention. La [Fig.8] montre les premiers domaines 3a1 à 3a4, pour les domaines 3a1 et 3a4 seulement la moitié du domaine respectif est illustrée, et les seconds domaines 3b1 à 3b3 de polarisation opposée entre les domaines 3a1 à 3a4. Une dent 133a1 et 133b1 est représentée pour chaque électrode en peigne 15a et 15b. La [Fig.8] représente également la couche diélectrique 7 et le substrat de base 9.
- [0094] Les dents 133a1 et 133b1 sont positionnées, de façon centrale, sur les interfaces 135a et 135b entre les domaines de polarisations opposées 3b1 et 3a2 et 3a3 et 3b3 respec-

tivement. Ainsi les dents 133a1 et 133b1 sont positionnées de façon symétrique par rapport aux interfaces 135a et 135b respectivement dans la direction périodique d comme pour la première variante.

- [0095] La seule différence entre la variante de la [Fig.8] et de la variante de la [Fig.6] est que les dents 133a1 et 133b1 sont plus large que dans le dispositif 111 de la première variante dans la direction d . En effet, chacune des dents 133a1 et 133b1 couvre entièrement deux domaines, au moins dans la direction d .
- [0096] La [Fig.9] illustre les résultats de la simulation de la conductance harmonique G en dB sur l'axe gauche et de l'admittance harmonique Y en dB sur l'axe de droite en fonction de la fréquence en MHz pour l'orientation $(YX)/42^\circ$ et $(YX)/222^\circ$.
- [0097] On y voit en particulier pour le premier mode 141 en admittance harmonique Y et 143 en conductance harmonique G vers 1,35 GHz le fait que l'élargissement des dents permet de supprimer l'effet de directivité mis en évidence dans le cas précédent de la [Fig.7] et permet de comprendre que lorsque les dents ne recouvrent pas complètement les deux domaines adjacents, les conditions aux limites en entrée et en sortie de bande d'arrêt peuvent effectivement être satisfaites, ce qui n'est pas le cas dans le cas présent. La vitesse du mode se trouve naturellement réduite par augmentation de la charge massique à une valeur d'environ 8.2 km.s^{-1} mais le couplage électromécanique augmente et atteint 5 %. Le second mode 145 en admittance et 147 en conductance ne voit pas ses propriétés notablement évoluer, son couplage et ses coefficients de qualité sont identiques aux valeurs de la variante précédente.
- [0098] La [Fig.10] est un schéma présentant une vue en coupe d'une partie d'un dispositif à ondes élastiques 61 selon un deuxième mode de réalisation de l'invention. Le dispositif à ondes élastiques 61 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 63a1 et 63b1 des électrodes en peignes interdigités sont entièrement positionnées au-dessus d'un domaine et non plus à cheval entre deux domaines comme dans le premier mode de réalisation. Dans ce mode de réalisation, chaque dent 63a1 et 63b1 des deux électrodes en peigne 15a et 15b, est positionnée sur le même type de domaine, ici les deuxièmes domaines 3b1 et 3b2. Comme illustré sur la [Fig.10], les deux deuxièmes domaines 3b1 et 3b2 sont chacun arrangés entre deux premiers domaines 3a1 et 3a2, et 3a2 et 3a3 respectivement. Pour chaque électrode en peigne 15a et 15b une dent 63a1 et 63b1 est représentée. Les dents 63a1 et 63b1 ont la même largeur a , de préférence la même largeur que les domaines 3b1 et 3b2. Selon des réalisations alternatives, la largeur a des dents peut être inférieure à la largeur des domaines. Dans ce cas les dents sont de préférence centrées au milieu d'un domaine. La [Fig.10] 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].

- [0099] Un mode de vibration est illustré en bas de la [Fig.10]. Ce mode de vibration a été obtenu par la simulation telle que décrite ci-dessus pour le premier mode, mais pour une cellule du dispositif 61 avec une largeur d'un domaine de $1\ \mu\text{m}$ et une orientation LiTaO_3 (YX)/ 50° et (YX)/ 230° . La largeur de la cellule est ainsi de $4\ \mu\text{m}$. Les résultats observés ne dépendent pas ou que peu de l'orientation cristalline du substrat de base 5.
- [0100] La [Fig.11] illustre 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 (YX)/ 50° et (YX)/ 230° .
- [0101] Le numéro 71 dans l'admittance harmonique Y indique le mode d'ordre 1 à 1 GHz avec une longueur d'onde λ égale à deux fois le pas mécanique p_e des électrodes. Le mode d'ordre 1 est essentiellement visible seulement dans l'admittance harmonique Y . Il s'agit du mode de cisaillement fondamental se propageant à une vitesse de phase de $4170\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et présentant un couplage de 5 %, sans pertes par rayonnement dans le substrat. La structure permet d'exciter l'harmonique 3 du mode visible dans l'admittance harmonique Y indiqué par 73 et la conductance harmonique G indiqué par 75. Ce mode se trouve vers 3 GHz. Excité au-delà de la limite de guidage de la structure, donc après la fréquence des ondes SSBW, cette contribution est affectée par des pertes de rayonnement et le coefficient de qualité de la résonance reste inférieur à 500 de ce fait. Néanmoins, son couplage électromécanique atteint les 3,7 %, ce qui est notablement plus élevé que dans le cas général d'une contribution harmonique d'ordre 3 dont on constate généralement un abaissement du couplage d'un ordre de grandeur par rapport au mode fondamental. Ce phénomène est dû à la structure périodique ferro-électrique qui favorise des conditions de synchronisme différentes de celle d'une couche polarisée de façon homogène.
- [0102] La [Fig.12] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie d'un dispositif à ondes élastiques 81 selon un troisième mode de réalisation de l'invention. Le dispositif à ondes élastiques 81 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 83a1 et 83b1 des électrodes en peignes interdigités sont entièrement positionnées au-dessus d'un domaine et non plus à cheval entre deux domaines comme dans le premier mode de réalisation. Dans ce mode de réalisation les dents 83a1 et 83b1 des deux électrodes en peigne 15a et 15b respectivement sont positionnées sur des domaines de polarisations différentes. La dent 83a1 de la première électrode 15a est positionnée sur le deuxième domaine 3b1 pendant que la dent 83b1 est positionnée sur le premier domaine 3a3. Comme illustré sur la [Fig.12], chacun des trois deuxièmes domaines 3b1 à 3b3 illustrés est arrangé entre deux premiers domaines 3a1 à 3a3 respectivement. Une dent 83a1 et 83b1 est représentée pour chaque électrode en

peigne 15a et 15b. Les dents 83a1 et 83b1 ont la même largeur a , de préférence la même largeur que les domaines 3a1 et 3b3. Selon des réalisations alternatives, la largeur a des dents peut être inférieure à la largeur des domaines. Dans ce cas les dents sont de préférence centrées au milieu d'un domaine. La [Fig.12] 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].

[0103] Un mode de vibration est illustré en bas de la [Fig.12]. 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 81 avec une largeur d'un domaine de $1\ \mu\text{m}$ et une orientation LiTaO_3 (YX)/ 42° et (YX)/ 222° et un substrat de base en Si(111). Le pas mécanique p_e est ainsi de $3\ \mu\text{m}$, la cellule pour la simulation a une largeur de $6\ \mu\text{m}$. Les vibrations du mode ont une longueur d'onde λ égale à un demi pas mécanique p_e des électrodes.

[0104] La [Fig.13] illustre 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 (YX)/ 42° et (YX)/ 222° . Deux modes de vibration sont visibles.

[0105] Un mode apparaît vers 1,35 GHz, visible dans l'admittance harmonique Y , voir numéro 91, et la conductance harmonique G , voir numéro 93. Un deuxième mode vibratoire apparaît vers 2,7 GHz dans l'admittance harmonique Y indiqué par 95 et la conductance harmonique G indiqué par 97. Les simulations montrent que pour les deux modes observés, le mouvement des électrodes est toujours en phase. Les vitesses de phase équivalentes sont de 8,24 et 15,73 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivement, associés à des couplages électromécaniques de 6,4 % et 4,4 %. Les coefficients de qualité de la résonance et de l'anti-résonance du premier mode sont supérieurs à 2.000 alors que ceux de la contribution proche de 2,7 GHz restent inférieurs à 100 par défaut de guidage.

[0106] La [Fig.14] est un schéma illustrant schématiquement une vue en coupe d'une partie d'un dispositif à ondes élastiques 101 selon un quatrième mode de réalisation de l'invention. Le dispositif à ondes élastiques 101 a la même structure et utilise les mêmes matériaux que le dispositif à ondes élastiques 1 du premier mode de réalisation, sauf que la dent 103b1 de l'électrode en peigne 15b est entièrement positionnée au-dessus du domaine 3a2 pendant que la dent 103b2 de l'électrode en peigne 15b est entièrement positionnée au-dessus du domaine 3b3 de polarisation opposée. Entre les deux dents 103b1 et 103b2 se trouve la dent 103a2 à cheval entre les deux domaines 3b2 et 3a3 comme dans le premier mode de réalisation. La dent 103a1 se trouve à cheval entre les deux domaines 3a1 et 3b1 comme dans le premier mode de réalisation

[0107] Comme illustré sur la [Fig.14], les premiers domaines 3a1 à 3a4 alternent avec les deuxièmes domaines 3b1 à 3b3 respectivement pour créer la cellule. Pour chaque

électrode en peigne 15a et 15b, deux dents 103a1, 103a2 et 103b1, 103b2 sont représentées. Les dents ont la même largeur a , de préférence la même largeur que les domaines. Selon des réalisations alternatives, la largeur a des dents peut être inférieure à la largeur des domaines. Dans ce cas les dents sont de préférence centrées par rapport aux interfaces 105a et 105b ou au milieu d'un domaine selon l'électrode. La [Fig.14] 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].

