

Description

Titre de l'invention : DISPOSITIF A ONDES ACOUSTIQUES DE SURFACE INTEGRANT UNE COUCHE MINCE DE MATERIAU METALLIQUE

Domaine technique

- [0001] Le domaine de l'invention est celui des dispositifs à ondes élastiques de surface (SAW pour Surface Acoustic Wave en terminologie anglaise) à structures composites intégrant une couche mince de matériau piézoélectrique reposant sur un substrat semi-conducteur.

Technique antérieure

- [0002] Les dispositifs à ondes élastiques de surfaces, ou dispositifs SAW, sont employés dans de nombreuses applications, et en particulier dans les applications électroniques où ils forment l'élément central de filtres, d'oscillateurs, de lignes de retard ou encore de transformateurs.
- [0003] Les matériaux piézoélectriques génèrent une tension électrique lorsqu'ils sont déformés sous l'action d'une contrainte mécanique, et, réciproquement, se déforment lorsqu'une tension électrique leur est appliquée.
- [0004] Par conséquent, lorsqu'un signal électrique alternatif est appliqué à une ou plusieurs électrodes en contact avec le matériau piézoélectrique, un signal mécanique correspondant (c'est-à-dire une oscillation ou une vibration) est généré au niveau de ce matériau piézoélectrique : le signal électrique est traduit en un signal mécanique.
- [0005] Le signal mécanique traduit dans le matériau piézoélectrique présente une dépendance en fréquence par rapport au signal électrique alternatif, dépendance qui est fonction des caractéristiques de la ou des électrodes, des propriétés du matériau piézoélectrique et d'autres facteurs tels que la forme du dispositif à ondes élastiques et d'autres structures constituant le dispositif.
- [0006] Les dispositifs à ondes élastiques exploitent cette dépendance en fréquence pour fournir une ou plusieurs fonctions au moyen de résonateurs à ondes élastiques de surface (SAW) ou transducteurs SAW, qui sont de plus en plus utilisés pour former, par exemple, des filtres dits « filtres SAW » mis en œuvre dans la transmission et la réception de signaux RF pour des applications dans la télécommunication.
- [0007] Un filtre SAW comprend au moins un transducteur SAW, connecté potentiellement à d'autres transducteurs de façon à réaliser une fonction de filtrage entre un port d'entrée et un port de sortie.
- [0008] De manière non limitative, un filtre SAW comprend typiquement un transducteur SAW d'entrée et un transducteur SAW de sortie formés sur un même élément piézo-

électrique, le transducteur SAW d'entrée générant des ondes élastiques de surface à partir d'un signal électrique arrivant, le transducteur SAW de sortie recevant l'onde élastique de surface et la convertissant en un signal électrique sortant.

- [0009] La géométrie et les dimensions des transducteurs, les types et les formes des matériaux utilisés conditionnent les caractéristiques du filtre SAW telles que les facteurs de couplage et de réflexion, les facteurs de qualité Q à la résonance ou à l'anti-résonance, la bande passante, les réponses parasites, la suppression de hauts ordres de résonances, ou encore la dépendance en température.
- [0010] Le brevet US 10,938,367 B2 divulgue un transducteur SAW interdigité 100 (IDT en terminologie anglaise, pour Inter Digital Transducer), illustré par la [Fig.1], avec une vue d'en haut en A) et une vue en coupe selon le plan XX' en B).
- [0011] Le transducteur SAW interdigité 100 comprend une couche piézoélectrique 140 reposant sur un substrat 110, une paire d'électrodes 150A et 150B en contact avec une surface de la couche piézoélectrique 140, une couche métallique 120 interposée entre le substrat 110 et la couche piézoélectrique 140, et une couche diélectrique 130 interposée entre la couche métallique 120 et la couche piézoélectrique 140.
- [0012] Les électrodes 150A et 150B comprennent respectivement des doigts 152A et 152B s'étendant selon une même direction D de manière à former une structure périodique de période 2p selon une direction perpendiculaire à la direction D, dans laquelle les doigts des deux électrodes sont placés en alternance, de manière conventionnelle.
- [0013] La couche diélectrique et la couche métallique interposées entre la couche piézoélectrique et son substrat permettent d'améliorer le comportement du transducteur, et plus particulièrement de limiter l'apparition de réponses parasites, les pertes induites liés aux propriétés du substrat et des effets d'interfaces au sein de l'empilement.
- [0014] Cependant, les informations divulguées par le brevet US 10,938,367 B2 restent insuffisantes en vue d'applications pratiques requérant des caractéristiques particulières et/ou de hauts niveaux de performance pour un transducteur SAW.

Exposé de l'invention

- [0015] Un but de l'invention est de caractériser des dispositifs à ondes de surface de manière à leur donner des paramètres opérationnels suffisants pour les mettre en œuvre dans des applications pratiques, au-delà des simples principes de fonctionnement de l'art antérieur.
- [0016] A cet effet, l'invention concerne un dispositif à ondes élastiques de surface comprenant un substrat ; une couche piézoélectrique au-dessus d'une face supérieure du substrat ; une paire d'électrodes en contact avec la couche piézoélectrique, les deux électrodes comprenant des doigts s'étendant selon une même direction de manière à former une structure périodique dans laquelle les doigts des deux électrodes alternent

les uns avec les autres, et présentant une distance interdigitale séparant les centres de deux doigts adjacents d'une même électrode ; une couche métallique interposée entre le substrat et la couche piézoélectrique ; et au moins une couche diélectrique interposée entre la couche métallique et la couche piézoélectrique, dispositif dans lequel la couche métallique présente une épaisseur comprise entre 5 nm et 100 nm et la (ou les) couche(s) diélectrique(s) présente(nt) une épaisseur comprise entre 25 nm et 600 nm.

