

DESCRIPTION

TITRE : DISPOSITIF A ONDES ÉLASTIQUES DE SURFACE A ELECTRODES ENCASTRÉES DANS UNE COUCHE PIEZOELECTRIQUE, CONCEPTION ET FABRICATION DE CELUI-CI

5

DOMAINE TECHNIQUE

Le domaine de l'invention est celui des dispositifs à ondes élastiques de surface (dispositifs SAW pour Surface Acoustic Wave en terminologie anglaise) à structures composites intégrant des électrodes encastrées dans une couche mince de matériau piézoélectrique.

10

TECHNIQUE ANTERIEURE

15

Les dispositifs à ondes élastiques de surface, 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 à retard ou encore de transformateurs.

20

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.

25

Par conséquent, lorsqu'un signal électrique alternatif est appliqué à une ou plusieurs électrodes en contact avec une couche piézoélectrique, un signal mécanique (c'est-à-dire une oscillation ou une vibration) est généré au niveau de ce matériau piézoélectrique : le signal électrique est transformé en un signal mécanique.

30

Le signal mécanique se propageant 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

35

du dispositif à ondes élastiques et d'autres structures constituant le dispositif.

Les dispositifs à ondes élastiques exploitent cette dépendance en fréquence pour fournir une ou plusieurs fonctions
5 au moyen de résonateurs à ondes élastiques de surface (SAW en terminologie anglaise, pour Surface Acoustic Wave) 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
10 applications dans les télécommunications.

Un filtre SAW comprend au minimum un transducteur à ondes élastiques de surface, potentiellement entouré de miroirs réfléchissants constitués d'électrodes agencées périodiquement et satisfaisant la condition dite de Bragg, formant un résonateur
15 par réflexion des ondes émises par le transducteur en phase vers ce dernier. Le filtre peut être avantageusement composé d'une combinaison de tels résonateurs, il peut également présenter au moins un transducteur dit d'entrée et au moins un transducteur dit de sortie. Il peut exploiter des couplages électriques ou
20 élastiques entre résonateurs ou transducteurs. Sa réponse temporelle peut-être finie (cas des filtres transverses classiques) ou infinie (cas des filtres à résonateurs). Dans tous les cas, la personne du métier désigne indistinctement ces structures comme des filtres SAW.

25 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, le facteur de qualité Q , la bande passante, les réponses parasites, la suppression de résonances
30 d'ordres plus élevés que la résonance employée, ou encore la dépendance en température du mode exploité.

Le document de brevet WO 2021/053401 divulgue un transducteur SAW comprenant des électrodes formant des peignes

interdigités et ayant la particularité d'être encastrées dans la couche piézoélectrique, comme illustré par la figure 1.

L'impédance acoustique de ces électrodes est inférieure à celle de la couche piézoélectrique, de manière à contenir la propagation d'un mode de cisaillement essentiellement dans le volume des électrodes par réflexion contre les parois des électrodes à une fréquence plus élevée que celle du mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique, ce mode étant désigné par « mode d'électrode », ou « electrode mode » en terminologie anglaise.

La configuration en peignes interdigités des électrodes et l'excitation au moyen de polarités opposées de deux doigts adjacents des peignes permet cependant au mode d'électrode de générer, dans la couche piézoélectrique, des ondes de cisaillement propagatives cohérentes menant à un phénomène de résonance pour une longueur d'ondes élastiques opérationnelle λ .

La longueur d'ondes élastiques opérationnelle λ du transducteur est liée à la fréquence de résonance f_r de ce transducteur par la relation $f_r = v/\lambda$, v représentant la vitesse de propagation dans la couche piézoélectrique.

Un transducteur SAW du document de brevet WO 2021/053401 permet d'employer des fréquences plus élevées que celles employées dans les transducteurs SAW conventionnels, d'ordinaire basés sur des électrodes en couches minces situées en surface de la couche piézoélectrique et pour lesquelles les ondes élastiques ont des fréquences découlant des modes propres de cette dernière. Dans la suite de ce document, les mentions à des dispositifs ou des transducteurs SAW conventionnels feront références à de tels transducteurs, basés sur des électrodes en couches minces situées en surface de la couche piézoélectrique.

En effet, la fréquence de résonance f_r du mode d'électrode est définie par la résonance des ondes élastiques dans les volumes des électrodes, qui se produit à une fréquence plus

élevée que celles des modes propres de la couche piézoélectrique des dispositifs conventionnels.

Cependant, d'autres caractéristiques que la fréquence de résonance f_r sont importantes en vue d'applications pratiques, en particulier la pureté de la réponse en fréquence, et l'homme du métier est en recherche d'optimisation et/ou d'alternatives quant au choix des matériaux aptes à former le substrat d'un transducteur SAW pour employer un mode d'électrode.