- [0108] La [Fig.15] est un graphique illustrant la conductance harmonique G et l'admittance harmonique Y pour deux réalisations d'un dispositif à ondes élastiques selon le quatrième 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.
- [0109] La simulation a été réalisée telle que décrite ci-dessus pour le premier mode de réalisation, mais pour une cellule du dispositif 101 avec une largeur d'un domaine de $1\ \mu\text{m}$ et une orientation LiTaO_3 (YX)/ 42° et (YX)/ 222° et un substrat de base en Si(111). Le pas mécanique p_e est ainsi de $1,5\ \mu\text{m}$, la cellule pour la simulation a une largeur de $6\ \mu\text{m}$. Les résultats observés ne dépendent pas ou que peu de l'orientation cristalline du substrat de base 5.
- [0110] La [Fig.15] 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 (YX)/ 42° et (YX)/ 222° . Ces résultats ont été obtenus pour un potentiel $+V/-V$ alternant appliqué aux dents 103a1, 103b1, 103a2 et 103b2 tel qu'illustré au-dessus de ce premier graphique de la [Fig.15]. Plusieurs modes apparaissent dans l'admittance et la conductance. Notamment dans l'admittance harmonique Y avec le numéro 105₁ vers 800 MHz, avec le numéro 105₂ vers 2 GHz et avec le numéro 105₃ vers 3,3 GHz.
- [0111] La [Fig.15] illustre dans un deuxième graphique, positionné 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 (YX)/ 42° et (YX)/ 222° . Ces résultats ont été obtenus pour un potentiel $+V$ appliqué aux dents 103a1 et 103a2' et une potentiel $-V$ appliqué aux dents 103b1 et 103b2' tel qu'illustré au-dessus de ce deuxième graphique de la [Fig.15]. Plusieurs modes apparaissent dans l'admittance et la conductance mais à des fréquences différentes par rapport à la réalisation précédente. Notamment dans l'admittance harmonique Y avec le numéro 107₁ vers 1,3 GHz, avec le numéro 107₂ vers 2,7 GHz et avec le numéro 107₃ proche de 4 GHz. Ici c'est notamment le mode 107₃ qui se distingue par une pureté spectrale supérieure au mode 105₃. Le mode 107₁, par contre,

est doublé.

- [0112] 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.
- [0113] Dans cette deuxième réalisation, un autre type de paire d'électrodes interdigitées est utilisé, qui est illustré schématiquement dans la [Fig.16]. 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'.
- [0114] 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 montré sur la [Fig.17].
- [0115] La [Fig.17] 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.15] par un seul dispositif. La commutation est de préférence contrôlée telle qu'un court-circuit entre électrodes est évité. La [Fig.17] 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.17] deux dents successives donc 159a et 159b et 159c et 159d ont le même potentiel.
- [0116] 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.
- [0117] La [Fig.18] 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 201 pendant laquelle un matériau piézoélectrique, en particulier un matériau ferroélectrique, est fourni.

- [0118] 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), (110) ou (111) ou du quartz. Les orientations des deux cristaux de la structure, visualisées par les méplats des plaquettes utilisées, peuvent être désalignées ou non
- [0119] 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.
- [0120] 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 $(\text{YX})/\theta$ avec la valeur de l'angle θ choisie entre -30° et 120° , de préférence entre 0° et 70° . L'orientation cristalline du second sens 13b des seconds domaines 3bi de la couche 3 est alors $(\text{YX})/\theta + 180^\circ$ selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949. Il est également envisageable d'avoir les domaines dans le plan orthogonal $(\text{YX}/t)/\theta/90^\circ$ et $(\text{YX}/t)/\theta + 180^\circ/90^\circ$ par rapport à celle décrite ci-dessus en gardant les dents de peignes parallèles aux domaines.
- [0121] 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 $(\text{YX})/\theta$ avec la valeur de l'angle θ choisie dans une plage de -30° à $+120^\circ$ et de préférence de 0 à 70° . L'orientation cristalline du second sens 13b des seconds domaines 3bi de la couche 3 est alors $(\text{YX})/\theta + 180^\circ$ selon la norme IEEE Std-176 version IRE 1949.
- [0122] 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.
- [0123] 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 poly-

cristallin 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.

- [0124] 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 μm ou moins, peut être transférée sur le substrat de base.
- [0125] Ensuite lors de l'étape 203, 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. Dans ce mode de réalisation, le champ électrique est appliqué en forme de bandes parallèles, perpendiculaires à la surface du matériau piézoélectrique. 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 congruents.
- [0126] 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 LiNbO_3 and $\text{Ti} : \text{LiNbO}_3$ » *Journal of Applied Physics*, 88:6665–6668, 2000, ou M. Yamada et K. Kishima : « Fabrication of periodically reversed domain structure for SHG in LiNbO_3 by direct electron beam lithography at room temperature », *Electronics Letters*, 27:828–829, 1991.
- [0127] Pour simplifier la création des domaines lors de l'application du champ électrique, il peut être avantageux de fournir une couche métallique sur la surface du matériau piézoélectrique 3 opposé à la surface sur laquelle la paire d'électrodes en peignes interdigités va être réalisée lors de l'étape suivante. Cette couche peut être réalisée, soit sur la couche diélectrique 7 avant attachement, soit sur la surface du substrat donneur sur laquelle l'attachement va être réalisé. En présence d'une couche métallique, le champ électrique appliqué peut être plus proche de 22 $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ et la température voisine des conditions ambiantes (soit proche de 25°C). En absence de la couche métallique, il faut appliquer un champ électrique plus fort, de l'ordre de deux fois ou plus que le champ coercitif. De préférence, on réalise cette étape à une température d'au moins 150 °C, voir d'au moins 170 °C en cas d'absence de la couche métallique, ce qui permet d'abaisser la valeur du champ pour obtenir l'effet de polarisation forcée.
- [0128] Ensuite lors de l'étape 205, la paire d'électrodes en peignes interdigités est réalisée sur le matériau piézoélectrique pour obtenir le dispositif à ondes élastiques selon le premier mode de réalisation en utilisant des étapes de lithographie, de gravure et de

dépôt, connues de l'homme de l'art.

[0129] Le procédé de l'étape 205 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.

[0130] Dans le cas du troisième mode de réalisation, les étapes 203 et 205 peuvent être interchangées. Dans ce cas on peut utiliser les dents 83a1 et 83b1 pour former les domaines en appliquant le même potentiel aux deux électrodes.

Revendications

- [Revendication 1] Dispositif à ondes élastiques comprenant un matériau piézoélectrique (3), en particulier un matériau ferroélectrique avec des premiers domaines (3a) d'un premier sens de polarisation (13a) et des deuxièmes domaines (3b) avec un second sens de polarisation (13b), le premier sens (13a) étant opposé au second sens, 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) au-dessus du, en particulier sur le, matériau piézoélectrique dont les dents de peigne (63a1 63b1, 83a1 83b1) respectives s'étendent essentiellement perpendiculaires à la direction périodique (d) et à la normale (n) et dont chacune des dents de peigne (63a1, 63b1, 83a1, 83b1) est entièrement positionnée au-dessus d'un seul des premiers domaines (3a) ou deuxièmes domaines (3b).
- [Revendication 2] Dispositif à ondes élastiques selon la revendication 1, dans lequel les dents de peigne de la paire d'électrodes en peigne interdigitées (15a, 15b) sont agencées de manière périodique.
- [Revendication 3] Dispositif à ondes élastiques selon la revendication 1 ou 2, dont les dents de peigne directement voisines (63a1, 63b1) des électrodes (15a, 15b) sont positionnées au-dessus de domaines avec le même sens de polarisation (3b1, 3b2), en particulier des domaines avec le même sens de polarisation seulement séparés par un domaine (3a2) avec le sens de polarisation opposée.
- [Revendication 4] Dispositif à ondes élastiques selon la revendication 1 ou 2, dont les dents de peigne (83b1) d'une des deux électrodes en peigne sont positionnées au-dessus des premiers domaines (3a3) et les dents de peigne (83a1) de la seconde électrode en peigne sont positionnées au-dessus des deuxièmes domaines (3b1).
- [Revendication 5] Dispositif à ondes élastiques selon une des revendications 1 à 4, dans lequel la largeur (a) des dents de peigne (63a1, 63b1, 83a1, 83b1) des électrodes en peigne interdigitées est la même que la largeur des domaines, et/ou d'au moins 280 nm, de préférence d'au moins 350 nm.
- [Revendication 6] Dispositif à ondes élastiques selon une des revendications 1 à 5 pour

lequel il y a au moins un domaine entier dépourvu de doigts d'électrode entre deux domaines sur lesquels sont positionnées deux dents au moins partiellement.

- [Revendication 7] Dispositif à ondes élastiques selon la revendication 1 à 6, 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 .
- [Revendication 8] Dispositif à ondes élastiques selon la revendication 7, 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 .
- [Revendication 9] Dispositif à ondes élastiques selon l'une des revendications 7 ou 8, 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 μm .
- [Revendication 10] Dispositif à ondes élastiques selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel une couche métallique est agencée sur la surface du matériau piézoélectrique (3) opposé de la paire d'électrodes en peigne interdigitées (15a, 15b), en particulier entre la couche (5) de matériau piézoélectrique (3) et le substrat de base (9).
- [Revendication 11] Dispositif à ondes élastiques selon l'une des revendications 1 à 10, le matériau piézoélectrique (3) est au moins un parmi du LiTaO_3 , du LiNbO_3 , du KNbO_3 , du PZT, du PMnPt, de PbTiO_3 ou de AlScN.
- [Revendication 12] Dispositif à ondes élastiques selon une des revendications 1 à 11, 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

premier 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 deuxième 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.

- [Revendication 13] Dispositif à ondes élastiques selon une des revendications 1 à 12, comprenant un moyen d'alimentation (21) configuré pour fournir un signal radio-fréquence d'une fréquence d'au moins 2 GHz aux électrodes en peigne interdigitées (15a, 15b).
- [Revendication 14] Utilisation d'un dispositif à ondes élastiques selon la revendication 13, dans un dispositif acousto-électrique, en particulier un filtre, un capteur ou une ligne à retard, ayant des fréquences de fonctionnement de 2 GHz et plus.
- [Revendication 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 ferro-électrique,
 - 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 deuxième domaines alternant de manière périodique et ayant des polarisations opposées, et
 - réaliser la paire d'électrodes en peignes interdigités au-dessus, en particulier directement sur, le matériau piézoélectrique.
- [Revendication 16] Procédé de fabrication d'un dispositif à ondes élastiques selon la revendication 3 et comprenant les étapes suivantes :
- fournir un matériau piézoélectrique, en particulier un matériau ferro-électrique,
 - réaliser la paire d'électrodes en peignes interdigités au-dessus, en particulier directement sur, le matériau piézoélectrique,
 - appliquer un champ électrique plus fort, en particulier au moins dix fois plus fort, que le champ coercitif du matériau piézoélectrique en utilisant la paire d'électrodes en peignes interdigités pour réaliser les premiers et deuxième domaines alternant de manière périodique et ayant des polarisations opposées.