- [0017] Un tel dispositif représente l'aboutissement d'un compromis apte à être mis en œuvre en tant que dispositif à ondes élastiques bénéficiant des effets positifs de blindage électromagnétique d'une couche métallique interposée entre la couche piézoélectrique et le substrat de cette dernière, tout en maintenant d'excellentes performances en termes de vitesse de phase, de coefficient de réflexion et de coefficient de couplage électromécanique k_s^2 dans la structure du dispositif.
- [0018] Selon d'autres caractéristiques non limitatives de l'invention, prises seules, ou selon toute combinaison techniquement réalisable :
- [0019] - la couche métallique peut présenter une épaisseur comprise entre 0,25% et 5% de la distance interdigitale ;
- [0020] - la couche diélectrique peut présenter une épaisseur comprise entre 250 nm et 400 nm ;
- [0021] - la couche diélectrique peut présenter une épaisseur supérieure à cinq fois l'épaisseur de la couche métallique ;
- [0022] - la couche diélectrique peut présenter une épaisseur inférieure à 200 nm ;
- [0023] - une couche diélectrique optionnelle peut être interposée entre le substrat et la couche métallique ;
- [0024] - la couche diélectrique et la couche diélectrique optionnelle peuvent avoir chacune une épaisseur inférieure à 300 nm ;
- [0025] - la somme de l'épaisseur de la couche diélectrique et de l'épaisseur de la couche diélectrique optionnelle est inférieure à 200 nm ;
- [0026] - le rapport de l'épaisseur de la couche diélectrique optionnelle sur la somme de l'épaisseur de la couche diélectrique et de l'épaisseur de la couche diélectrique optionnelle peut être compris entre 15% et 30% ;
- [0027] - la couche piézoélectrique peut comprendre une juxtaposition d'une couche de tantalate de lithium LiTaO_3 et d'une couche de niobate de lithium LiNbO_3 ; et
- [0028] - la couche métallique comprend des surfaces métallisées séparées d'une distance inférieure ou égale à la distance interdigitale.
- [0029] L'invention s'étend à un dispositif de filtrage comprenant le dispositif à ondes élastiques de surface.
- [0030] L'invention porte également sur un procédé de fabrication du dispositif comprenant une étape de collage direct.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

- [0031] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée de l'invention qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquelles :
- [0032] [Fig.1] La [Fig.1] illustre schématiquement un transducteur SAW interdigité déjà connu, en vue plane et en coupe ;
- [0033] [Fig.2] La [Fig.2] illustre schématiquement un transducteur SAW interdigité selon l'invention, en vue plane et en coupe ;
- [0034] [Fig.3] La [Fig.3] comprend deux graphes illustrant l'effet de la présence d'une couche métallique dans un transducteur SAW interdigité ;
- [0035] [Fig.4] La [Fig.4] comprend quatre graphes illustrant des grandeurs caractéristiques du transducteur de la [Fig.2] en fonction de l'épaisseur de la couche métallique 220 ;
- [0036] [Fig.5] La [Fig.5] comprend quatre graphes illustrant chacun la conductance et l'admittance d'une structure similaire à celle de la [Fig.2] en fonction des surfaces métalliques en vis-à-vis ;
- [0037] [Fig.6] La [Fig.6] comprend six graphes illustrant l'admittance harmonique pour différentes épaisseurs de la couche diélectrique du transducteur de la [Fig.2] ;
- [0038] [Fig.7] La [Fig.7] comprend quatre graphes illustrant des grandeurs caractéristiques du transducteur de la [Fig.2] en fonction de l'épaisseur de la couche de diélectrique 230 ;
- [0039] [Fig.8] La [Fig.8] illustre une variante dans la structure du transducteur de la [Fig.2], avec une couche diélectrique optionnelle 330 ;
- [0040] [Fig.9] La [Fig.9] illustre un dispositif à ondes acoustiques comprenant deux transducteurs correspondant à celui de la [Fig.2] ou à celui de la [Fig.8] ;
- [0041] [Fig.10] La [Fig.10] comprend six graphes illustrant l'admittance harmonique pour différentes combinaisons d'épaisseurs des couches diélectriques 230 et 330 du transducteur de la [Fig.8] ; et
- [0042] [Fig.11] La [Fig.11] illustre un procédé de fabrication des dispositifs des figures 2 et 8.
- [0043] [Fig.12] La [Fig.12] illustre une couche métallique discontinue.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

- [0044] Les inventeurs de la présente invention sont partis d'une structure de transducteur interdigité SAW générique, et ont procédé à de nombreuses modélisations numériques afin de déterminer certains paramètres influant de manière critique sur les performances d'un transducteur SAW interdigité et de définir des règles de conception d'un tel transducteur.
- [0045] Structure 1 – Simple couche diélectrique
- [0046] La [Fig.2] illustre en A) une vue plane d'un transducteur interdigité SAW 200 selon

l'invention, et en B) une coupe de ce transducteur selon le plan passant par le segment YY' et perpendiculaire à la vue plane.

- [0047] Le transducteur SAW interdigité 200 comprend une couche piézoélectrique 240 reposant sur un substrat 210 ; une paire d'électrodes comprenant une première électrode 250A et une deuxième électrode 250B chacune en contact avec une surface de la couche piézoélectrique 240 située sur le dessus de celle-ci de sorte que la couche piézoélectrique 240 est interposée entre le substrat 210 et la paire d'électrodes ; une couche métallique 220 interposée entre le substrat 210 et la couche piézoélectrique 240 ; et une couche de diélectrique 230 interposée entre la couche métallique 220 et la couche piézoélectrique 240.
- [0048] Dans cet exemple, la couche piézoélectrique 240 est en contact direct avec la couche diélectrique 230, la couche diélectrique 230 est en contact direct avec la couche métallique 220, et la couche métallique 220 est en contact direct avec le substrat 210.
- [0049] Les électrodes 250A et 250B comprennent respectivement des doigts 252A et 252B s'étendant selon une même direction D, de manière à former une structure périodique de période p selon une direction perpendiculaire à la direction D, dans laquelle les doigts des deux électrodes sont placés en alternance, comme visible en particulier en B), de manière à former une structure interdigitée conventionnelle.
- [0050] La longueur d'onde acoustique λ du mode exploité est égale à la période 2p, et de manière non limitative le transducteur fonctionnant dans les conditions de Bragg (la période d'électrode p du transducteur est deux fois inférieure à la longueur d'onde λ) pour cette longueur d'onde particulière.
- [0051] Cette période 2p s'entend comme la distance séparant les axes centraux d'extension de deux doigts adjacents d'une même électrode, c'est-à-dire des axes formant chacun un axe de symétrie du doigt correspondant, cet axe étant parallèle à la direction D d'extension des doigts.
- [0052] Le substrat 210 est préférablement constitué de silicium, et encore plus préférablement d'un silicium de haute qualité acoustique, mais peut également être constitué, par exemple, de verre ou de céramique ou d'un autre matériau semi-conducteur.
- [0053] La couche métallique 220 et les électrodes 250A et 250B sont préférablement constituées indépendamment d'un métal léger et réputé bon conducteur électrique tel que l'aluminium ou d'un alliage d'aluminium tel que Al-Cu, Al-Si ou Al-Ti, ceci dans le but de limiter l'effet de la masse de la couche (mass loading effect en terminologie anglaise) et les pertes résistives sur la réponse en fréquence du transducteur.
- [0054] Cependant, en raison de son point de fusion relativement bas, l'aluminium pourrait entraîner des complications lors de la manufacture du transducteur, en particulier lorsque des traitements thermiques à une température supérieure à ce point de fusion

sont appliqués, par exemple pour permettre à une couche piézoélectrique de LiTaO_3 de recouvrir ses propriétés piézoélectriques.