[Fig. 1]

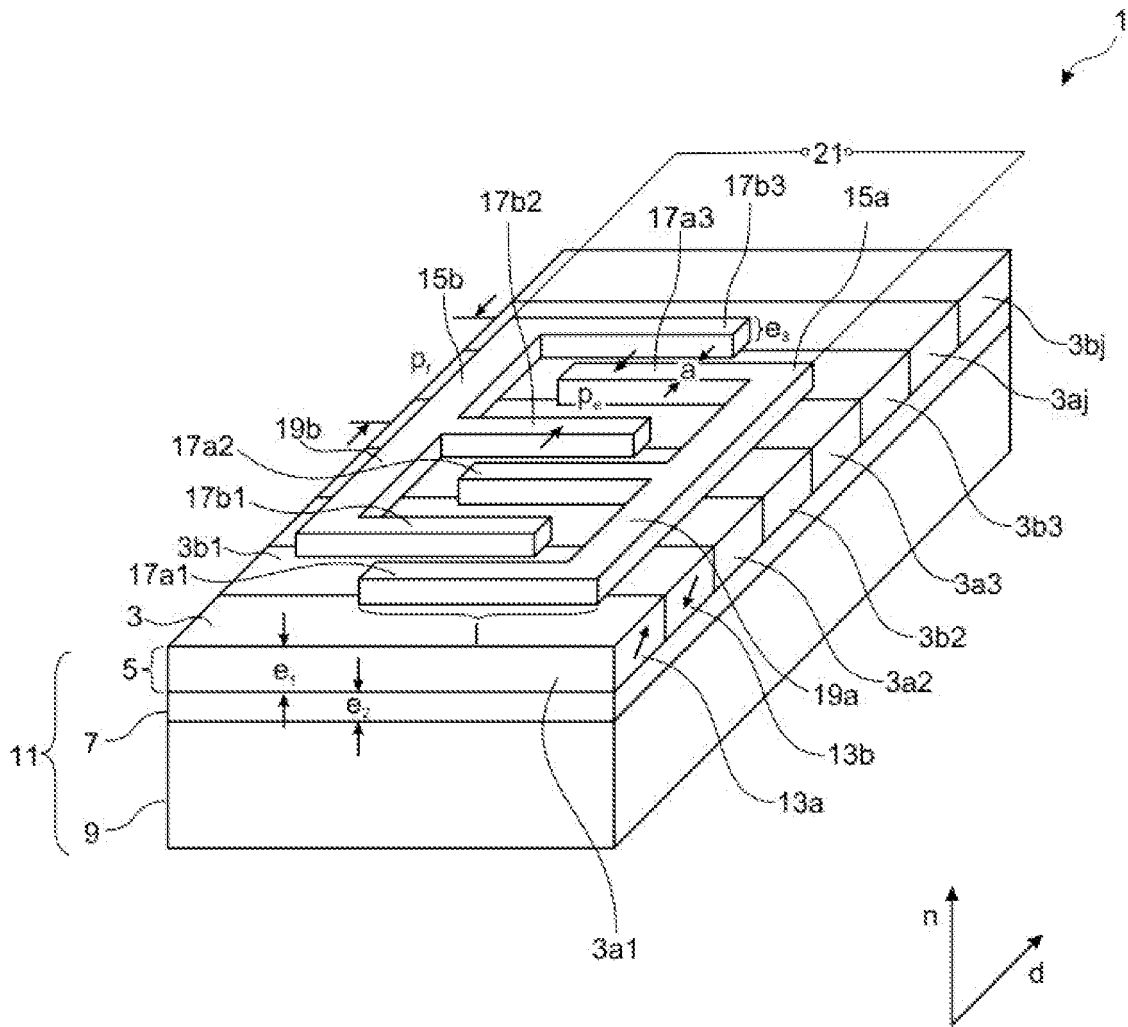


FIG. 1

[Fig. 2]

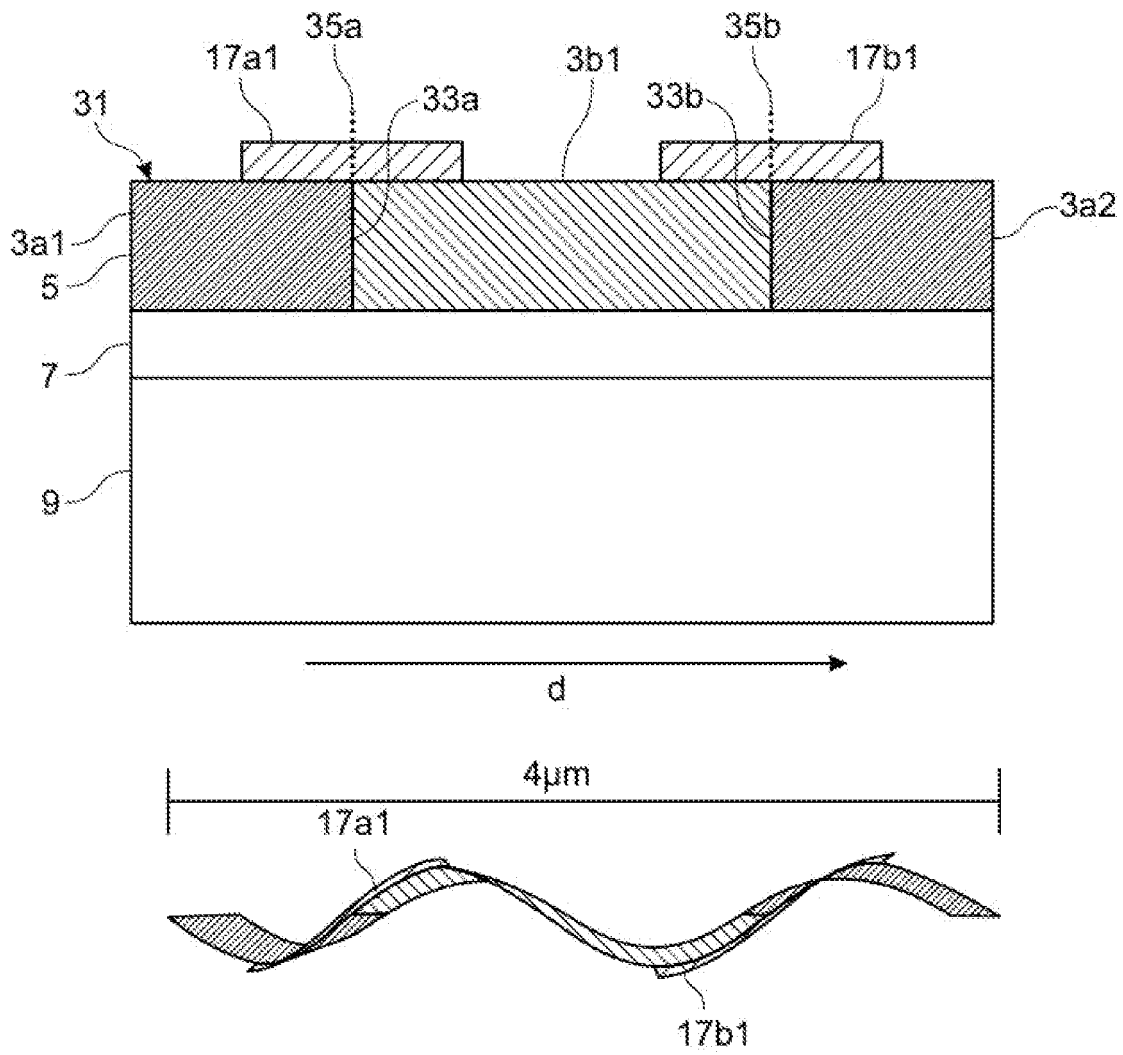


FIG. 2

[Fig. 3]

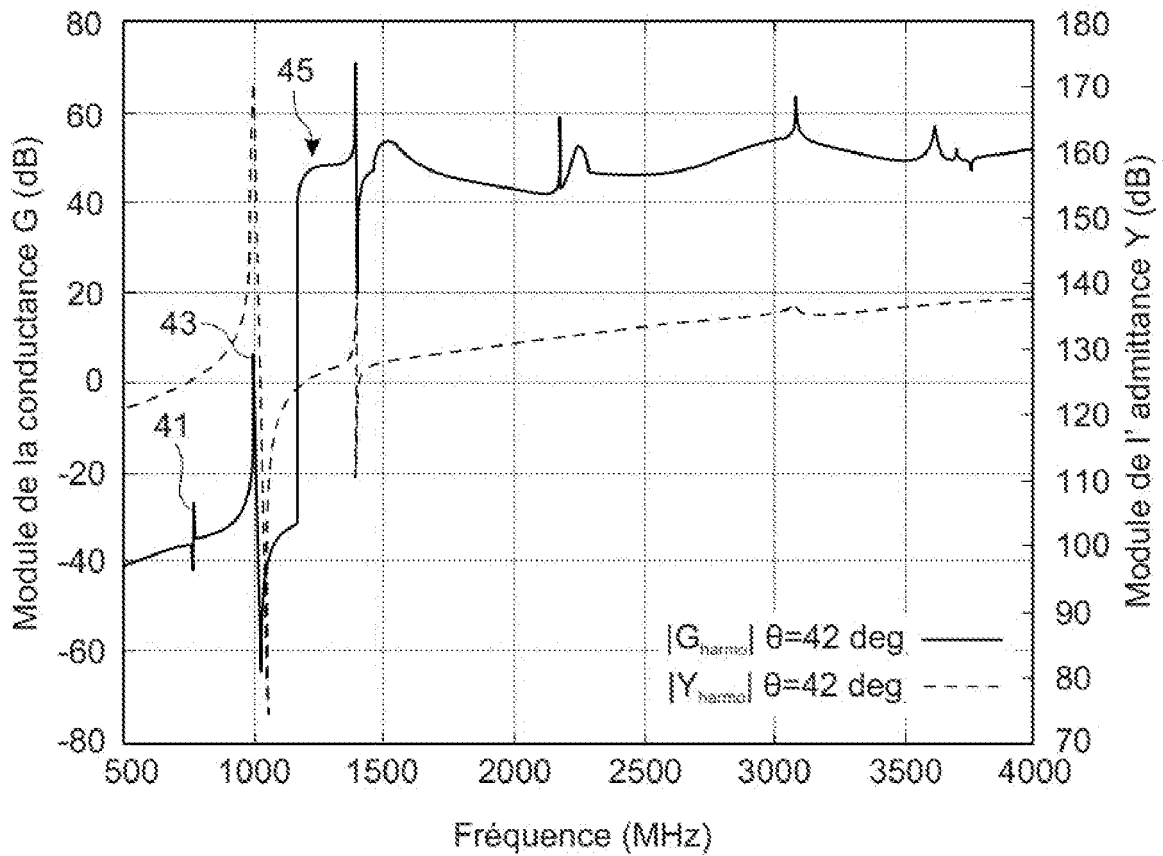


FIG. 3

[Fig. 4]