- [0055] Dans une telle situation, on pourra utiliser des métaux plus lourds que l'aluminium en dépit de leurs effets négatifs sur l'effet de charge : le molybdène, le tungstène, le platine ou le titane, mais aussi le chrome, le cuivre et le nickel ; alternativement, le scandium et le vanadium ou même du carbone conducteur peuvent être employés au regard de leur masse volumique avantageuse.
- [0056] Il est entendu que la couche métallique 220 peut être constituée d'un matériau différent de celui constituant les électrodes 250A et 250B. En outre, la couche métallique peut optionnellement être en contact avec, par exemple, un potentiel fixe tel que la masse. Cette mise en contact impose des étapes de fabrication supplémentaires, mais permet rendre la couche moins sensible aux signaux RF environnementaux.
- [0057] La couche diélectrique 230 est constituée d'un matériau diélectrique tel que de la silice, de préférence du dioxyde de silicium SiO_2 .
- [0058] D'autres matériaux peuvent être envisagés, comme le ZrO_2 , le Ta_2O_5 , le Si_3N_4 et les combinaisons de ces matériaux entre eux.
- [0059] La combinaison graduelle de SiO_2 et Si_3N_4 est également envisageable sous forme dite de SiON pour oxy-nitride de silicium.
- [0060] Ces matériaux diélectriques peuvent se présenter sous toute forme cristalline, par exemple polycristalline ou amorphe, tels qu'ils sont obtenus selon les méthodes de dépôt usuelles de la microélectronique.
- [0061] La couche piézoélectrique 240 est préférablement constituée de tantalate de lithium LiTaO_3 , de niobate de lithium LiNbO_3 ou d'une juxtaposition d'une couche de tantalate de lithium LiTaO_3 et d'une couche de niobate de lithium LiNbO_3 ; on peut également utiliser par exemple du niobate de potassium, du nitrure de gallium, du nitrure d'aluminium, de l'oxyde de zinc ou du quartz ou tout autre matériau piézoélectrique pour former la couche piézoélectrique 240.
- [0062] La distance entre deux parties correspondantes d'un premier doigt 252A et d'un deuxième doigt 252B adjacent à ce premier doigt définit une période d'électrode p du transducteur SAW interdigité 200.
- [0063] Le rapport entre la largeur a des doigts 252A et 252B et la période d'électrode p définit un rapport de métallisation M du transducteur 200.
- [0064] La période d'électrode p et le rapport de métallisation M caractérisent ensemble le transducteur SAW interdigité 200 et peuvent déterminer, avec d'autres facteurs tels que les propriétés de la couche piézoélectrique 240, de la couche diélectrique 230, de la couche métallique 220 ou encore du substrat 210, l'épaisseur h des électrodes (ou sa forme relative $h/2p$), les paramètres opérationnels du résonateur SAW.
- [0065] En effet, au cours du fonctionnement du résonateur SAW, un signal d'entrée

électrique alternatif fourni à la première électrode 250A est converti en un signal mécanique dans la couche piézoélectrique 240, ce qui génère une ou plusieurs ondes élastiques dans celle-ci.

- [0066] Les ondes élastiques résultantes, traduites du signal électrique d'entrée, sont principalement des ondes élastiques de surface que l'on cherche à obtenir dans le cadre du fonctionnement d'un transducteur SAW.
- [0067] L'amplitude et la phase des ondes élastiques ainsi générées dans la couche piézoélectrique dépendent de la fréquence du signal électrique alternatif d'entrée, de la période d'électrode p, de l'épaisseur relative de métal h/2p et du rapport de métallisation M ainsi que des paramètres opérationnels du résonateur SAW 200.
- [0068] Cette dépendance vis-à-vis de la fréquence est souvent décrite en termes de changements d'admittance harmonique, donc en termes de conductance harmonique et de susceptance harmonique, entre la première électrode 252A et la deuxième électrode 252B, variant en fonction de la fréquence du signal d'entrée électrique alternatif.
- [0069] Les ondes élastiques traduites du signal électrique alternatif d'entrée se déplacent dans la couche piézoélectrique 240 et atteignent finalement la deuxième électrode 252B où elles sont converties en un signal électrique alternatif de sortie.
- [0070] Les ondes élastiques peuvent également rester confinées sous le transducteur interdigité lorsque celui-ci est entouré de miroirs réflecteurs constitués d'un réseau d'électrodes similaires à celles du transducteur, préférentiellement, sans pour autant devoir se limiter à ce mode de réalisation, portées à la masse électrique, de période mécanique proche ou identique à celle du transducteur et réfléchissant vers ce dernier les ondes incidentes en phase, créant ainsi un résonateur à ondes de surface. Ce résonateur peut constituer l'élément de base d'un filtre dit à « éléments d'impédance » combinant des pôles et des zéros pour former la fonction de transfert visée.
- [0071] Sur la base de la structure générique décrite ci-dessus, les inventeurs ont procédé à de nombreuses modélisations numériques afin de déterminer les paramètres à fixer pour être en mesure d'obtenir des transducteurs SAW interdigités répondant à des cahiers des charges précis, et en particulier les épaisseurs de la couche métallique 220 et de la couche diélectrique 230.
- [0072] D'autres paramètres, influençant par exemple la vitesse de phase, le coefficient de réflexion, la permittivité diélectrique ou encore le couplage électromécanique suivent une loi empirique en fonction de l'épaisseur de la couche diélectrique présente entre la couche piézoélectrique et la couche métallique, loi suivant l'équation 1 suivante :

$$\boxed{f(t) = a_0 + (a_1 + a_2 t + a_3 t^2) \times (\ln(b_0 + b_1 t + b_2 t^2))}$$

$$\boxed{f(t) = a_0 + (a_1 + a_2 t + a_3 t^2) \times (\ln(b_0 + b_1 t + b_2 t^2))} \text{ Eq. 1}$$

[0073] Les coefficients a_0 à a_3 et b_0 à b_2 dépendent de la fréquence de travail, des matériaux choisis ainsi que des autres épaisseurs de cet empilement, mise à part l'épaisseur de la couche diélectrique présente entre la couche piézoélectrique et la couche métallique.