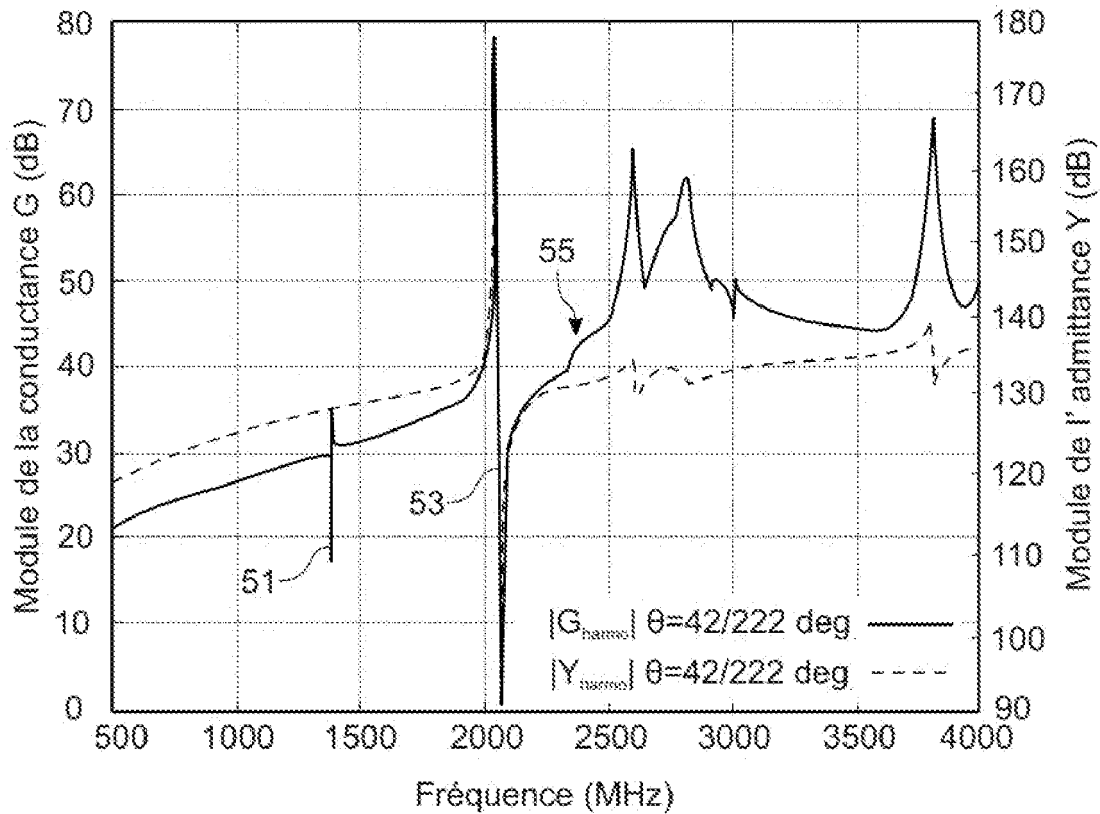


FIG. 4

[Fig. 5]

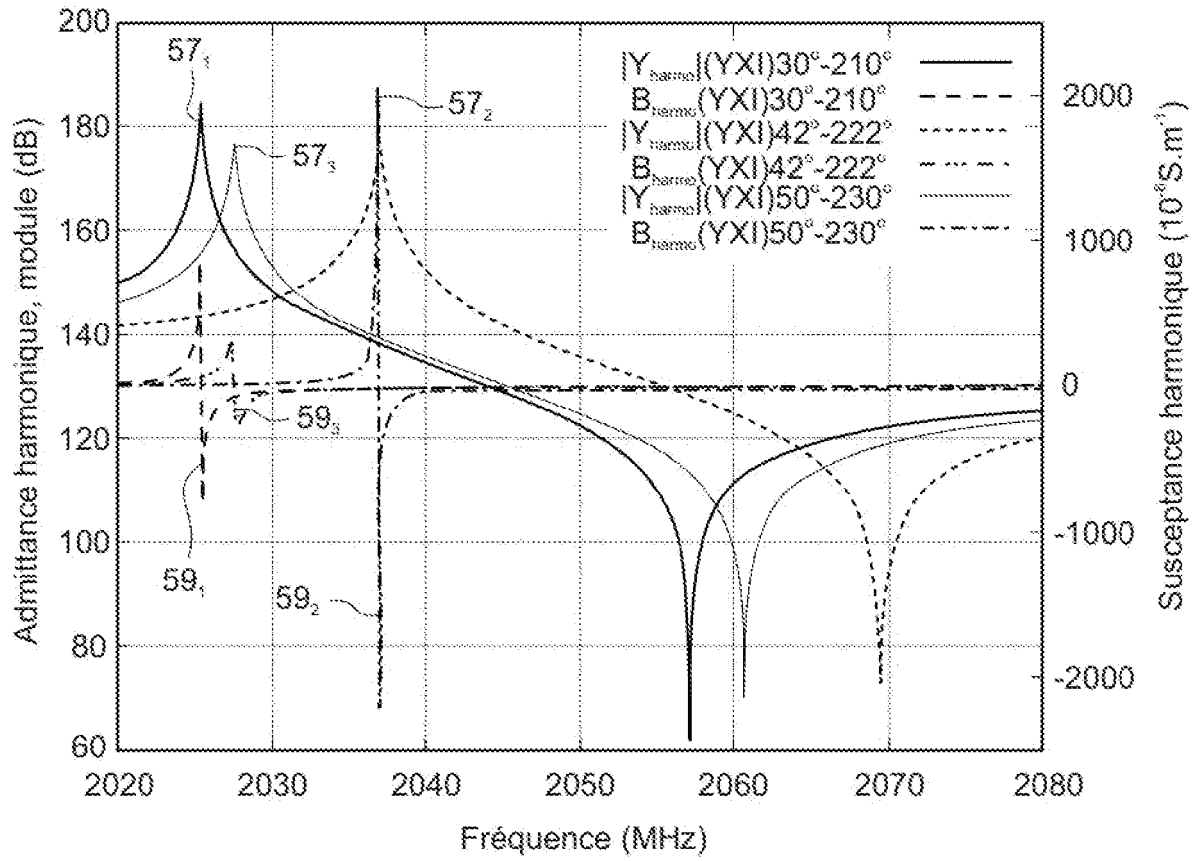


FIG. 5

[Fig. 6]

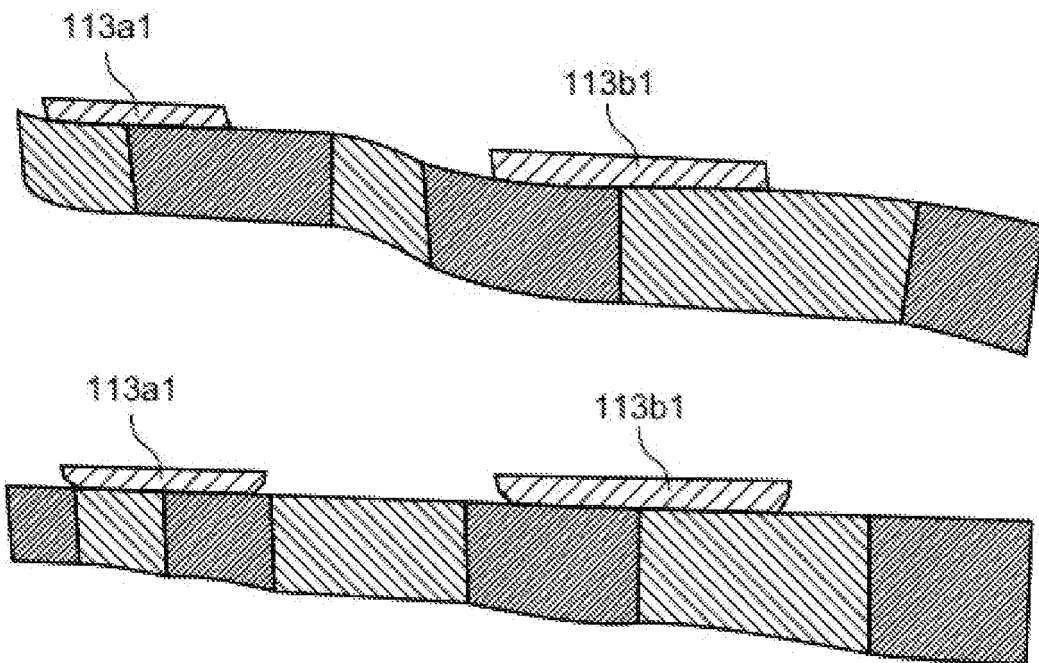
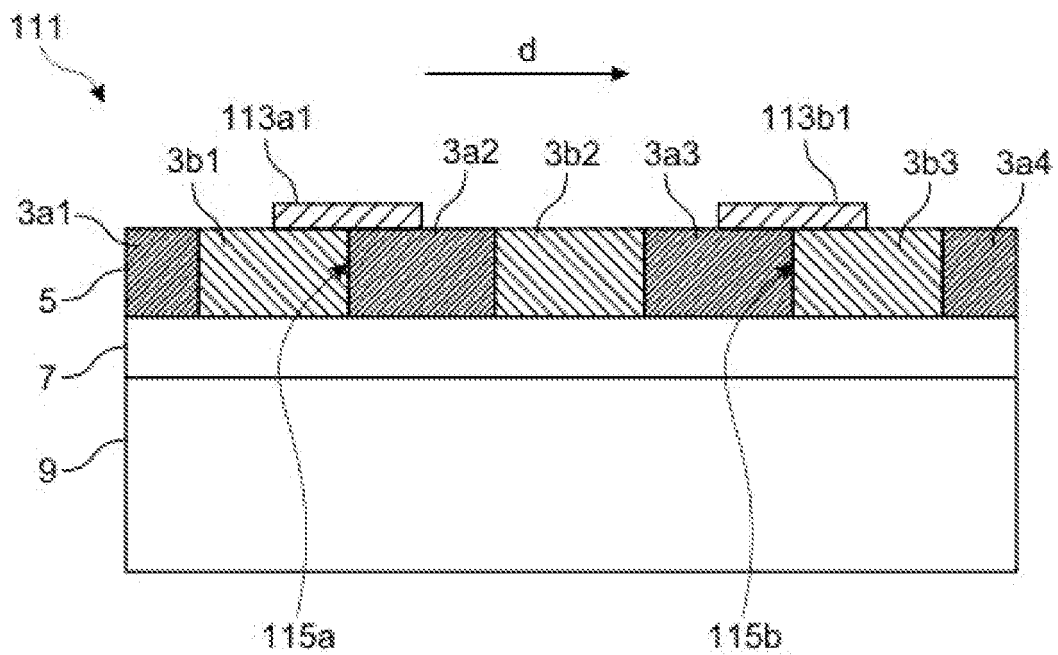


FIG. 6

[Fig. 7]

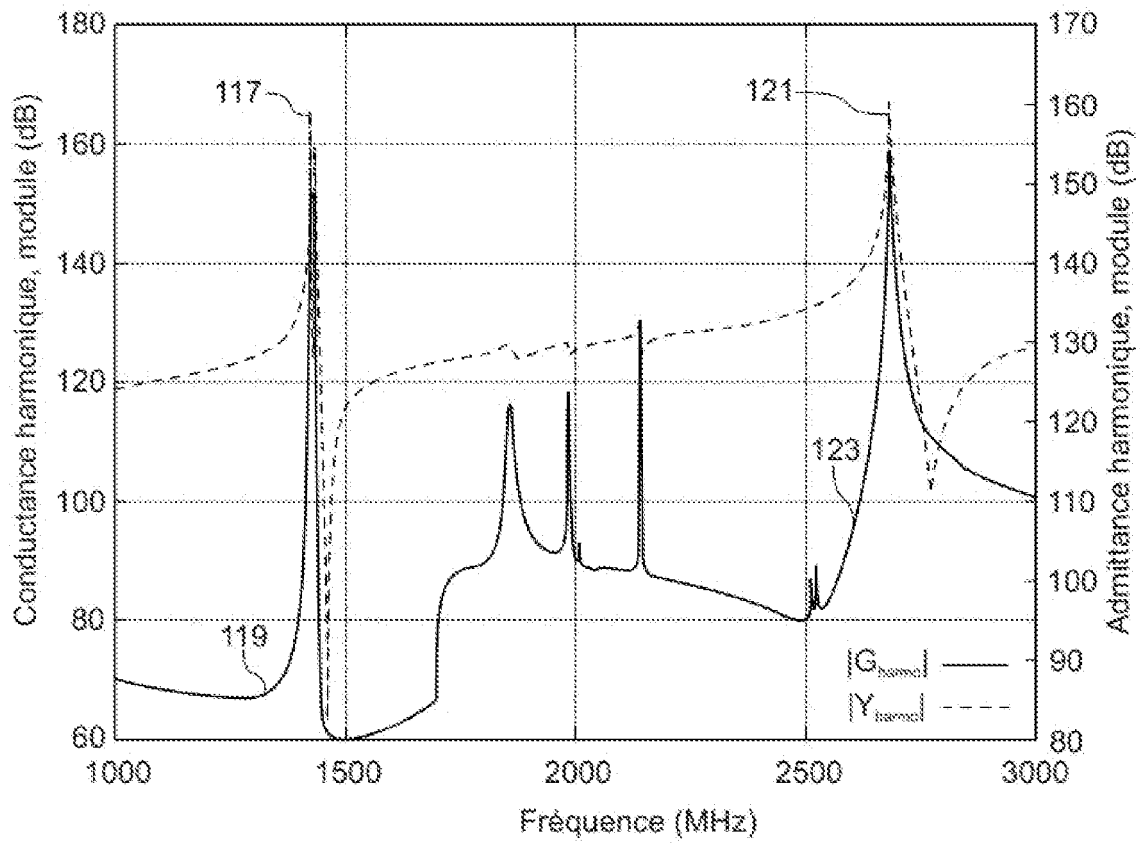


FIG. 7

[Fig. 8]

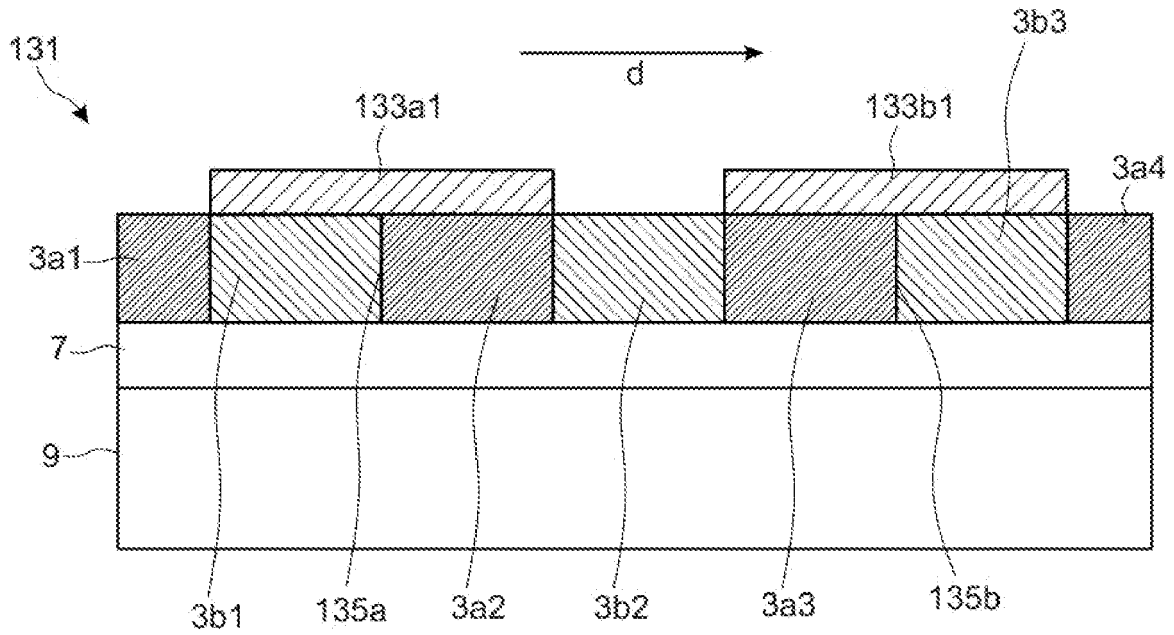


FIG. 8

[Fig. 9]

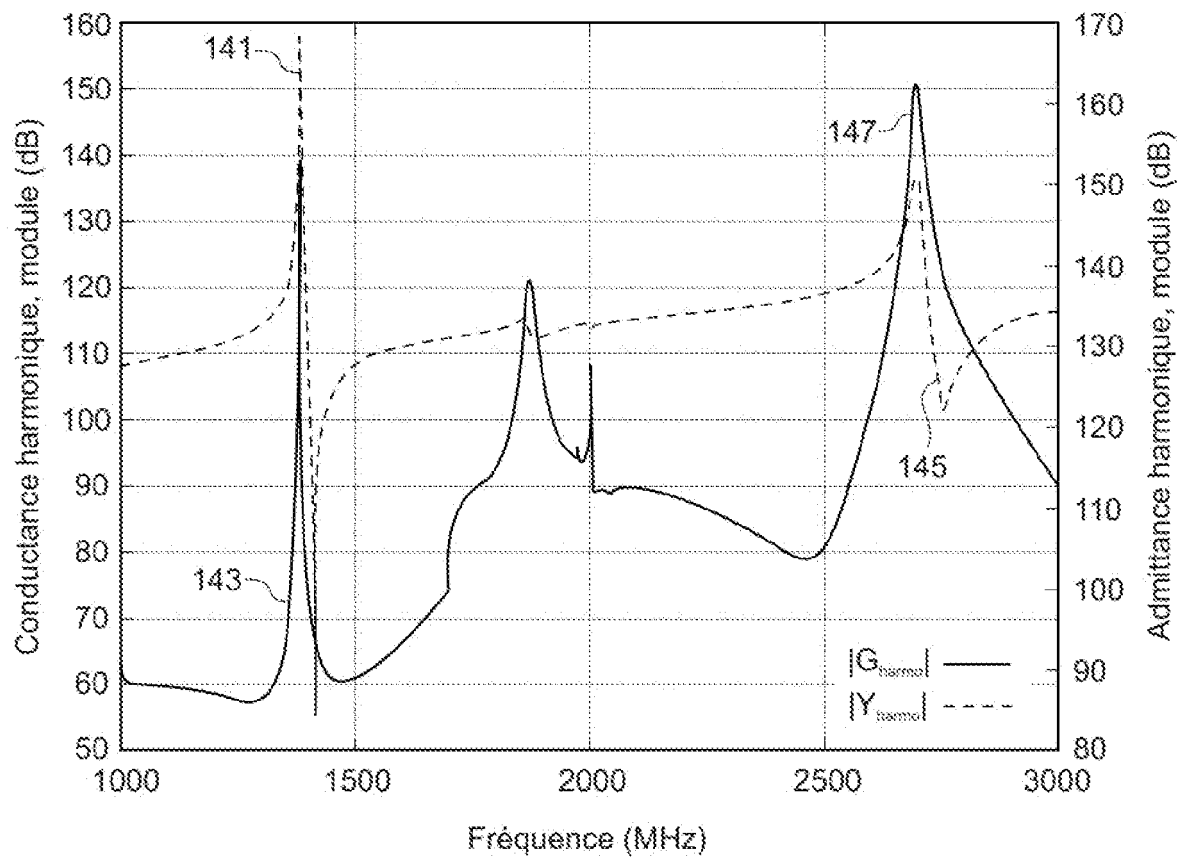


FIG. 9

[Fig. 10]