[0074] Les épaisseurs de la couche métallique 220 et de la couche diélectrique 230 étant au moins approximativement déterminées, l'homme de métier saura donc choisir et ajuster les épaisseurs et les matériaux (y compris leurs orientations respectives) afin d'optimiser le fonctionnement du dispositif en fonction des spécifications techniques de ce dernier.

Modélisations 1 - couche métallique, intérêt

[0075] Une première série de modélisations a permis de vérifier la pertinence de cette structure générique, et en particulier l'intérêt et les éventuels inconvénients de la couche métallique 220.

[0076] A cette fin, deux structures équipées d'électrodes SAW interdigitées ont été comparées via des modélisations : d'une part, une structure classique avec un empilement piézoélectrique / oxyde de silicium / silicium et, d'autre part, une structure similaire à la structure classique dite « structure à couche métallique » mais dans laquelle une couche métallique était introduite à l'interface entre le silicium et l'oxyde de silicium, résultant en un empilement de type piézoélectrique / oxyde de silicium / métal / silicium.

[0077] Cette structure à couche métallique est illustrée en B) de la [Fig.2], la structure classique correspondant à la structure de la [Fig.2] dont la couche métallique 220 aurait été omise.

[0078] Plus spécifiquement, la structure classique était constituée d'une couche piézoélectrique de LiTaO_3 (YXI)/42° selon la nomenclature de la norme IEEE Std-176, de 600 nm d'épaisseur fixée sur un substrat constitué d'un wafer de silicium d'orientation (100) et de conductivité résiduelle de 100 S.m^{-1} via une couche d'oxyde de silicium (modélisée comme du quartz fondu) de 500 nm d'épaisseur, correspondant respectivement aux couches 240, 210 et 230 de la [Fig.2].

[0079] Les électrodes étaient modélisées comme constituées d'un réseau infini d'électrodes d'alliage d'aluminium à 2% de cuivre avec une période d'électrode p de $1 \mu\text{m}$, un rapport de métallisation M de 50% et une épaisseur relative h/λ (épaisseur normalisée par rapport à la longueur d'onde acoustique λ) de 5%.

[0080] La structure à couche métallique était identique à la structure classique, sauf en ce qu'elle comportait en plus la couche métallique 220 de la [Fig.2], constituée d'un alliage d'aluminium à 2% de cuivre de 50 nm d'épaisseur entre le substrat de silicium et la couche d'oxyde de silicium, structure correspondant à la vue en coupe de la [Fig.2].

[0081] Les admittances harmoniques de ces deux structures ont été calculées au moyen de

méthodes de calcul par couplage d'éléments finis et d'éléments de frontière, plus spécifiquement une méthode dite FEM-BIM (Finite Element Method-Boundary Integral Method).

- [0082] On peut se référer à la publication de la méthode de calcul par P. Ventura, J. M. Hode, M. Solal, J. Desbois, J. Ribbe « Numerical Method for SAW propagation characterization » dans Proc. of the IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 175-186, 1998, et son application aux matériaux multi-couches par S. Ballandras, A. Reinhardt, V. Laude, A. Soufyane, S. Camou, W. Daniau, T. Pastureaud, W. Steichen, R. Lardat, M. Solal, P. Ventura, « Simulations of surface acoustic wave devices built on stratified media using a mixed finite element/boundary element integral formulation » dans Journal of Applied Physics, vol. 96, N°12, pp.7731-7741, 2004.
- [0083] La [Fig.3] montre les conductances et susceptances harmoniques (respectivement $G_{\text{har}}_{\text{mo}}$ en traits pleins exprimée en dB/S.m⁻¹ sur les axes des ordonnées du côté gauche de chaque graphe et susceptance $B_{\text{har}}_{\text{mo}}$ en pointillés exprimée en S.m⁻¹ sur les axes des ordonnées du côté droit de chaque graphe) de la structure classique en A) et de la structure à couche métallique en B).
- [0084] En ce qui concerne la structure classique, il apparaît que la conductance G est toujours supérieure à zéro et que les résonances principales et parasites présentent une valeur G finie contrairement aux modes vrais (sans pertes) pour lesquels G peut être assimilé à une fonction de Dirac.
- [0085] Les pertes traduites par une conductance finie (inférieure à -150 dB sur la [Fig.3]) sont uniquement dues à des effets de conductance parasite dans le substrat de silicium : le champ électrique associé au déplacement mécanique pénètre dans la structure sur une profondeur de plus de 2λ (la valeur typique peut atteindre 10λ ou plus pour des ondes de cisaillement pures) et génère donc des courants de fuite qui captent l'énergie d'excitation fournie par le signal d'entrée et la convertissent en chaleur.
- [0086] En effet, on peut démontrer que le substrat de silicium, même de haute résistivité, a des porteurs de charges électriques de durées de vie suffisamment longues pour induire la création d'une capacitance parasite à l'interface entre le substrat 210 de silicium et la couche diélectrique 230 d'oxyde de silicium.
- [0087] La [Fig.3] montre en B) que l'introduction de la couche métallique 220 entre le substrat 210 de silicium et la couche diélectrique 230 d'oxyde de silicium amène les valeurs de la conductance harmonique à ne pas dépasser le niveau du bruit, jusqu'à ce que la fréquence atteigne le point de branchement dit SSBW (Surface Skimming Bulk Wave) à partir duquel les ondes élastiques ne sont plus confinées aux couches supérieures de la structure mais pénètrent le volume du substrat de silicium sous forme d'ondes rayonnées (le modèle suppose un volume de silicium illimité selon la profondeur, voir la figure 2B).