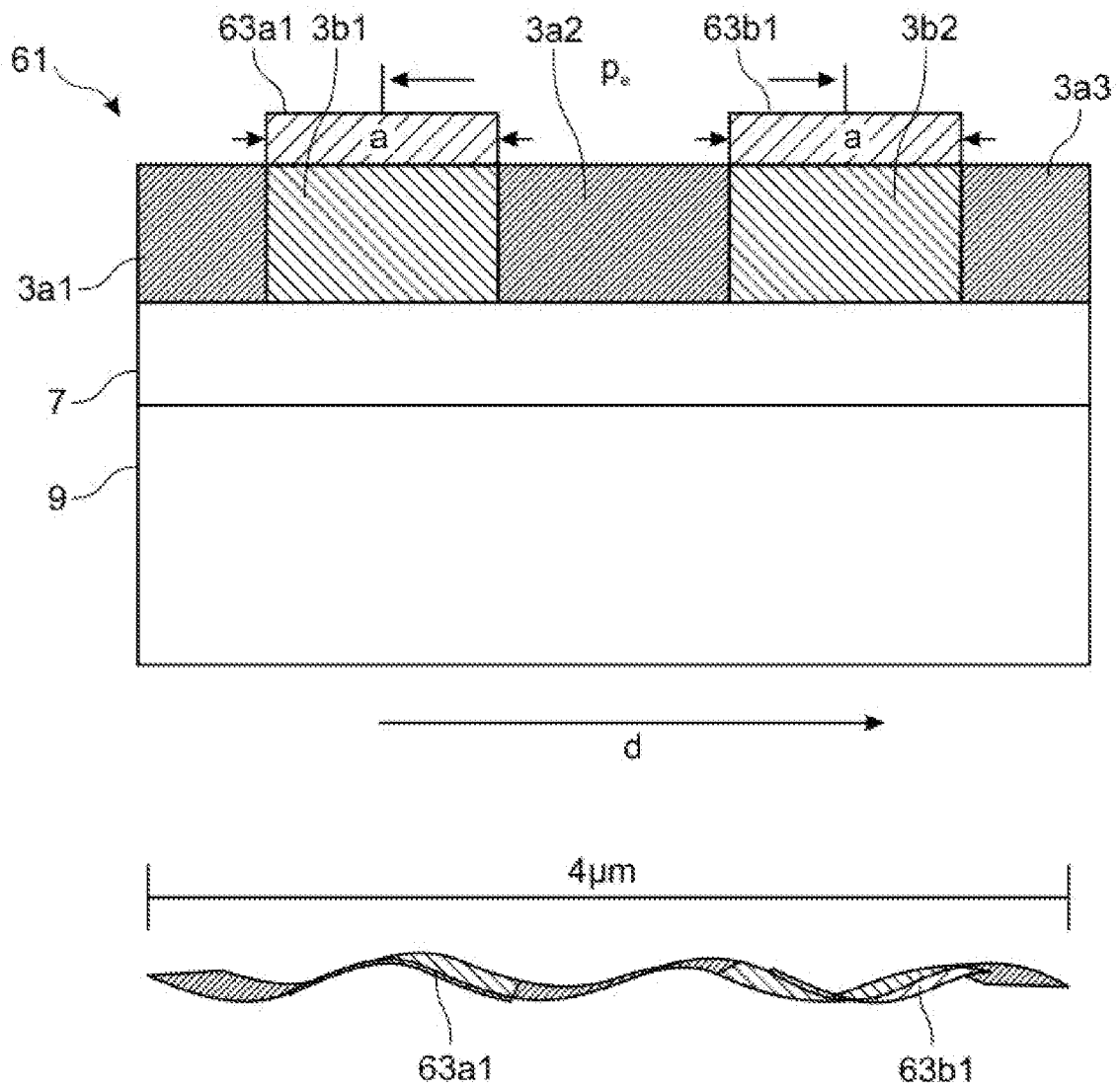


FIG. 10

[Fig. 11]

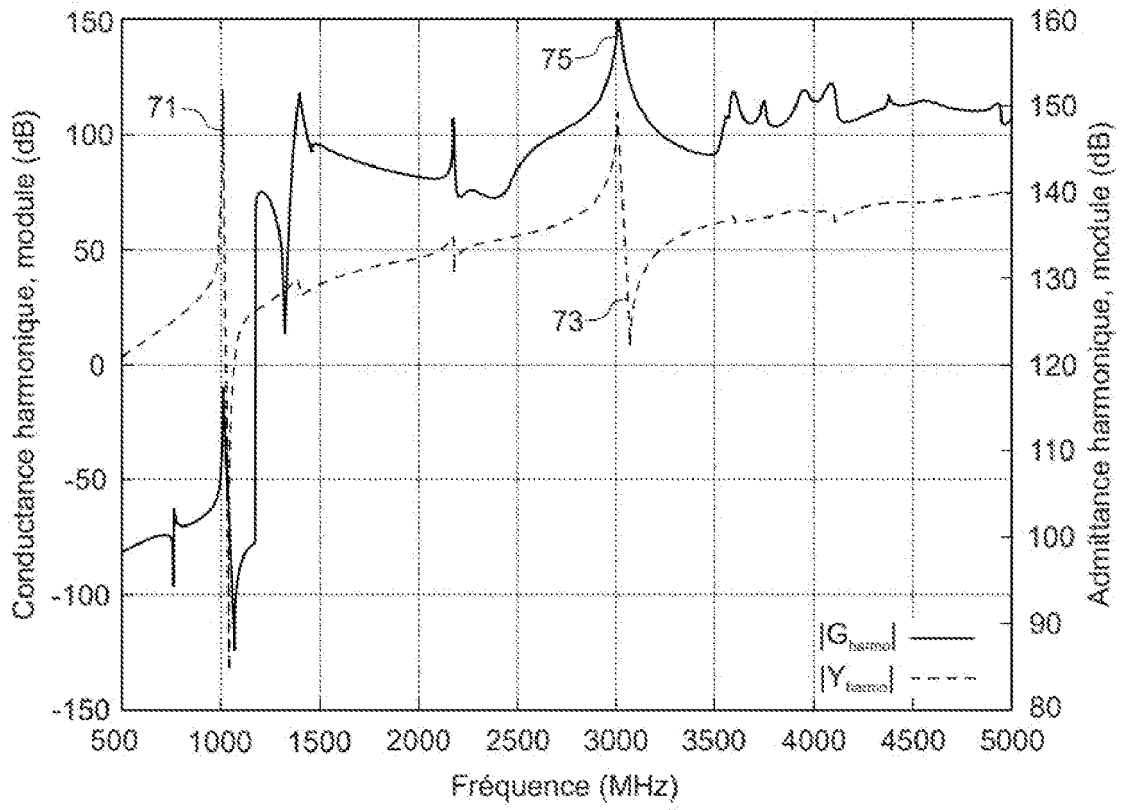


FIG. 11

[Fig. 12]

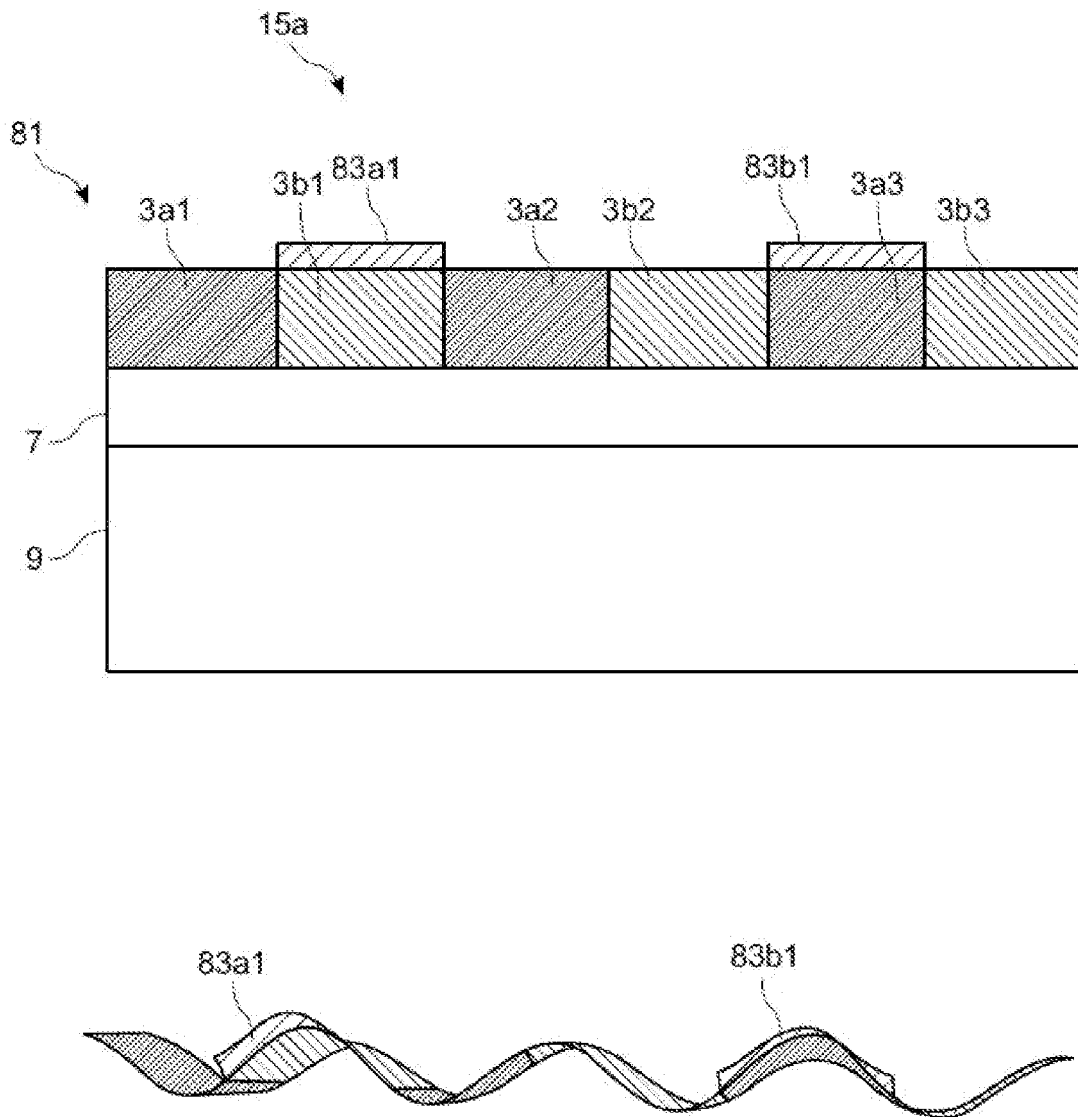


FIG. 12

[Fig. 13]