- [0088] La raison de l'affaiblissement de conductance harmonique est que la couche métallique constitue un blindage électromagnétique entre la couche piézoélectrique et le substrat, éliminant toute pénétration de champ électrique dans le volume du substrat de silicium, ce qui supprime l'apparition de la conductance parasite.
- [0089] Ceci se traduit par la minimisation voire l'annulation du libre parcours moyen des charges, limitant notablement voire interdisant ainsi l'existence de courants de fuite dus à une propagation cohérente des charges à l'interface.
- [0090] La suppression des fuites par la couche métallique est effective pour tout type de métal et toute épaisseur de la couche de métal, mais il est préférable de limiter cette épaisseur afin d'éviter l'apparition de nouveaux modes dégradant la pureté spectrale de la structure confinant l'onde élastique en surface.
- [0091] En outre, utiliser des métaux denses et augmenter l'épaisseur de la couche métallique provoque un effet de masse de la couche (mass loading effect en terminologie anglaise), réduisant les vitesses de propagation des ondes élastiques et modifiant la réponse en fréquence du transducteur.
- [0092] Ainsi, afin de limiter les inconvénients mentionnés dans les deux paragraphes précédents, on recommande d'utiliser pour la couche métallique (i) des métaux légers, en particulier de l'aluminium ou un alliage à plus de 90% d'aluminium tel que Al-Cu, Al-Si ou Al-Ti et (ii) une épaisseur de métal comprise entre 5 nm et 100 nm, ou même entre 5 nm et 10 nm.
- [0093] Il est à noter que d'autres modélisations ont permis de confirmer que la présence d'une couche métallique ne modifie pas significativement la vitesse du mode et la capacité de réflexion de ce dernier par la structure, et que son coefficient de couplage électromécanique k_s^2 n'est que légèrement inférieur dans le cas où la couche métallique est présente comparé à une structure démunie de celle-ci.
- [0094] On peut aussi noter que la couche métallique 220 ne se limite pas à une couche continue, mais peut aussi consister en un motif constitué de surfaces métallisées séparées, qui jouent le même rôle de blindage qu'une couche continue, mais permettant de limiter l'effet de masse.
- [0095] Dans ce contexte, la distance d séparant deux surfaces métallisées contiguës devrait être idéalement inférieure à λ , préférablement inférieure à $\lambda/2$, plus préférablement inférieure à $\lambda/4$, comme illustré par la [Fig.12], avec une couche métallique 220 constituée d'une matrice bidimensionnelle de surfaces métallisées 222 séparées l'une de l'autre d'une distance d . Cette condition n'est nullement limitative mais favorise la réduction du libre parcours moyen des charges induites à l'interface oxyde/silicium (et plus généralement diélectrique/semi-conducteur).
- [0096] De manière non-limitative, toute sorte de géométrie et de distribution (carrée, triangulaire, hexagonale, autre) peut être utilisée pour les éléments de cette matrice.

- [0097] Modélisations 2 – couche métallique et ondes de surface
- [0098] Une deuxième série de modélisations a permis d'évaluer l'effet de l'épaisseur de la couche métallique 220 sur les grandeurs caractéristiques des ondes de surface ainsi que la permittivité diélectrique.
- [0099] A cette fin, on a considéré des structures similaires à celle de la [Fig.2], correspondant à la structure à couche métallique de la première série de modélisations, à la différence près que cette fois la couche métallique est constituée d'une couche de titane d'épaisseur variant entre 1 nm et 50 nm.
- [0100] La [Fig.4] montre quatre graphes illustrant les évolutions de grandeurs caractéristiques des ondes de surface ainsi que la permittivité diélectrique dans de telles structures en fonction de l'épaisseur de la couche métallique indiquée en abscisse, variant de 1 nm à 50 nm, avec en A) la vitesse de phase exprimée en m.s^{-1} et variant entre 4036 et 4048, en B) le coefficient de réflexion exprimé en pourcentage et variant entre 8,86 et 9,06, en C) le coefficient de couplage électromécanique k^2 s exprimé en pourcentage et variant entre 9,94 et 10,08, et en D) la permittivité diélectrique relative, sans dimension, variant entre 48,499 et 48,5006.
- [0101] Il apparaît de ces graphes que l'augmentation de l'épaisseur de la couche métallique n'entraîne qu'une très légère dégradation des grandeurs caractéristiques des ondes de surface (vitesse de phase, coefficient de réflexion, coefficient de couplage électromécanique).
- [0102] La perméabilité relative n'est presque pas affectée par cette augmentation avec moins d'1% de variation, et les variations du coefficient de réflexion et du coefficient de couplage électromécanique restent de l'ordre de 1%, l'ensemble de ces variations peut donc être considéré comme négligeable.
- [0103] Pour la vitesse de phase, l'effet de masse de la couche métallique est plus important, avec une variation d'environ $-2 \text{ m.s}^{-1}.\text{nm}^{-1}$ soit -50 ppm.nm^{-1} .
- [0104] On peut déduire de ces constatations que l'épaisseur de la couche de métal a un impact, et qu'il est avantageux de limiter cet impact en maintenant l'épaisseur de la couche métallique inférieure à 100 nm, ou encore inférieure à 5%, plus préférablement 2,5%, de la longueur d'onde acoustique λ .
- [0105] En revanche, il est préférable de maintenir l'épaisseur de la couche métallique supérieure à 0,25% de la longueur d'onde acoustique λ afin de conserver l'effet de blindage électromagnétique procuré par la couche métallique.
- [0106] Modélisations 3 – couche métallique et capacitance parasite
- [0107] Dans une troisième série de modélisation, au moyen d'un modèle fondé sur une fonction de Green (décrit en détail dans A. Reinhardt, « Simulation, conception et réalisation de filtres à ondes de volume dans des couches minces piézoélectriques », Thèse de Doctorat de l'Université de Franche-Comté en Sciences pour l'Ingénieur,

2005), on a calculé l'admittance, c'est-à-dire la conductance et la susceptance, d'un empilement de matériaux comprenant, du haut vers le substrat, 100 nm d'aluminium, 600 nm de LiTaO_3 , 500 nm de SiO_2 (modélisé comme du quartz fondu), 50 nm de molybdène, 650 μm de silicium, et un support semi-infini de polyimide (kapton) pour amortir les ondes rayonnées de la surface vers le cœur de l'empilement.

[0108] Pour le calcul, le facteur de qualité Q des couches métalliques était fixé à 100, à 1000 pour le SiO_2 , et à 10000 pour le LiTaO_3 et le silicium. Ce facteur de qualité sert à calculer la partie imaginaire des constantes élastiques C_{ij} (partie non conservative du problème) comme Partie Imaginaire (C_{ij}) = Partie Réelle (C_{ij})/ Q .