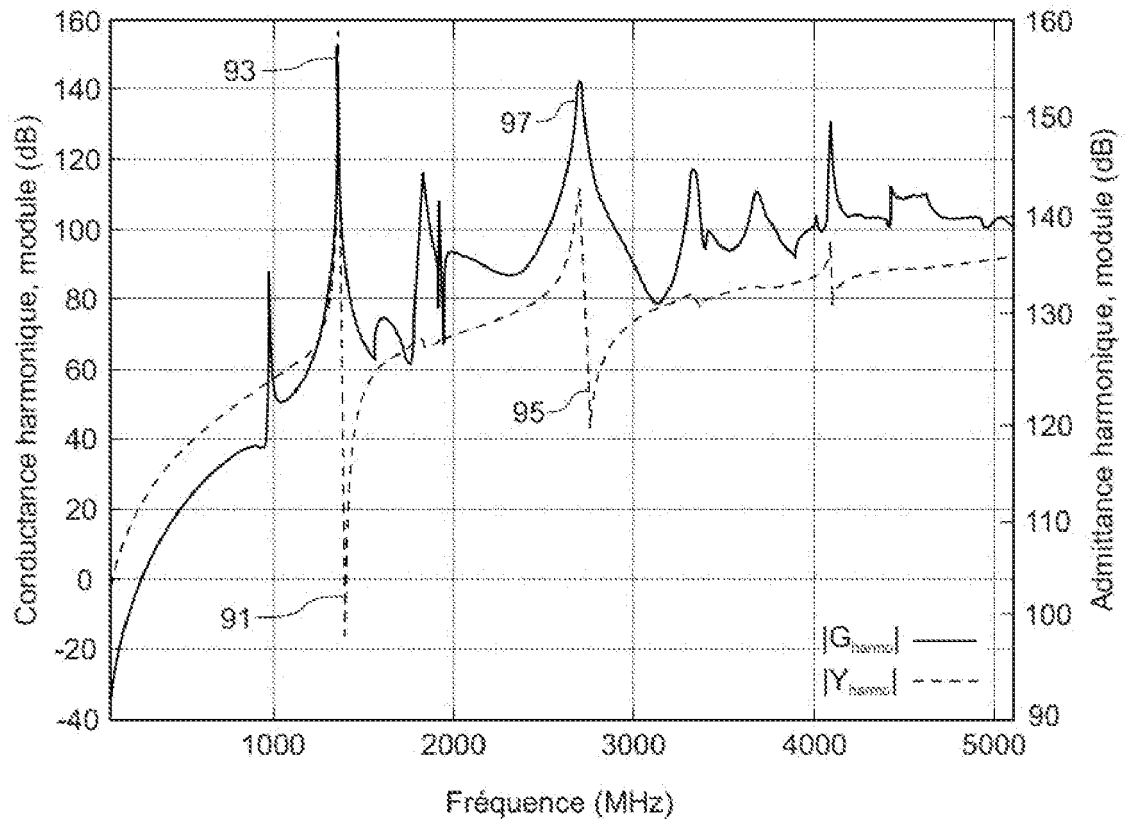


FIG. 13

[Fig. 14]

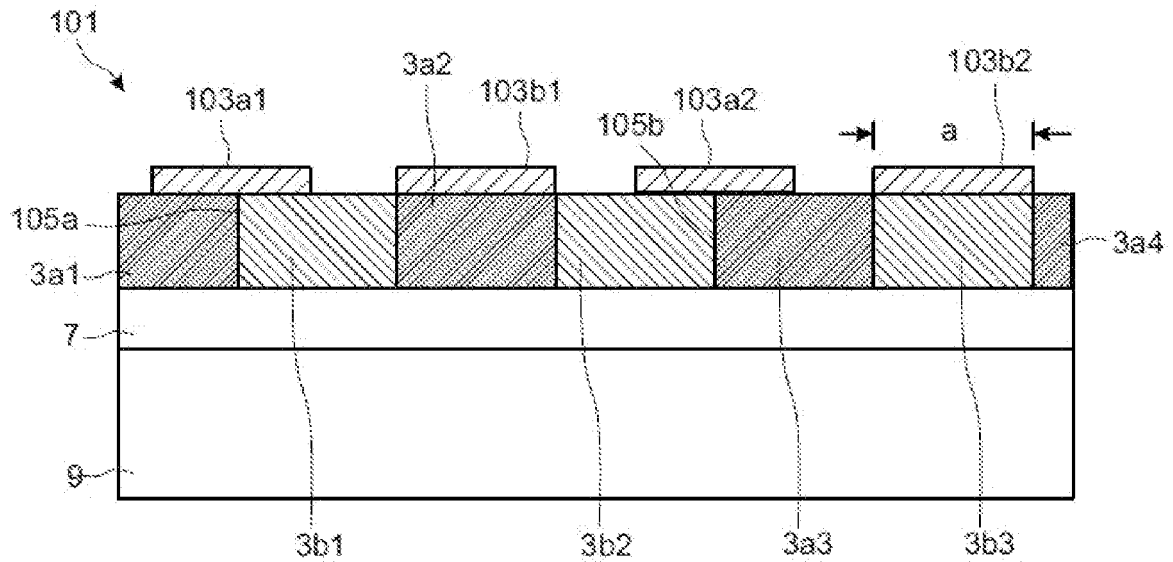


FIG. 14

[Fig. 15]

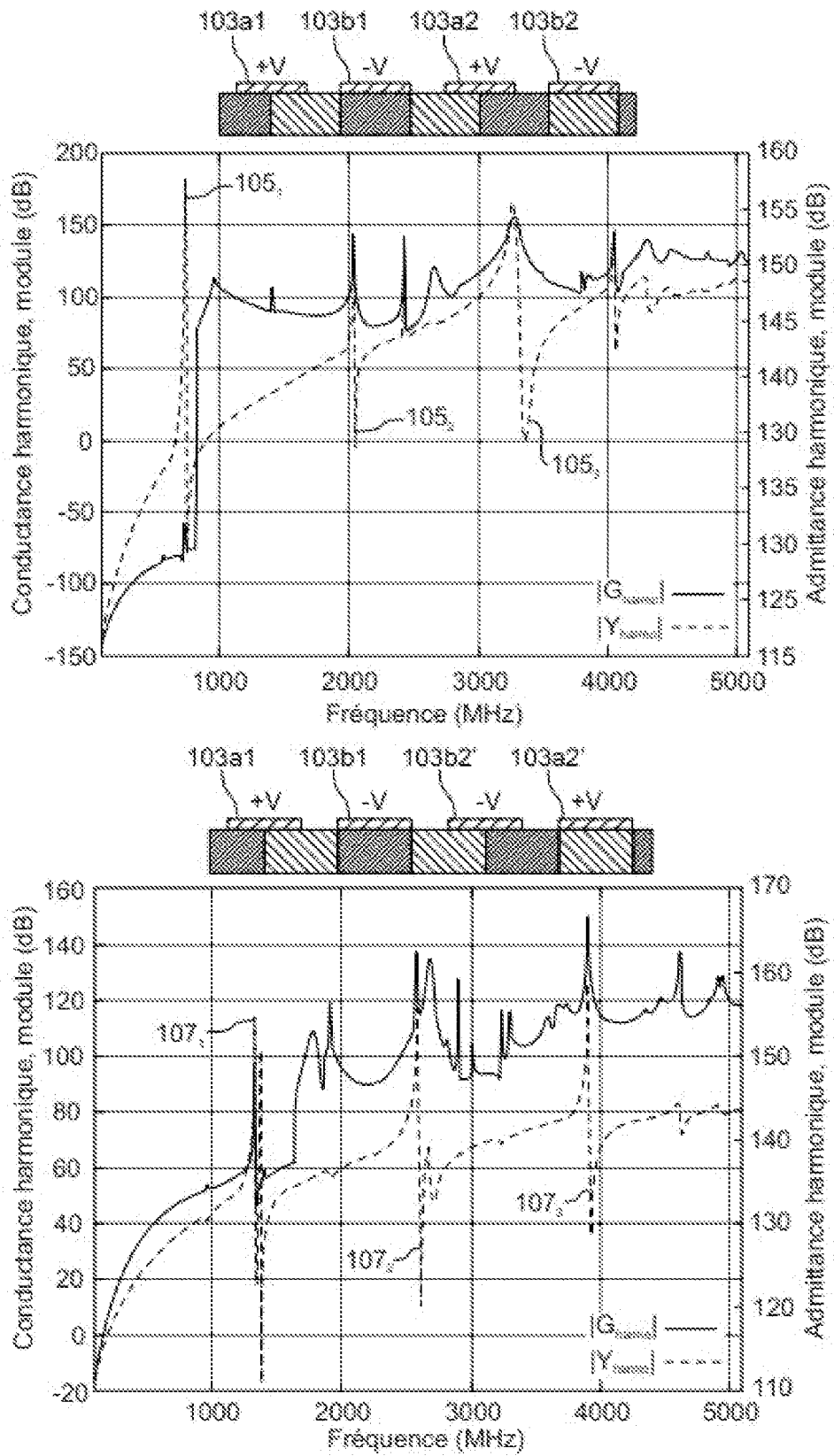


FIG. 15

[Fig. 16]