[0109] En ce qui concerne l'aspect électrique, l'angle de perte $\text{tg}(\delta)$ était fixé à 10^{-2} pour le SiO_2 , 10^{-3} pour le silicium et 10^{-4} pour le LiTaO_3 . Comme précédemment, ce coefficient permet de calculer les parties imaginaires des constantes diélectriques à partir de leur valeur réelle selon le processus bien connu de l'homme de l'art.

[0110] La couche d'aluminium était configurée de manière à être représentative de la métallisation d'un filtre SAW dans le domaine de fréquences allant de 1 à 2 GHz, c'est-à-dire considérée comme occupant une surface de 1 mm^2 au maximum.

[0111] La [Fig.5] comprend quatre graphes A) à D) illustrant chacun la conductance G , l'admittance B et la capacité statique C_0 d'une structure similaire à celle de la [Fig.2] et correspondant respectivement à des surfaces d'aluminium de 500, 250, 100 et 50 μm^2 .

[0112] En plus de montrer un effet HBAR (High Overtone Bulk Acoustic Resonator en terminologie anglaise) au-delà de 3GHz, on constate la linéarité de l'effet sur la conductance de la capacité statique C_0 constituée par les éléments électriquement conducteurs en regard (couche métallique 120 et électrodes 150A et 150B) et la couche diélectrique 130 les séparant.

[0113] Ainsi, afin de limiter la capacitance parasite, il convient de limiter la métallisation de la couche piézoélectrique, par exemple en limitant la surface occupée par la couche définissant les électrodes des résonateurs et leurs plots de connexions respectifs à des valeurs inférieures à $10^4 \mu\text{m}^2$.

[0114] De préférence, la seule surface cumulée des plots de connexion doit rester inférieure à $10^4 \mu\text{m}^2$, chaque plot de connexion étant défini comme une région de la couche définissant les électrodes formant un rectangle de surface suffisante, prévu pour permettre une micro-soudure par écrasement de fil ou de boule, « wedge bonding » et « ball bonding », respectivement, en terminologie anglaise.

Couche diélectrique

[0115] Initialement, il convient de noter que la présence de la couche diélectrique 230 est nécessaire afin de diminuer l'effet HBAR (High Overtone Bulk Acoustic Resonator en terminologie anglaise) dû à la présence de la couche métallique 220, et par là de réduire les réponses parasites ainsi induites au niveau du résonateur interdigité SAW

200.

[0116] Modélisations 4 – couche diélectrique et admittance

[0117] Toujours dans la structure à couche métallique illustrée par la [Fig.2], une quatrième série de modélisations a permis d'évaluer l'effet de l'épaisseur de la couche de diélectrique 230 interposée entre la couche piézoélectrique 240 et la couche métallique 220 sur les caractéristiques du résonateur interdigité SAW 200.

[0118] A cette fin d'évaluation, on a considéré des structures similaires à celle de la [Fig.2], correspondant à la structure à couche métallique de la première série de modélisations, aux différences près que la couche métallique est constituée de molybdène et que la couche diélectrique est constituée d'une couche d'oxyde de silicium SiO_2 dont on a fait varier l'épaisseur.

[0119] Pour les calculs, on a considéré un facteur de qualité Q de 10000 pour la couche de LiTaO_3 et le substrat de silicium, de 1000 pour le SiO_2 , et de 100 pour le molybdène.

[0120] La [Fig.6] montre six graphes illustrant l'évolution, en fonction de la fréquence indiquée en abscisse, du module et de la susceptance de l'admittance harmonique (module harmonique $|Y|_{\text{har}}_{\text{mo}}$ en trait plein exprimé en $\text{dB/S} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ sur les axes des ordonnées du côté gauche de chaque graphe et susceptance $B_{\text{har}}_{\text{mo}}$ en pointillés exprimée en $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ sur les axes des ordonnées du côté droit de chaque graphe), pour des épaisseurs de SiO_2 de 0, 20, 50, 100, 200 et 500 nm, respectivement sur les graphes indiqués A) à F).

[0121] On peut constater de ces graphes que la distance entre la fréquence de résonance (maximum de la conductance harmonique) et la fréquence d'anti-résonance (minimum de la conductance harmonique) augmente avec l'épaisseur de SiO_2 .

[0122] Ces deux fréquences augmentent en raison de la diminution de l'effet de masse, le couplage entre la couche métallique et la couche piézoélectrique diminuant avec l'augmentation de l'épaisseur de SiO_2 .

[0123] On peut donc avoir avantage à maximiser l'épaisseur de la couche de SiO_2 .

[0124] On constate également que des réponses parasites proches de 2,7 GHz n'apparaissent que pour des épaisseurs de SiO_2 supérieures à 200 nm, comme visible sur les graphes E) et F) mais pas sur les graphes A) à D).

[0125] Ainsi, on peut avoir avantage à utiliser une couche d'oxyde d'épaisseur inférieure à 200 nm, par exemple comprise entre 50 nm et 200 nm, préférablement entre 100 nm et 200 nm, pour éviter l'apparition de telles réponses parasites.

[0126] Modélisations 5 – couche diélectrique et ondes de surface

[0127] Une cinquième série de modélisations a permis d'évaluer l'effet de l'épaisseur de la couche diélectrique 230 sur les grandeurs caractéristiques des ondes de surface ainsi que la permittivité diélectrique.

[0128] A cette fin d'évaluation, on a considéré des structures similaires à celle de la [Fig.2],

correspondant à la structure à couche métallique de la première série de modélisations, à la différence près qu'un alliage d'aluminium à 2% de cuivre Al-Cu, du titane Ti, du molybdène Mo, du cuivre Cu et du nickel Ni ont été employés pour la couche métallique, l'épaisseur de la couche diélectrique variant entre 0 et 400 nm.

- [0129] La [Fig.7] montre quatre graphes illustrant les évolutions de grandeurs caractéristiques des ondes de surface ainsi que la permittivité diélectrique dans de telles structures en fonction de l'épaisseur de la couche diélectrique indiquée en abscisse, variant de 0 à 0,4 μm , avec en A) la vitesse de phase exprimée en m.s^{-1} et variant entre 4050 et 4140, en B) le coefficient de réflexion exprimé en pourcentage et variant entre 8 et 9,6, en C) le coefficient de couplage électromécanique k_s^2 exprimé en pourcentage et variant entre 6,5 et 10, et en D) la permittivité diélectrique relative, sans dimension, variant entre 51 et 48,5.
- [0130] Chaque graphe contient cinq courbes, correspondant respectivement à la nature de la couche métallique considérée (Al-Cu, Ti, Mo, Cu, Ni).
- [0131] On peut constater de ces graphes que la vitesse de phase, le coefficient de réflexion et le coefficient de couplage électromécanique k_s^2 présentent chacun un maximum pour une épaisseur de SiO_2 inférieure à 600 nm, et même inférieure à 400 nm : autour de 50 nm pour la vitesse de phase, entre 80 nm et 180 nm pour le coefficient de réflexion selon la nature de la couche métallique, et entre 250 nm et 400 nm pour le coefficient de couplage électromécanique k_s^2 .
- [0132] Ainsi, afin de trouver un équilibre entre l'intérêt de maximiser l'épaisseur de SiO_2 et celui de maximiser l'un ou plusieurs des paramètres mentionnés dans le paragraphe précédent, on peut avantageusement choisir une épaisseur de SiO_2 comprise entre 25 nm et 2 μm , préférablement entre 50 nm et 600 nm, plus préférablement entre 50 nm et 400 nm, encore plus préférablement entre 250 nm et 400 nm.
- [0133] Alternativement, on peut exprimer des valeurs préférentielles pour l'épaisseur de SiO_2 en termes relatifs par rapport à l'épaisseur de la couche métallique, auquel cas on peut avantageusement choisir une épaisseur de la couche diélectrique 230 comprise entre 0,5 et 40 fois, préférablement entre 10 et 40 fois, encore plus préférablement entre 20 et 40 fois l'épaisseur de la couche métallique 220.
- [0134] On peut également chercher à exploiter l'existence des maxima, par exemple pour maximiser le couplage électromécanique k_s^2 en choisissant une épaisseur de SiO_2 comprise entre 250 nm et 400 nm, pour maximiser la vitesse de phase en choisissant une épaisseur de SiO_2 comprise entre 25 nm et 100 nm, ou encore pour maximiser le coefficient de réflexion en choisissant une épaisseur de SiO_2 comprise entre 80 nm et 180 nm.

Structure 2 – Double couche diélectrique

- [0135] Une alternative à placer la couche métallique 220 directement en contact avec le

substrat 210 consiste à interposer une couche diélectrique optionnelle 330 entre eux, de manière à obtenir la structure en couche illustrée par la [Fig.8], dite « structure à couche diélectrique optionnelle ».

- [0136] L'effet de masse est lié à l'augmentation de la masse par unité de volume du lieu de propagation de l'onde.
- [0137] On peut considérer que l'onde est d'autant plus sensible aux propriétés du milieu que celui-ci coïncide avec la localisation de sa densité d'énergie maximum.
- [0138] Ainsi, plus la couche métallique est comparativement lourde (e.g. 10,22 g.cm⁻³ pour une couche métallique de molybdène contre 2,65 g.cm⁻³ pour une couche diélectrique de silice) et se trouve proche de la couche piézoélectrique qui est le siège du maximum d'énergie de l'onde, plus la vitesse de phase sera ralentie par ledit effet de masse.
- [0139] Éloigner cette couche métallique de forte masse volumique de la couche piézoélectrique par la présence d'une couche diélectrique de masse volumique plus faible se traduit de fait par une augmentation de ladite vitesse de phase.
- [0140] Dans le cas d'une couche diélectrique optionnelle, il est naturellement tenu compte de l'effet de masse de l'ensemble des deux couches diélectriques (e.g. silice) toujours présentes dans l'empilement avec une somme d'épaisseurs constante d'un calcul à l'autre, seule la position de la couche métallique changeant et donc son influence sur la vitesse de phase au même titre.
- [0141] On pourra se référer aux descriptions précédentes pour les éléments communs aux figures 2 et 8.

Modélisations 6

- [0142] En ce qui concerne cette structure à couche diélectrique optionnelle illustrée par la [Fig.8], une sixième série de modélisations a permis d'évaluer l'effet des épaisseurs de la couche de diélectrique 230 interposée entre la couche piézoélectrique 240 et la couche métallique 220 et de la couche de diélectrique optionnelle 330 interposée entre le substrat 210 et la couche métallique 220 sur les caractéristiques du transducteur interdigité SAW 200.
- [0143] A cette fin d'évaluation, on a considéré des structures similaires à celle de la [Fig.8], correspondant à la structure à couche métallique de la série de modélisations 1, aux différences près que cette fois la couche métallique est constituée de molybdène, que la couche diélectrique optionnelle 330 est présente, et que la couche diélectrique 230 et la couche diélectrique optionnelle 330 sont chacune constituées d'une couche d'oxyde de silicium SiO₂ dont on a fait varier l'épaisseur.
- [0144] Pour les calculs, on a considéré un facteur de qualité Q de 10000 pour la couche de LiTaO₃ et le substrat de silicium, de 1000 pour le SiO₂, et de 100 pour le molybdène.
- [0145] La [Fig.10] montre six graphes illustrant l'évolution de l'admittance harmonique (conductance G_{harmonic} en traits pleins exprimé en dB/S.μm⁻¹ sur les axes des ordonnées du

côté gauche de chaque graphe et susceptance B_{harmonic} en pointillés exprimée en $S.m^{-1}$ sur les axes des ordonnées du côté droit de chaque graphe), pour des épaisseurs de SiO_2 de 0, 20, 50, 100, 200 et 500 nm pour la couche diélectrique 230 et des épaisseurs de SiO_2 de 520, 500, 470, 420, 320 et 20 nm pour la couche diélectrique optionnelle 330, respectivement sur les graphes indiqués A) à F).