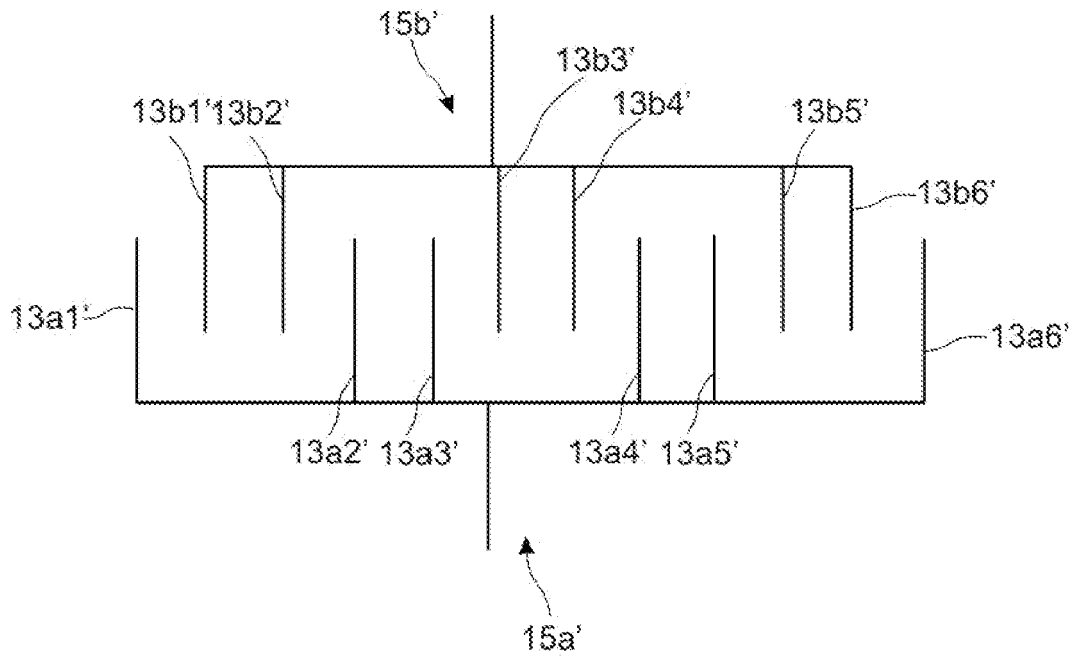


FIG. 16

[Fig. 17]

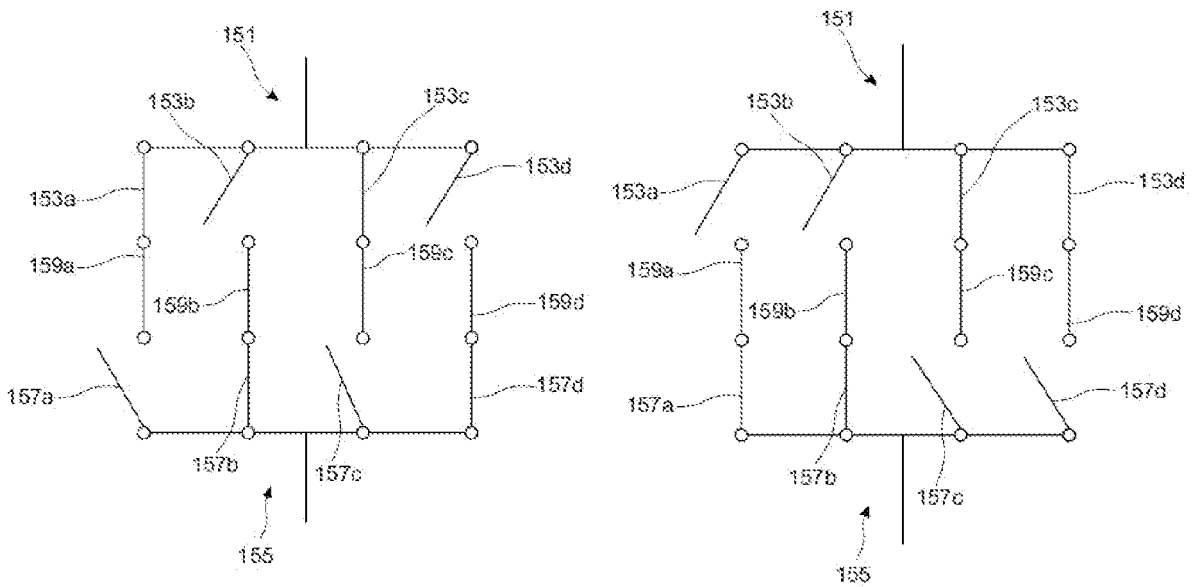


FIG. 17

[Fig. 18]

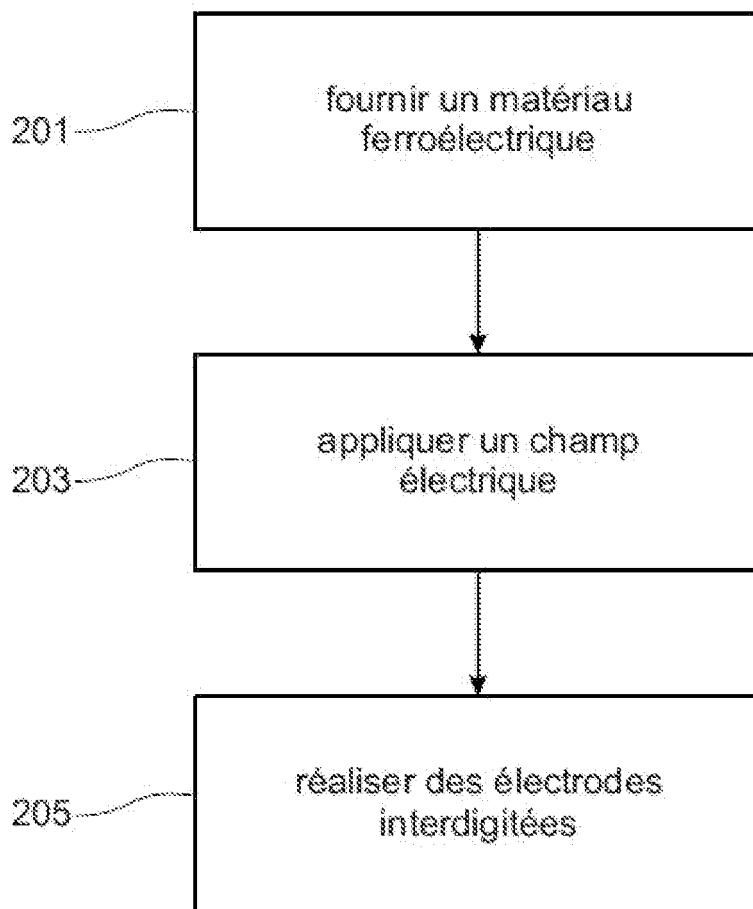


FIG. 18



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE PARTIEL**

établi sur la base des dernières revendications déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement national

FA 929039

FR 2315551

voir FEUILLE(S) SUPPLÉMENTAIRE(S)

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendications concernées	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	RASSAY SUSHANT ET AL: "Intrinsically Switchable Ferroelectric Scandium Aluminum Nitride Lamb-Mode Resonators", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, IEEE, USA, vol. 42, no. 7, 10 mai 2021 (2021-05-10), pages 1065-1068, XP011863689, ISSN: 0741-3106, DOI: 10.1109/LED.2021.3078444 [extrait le 2021-06-28]	1-4,7,8, 10,11, 13-16	H03H 9/25
Y	* figures 1, 2a, 2b, 4, 5a * -----	9,12	
X	EP 3 188 367 B1 (FREC N SYS [FR]; CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]) 19 juin 2019 (2019-06-19)	1-5,7, 10,11, 13-16	
Y	* alinéa [0035]; figures 1, 3, 4d * -----	9,12	
Y	US 2023/361757 A1 (BLASCHKE BENNO [DE] ET AL) 9 novembre 2023 (2023-11-09) * alinéa [0055] - alinéa [0091]; figures 6, 7, 8 *	9	
Y	US 2016/133820 A1 (KARE JORDIN T [US]) 12 mai 2016 (2016-05-12) * alinéa [0070]; figure 3 * -----	12	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H03H H10N
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
13 septembre 2024		Naumann, Olaf	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ABSENCE D'UNITÉ D'INVENTION
FEUILLE SUPPLÉMENTAIRE B**

Numéro de la demande

FA 929039

FR 2315551

La division de la recherche estime que la présente demande de brevet ne satisfait pas à l'exigence relative à l'unité d'invention et concerne plusieurs inventions ou pluralités d'inventions, à savoir :

1. revendications: 3-5 (complètement); 1, 2, 7-16 (en partie)

Dispositif à ondes élastiques selon la revendication 1, plus particulièrement ayant les caractéristiques des revendications 3-8, notamment dans lequel les dents de peigne sont positionnées au-dessus de domaines avec le même sens de polarisation

2. revendications: 6 (complètement); 1, 2, 7-16 (en partie)

Dispositif à ondes élastiques selon la revendication 1, plus particulièrement ayant les caractéristiques de la revendication 6, notamment dans lequel il y a au moins un domaine entier dépourvu de doigts d'électrode entre deux domaines sur lesquels sont positionnées deux dents au moins partiellement

La première invention a été recherchée.

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2315551 FA 929039**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **13 - 09 - 2024**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 3188367	B1	EP 3188367 A1	05-07-2017
		FR 3046090 A1	30-06-2017

US 2023361757	A1	US 2023361757 A1	09-11-2023
		WO 2023219561 A2	16-11-2023

US 2016133820	A1	AUCUN	