- [0146] On observe que l'effet combiné des deux couches d'oxyde 230 et 330 permet d'obtenir des résultats similaires à ceux d'une couche d'oxyde unique, avec la possibilité de contenir les épaisseurs de ces deux couches.
- [0147] Ainsi, on peut avoir avantage à interposer une couche de diélectrique 230 et une couche de diélectrique optionnelle 330, chacune ayant une épaisseur inférieure à 300 nm, préférablement inférieure à 100 nm.
- [0148] On peut également avantageusement interposer ces couches 230 et 330 de manière à ce que la somme de leurs épaisseurs respectives reste inférieure à 600 nm.
- [0149] En outre, on observe une disparition de l'une des réponses parasites, correspondant à un deuxième mode situé à environ 2,7 GHz dans la structure correspondant au graphe D).
- [0150] Ainsi, afin d'éliminer ce deuxième mode, on peut avantageusement choisir des épaisseurs des couches d'oxyde telles que le rapport de l'épaisseur de la couche diélectrique optionnelle sur la somme de l'épaisseur de la couche diélectrique et de l'épaisseur de la couche diélectrique optionnelle est compris entre 15% et 30%.
- [0151] Dispositifs et filtres à ondes élastiques de surface
- [0152] Une application du dispositif à ondes de surface selon l'invention est un dispositif de filtrage comprenant une paire de transducteurs tels que celui illustré par la [Fig.2].
- [0153] L'homme de métier est capable de combiner de tels résonateurs pour obtenir des fonctions de filtrage.
- [0154] La [Fig.9] illustre de manière non limitative un dispositif quadripôle 900 intégrant deux transducteurs SAW 200_1 et 200_2 tels que celui de la [Fig.2] ou de la [Fig.8], en contact avec une même couche piézoélectrique 940 supportée par un substrat commun.
- [0155] Comme expliqué plus haut, l'un des deux transducteurs SAW est un transducteur SAW d'entrée et l'autre est un transducteur SAW de sortie.

Procédé de fabrication

- [0156] Les dispositifs illustrés par les figures 2 et 8 peuvent être fabriqués selon des procédés incluant chacun une ou plusieurs étapes de collage direct, en particulier par collage moléculaire, entre deux des couches constituant les structures des dispositifs.
- [0157] Ainsi, la [Fig.11] illustre un procédé 1100 de fabrication de l'un ou l'autre des dispositifs illustrés par les figures 2 et 8 avec le collage direct 1150 de deux éléments A et B, A pouvant être la couche diélectrique 230 et B la couche métallique 220, A la

couche piézoélectrique 240 et B la couche diélectrique 230, A la couche métallique 220 et B le substrat 210, A la couche métallique 220 et B la couche diélectrique optionnelle 330, A la couche diélectrique optionnelle 330 et B le substrat 210.

[0158] Chacun des éléments A et B peut être un élément individuel, ou déjà lié à d'autres couches, on peut par exemple coller un premier ensemble comprenant la couche piézoélectrique 240 et la couche diélectrique 230, cette dernière représentant l'élément A, à un deuxième ensemble comprenant le substrat 210 et la couche métallique 220, cette dernière représentant l'élément B.

[0159] Bien entendu l'invention n'est pas limitée à la description ci-dessus, et on peut y apporter des variantes de réalisation sans sortir du cadre de l'invention tel que défini par les revendications.

Revendications

- [Revendication 1] Dispositif (200) à ondes élastiques de surface comprenant :
- un substrat (210) ;
 - une couche piézoélectrique (240) au-dessus d'une face supérieure du substrat (210) ;
 - une paire d'électrodes (250A, 250B) en contact avec la couche piézoélectrique, les deux électrodes comprenant des doigts (252A, 252B) s'étendant selon une même direction (D) de manière à former une structure périodique dans laquelle les doigts des deux électrodes alternent les uns avec les autres, et présentant une distance interdigitale ($2 \times p$) séparant des centres de deux doigts adjacents d'une même électrode ;
 - une couche métallique (220) interposée entre le substrat et la couche piézoélectrique ; et
 - au moins une couche diélectrique (230) interposée entre la couche métallique et la couche piézoélectrique,
- le dispositif étant caractérisé en ce que :
- la couche métallique (220) présente une épaisseur comprise entre 5 nm et 100 nm ; et
 - la au moins une couche diélectrique (230) présente une épaisseur comprise entre 25 nm et 600 nm.
- [Revendication 2] Le dispositif à ondes élastiques de surface selon la revendication 1, dans lequel la couche métallique présente une épaisseur comprise entre 0,25% et 5% de la distance interdigitale.
- [Revendication 3] Le dispositif à ondes élastiques de surface selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 et 2, dans lequel la couche diélectrique présente une épaisseur comprise entre 250 nm et 400 nm.
- [Revendication 4] Le dispositif à ondes élastiques de surface selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 et 2, dans lequel la couche diélectrique présente une épaisseur supérieure à cinq fois l'épaisseur de la couche métallique.
- [Revendication 5] Le dispositif à ondes élastiques de surface selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 et 2, dans lequel la couche diélectrique présente une épaisseur inférieure à 200 nm.
- [Revendication 6] Le dispositif à ondes élastiques de surface selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 5, comprenant en outre une couche diélectrique optionnelle (330), interposée entre le substrat (210) et la

- couche métallique (220).
- [Revendication 7] Le dispositif à ondes élastiques de surface selon la revendication 6, dans lequel la couche diélectrique (230) et la couche diélectrique optionnelle (330) ont chacune une épaisseur inférieure à 300 nm.
- [Revendication 8] Le dispositif à ondes élastiques de surface selon la revendication 6, dans lequel la somme de l'épaisseur de la couche diélectrique (230) et de l'épaisseur de la couche diélectrique optionnelle (330) est inférieure à 200 nm.
- [Revendication 9] Le dispositif à ondes élastiques de surface selon la revendication 6, dans lequel le rapport de l'épaisseur de la couche diélectrique optionnelle (330) sur la somme de l'épaisseur de la couche diélectrique (230) et de l'épaisseur de la couche diélectrique optionnelle (330) est compris entre 15% et 30%.
- [Revendication 10] Le dispositif à ondes élastiques de surface selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 9, dans lequel la couche piézoélectrique comprend une juxtaposition d'une couche de tantalate de lithium LiTaO_3 et d'une couche de niobate de lithium LiNbO_3 .
- [Revendication 11] Le dispositif à ondes élastiques de surface selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 10, dans lequel la couche métallique (220) comprend des surfaces métallisées séparées d'une distance inférieure ou égale à la distance interdigitale.
- [Revendication 12] Dispositif (900) de filtrage à ondes élastiques de surface comprenant le dispositif à ondes élastiques de surface selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 11.
- [Revendication 13] Procédé (1100) de fabrication du dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes 1 à 12, comprenant une étape (1150) de collage direct.