10

EXPOSE DE L'INVENTION

Un premier but de l'invention est de fournir des dispositifs à ondes élastiques de surfaces capables d'employer un mode d'électrode et de présenter des performances acceptables en vue d'applications pratiques, avec en particulier une pureté spectrale de la réponse en fréquence acceptable du point de vue des applications pratiques et conditionnée par l'atténuation du mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique par le substrat.

Un deuxième but de l'invention est de fournir un procédé de choix d'un substrat adapté à un dispositif SAW comportant des électrodes encastrées dans une couche piézoélectrique et destiné à fonctionner par excitation d'un mode élastique propre à ces électrodes.

Un troisième but de l'invention est de fournir un procédé de fabrication intégrant le choix d'un substrat adapté dans la fabrication d'un dispositif SAW.

A ces effets, l'invention concerne un dispositif à ondes élastiques de surface comprenant une couche piézoélectrique, des électrodes encastrées dans la couche piézoélectrique et un substrat supportant la couche piézoélectrique et les électrodes, le substrat vérifiant les deux conditions suivantes :

- une atténuation d'un mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique est inférieure à $0,1 \text{ dB}/\lambda$; et

- un rapport de célérités entre une célérité d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat et une célérité d'un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique est plus petit qu'une valeur
5 prédéterminée de rapport de célérités égale à 1,

le substrat étant choisi parmi l'arséniure de gallium et un verre ayant un module d'Young compris entre 60 GPa et 180 GPa, un coefficient de poisson compris entre 0,15 et 0,35, et une masse volumique comprise entre 2000 kg/m³ et 6000 kg/m³.

10 Un tel dispositif SAW à électrodes encastrées et destiné à fonctionner par excitation d'un mode élastique propre de ces électrodes pourra fonctionner de manière satisfaisante s'il emploie un substrat choisi de manière telle que, en combinaison avec une couche piézoélectrique et des électrodes encastrées,
15 les deux conditions sur l'atténuation et le rapport de célérités définies ci-dessus sont respectées, c'est-à-dire que le mode d'électrode qui se propage est prépondérant par rapport au mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique.

Le respect de la condition sur l'atténuation, ou pertes par
20 propagation, assure que le substrat est capable d'accéder au mode élastique d'électrode, c'est-à-dire que le mode élastique d'électrode pourra effectivement être excité et se propager convenablement dans la couche piézoélectrique, et être utilisé dans des dispositifs SAW tels que décrits ci-dessus, comprenant
25 une électrode encastrée dans la couche piézoélectrique.

Un avantage de ce mode élastique d'électrode est qu'il permet d'accéder à des fréquences de travail relativement hautes (par exemple supérieures à 3 GHz), et ceci pour des dispositifs ne requérant pas des méthodes de fabrication se situant aux
30 limites de ce qui est actuellement techniquement réalisable, et dont la fiabilité et la robustesse sont assurées.

Selon d'autres caractéristiques non limitatives de l'invention, prises seules, ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- un rapport d'une atténuation du mode fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique sur l'atténuation du mode élastique d'électrode est supérieur à 10 ;

5 - les électrodes traversent entièrement la couche piézoélectrique ;

- le substrat est formé de verre ayant un module d'Young compris entre 60 GPa et 80 GPa, un coefficient de poisson compris entre 0,15 et 0,25, et une masse volumique comprise entre 2100 kg/m³ et 2400 kg/m³ ;

10 - le substrat est formé d'arséniure de gallium.

L'invention s'étend à un **procédé de détermination** de l'adaptation d'un substrat à un dispositif à ondes élastiques de surface comprenant une couche piézoélectrique, des électrodes encastrées dans la couche piézoélectrique et ledit substrat, le
15 procédé étant mis en œuvre au moyen d'un système informatique et comprenant l'étape d'émettre un signal représentatif d'une adaptation du substrat au dispositif à ondes élastiques de surface, lorsque :

20 - une atténuation d'un mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique est inférieure à 0,1 dB/ λ ; et

- un rapport de célérités entre une célérité d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat et une célérité d'un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique est plus petit qu'une valeur
25 prédéterminée de rapport de célérité égale à 1.

Selon d'autres caractéristiques non limitatives de l'invention, prises seules, ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

30 - le système informatique comprend une unité informatique de calcul et une mémoire informatique fonctionnellement en communication avec l'unité de calcul informatique et stockant une base de données stockant des paramètres de géométrie et de nature des électrodes, de la couche

piézoélectrique, et du substrat, l'unité de calcul informatique mettant en œuvre les étapes suivantes :

- 5 - récupérer dans la base de données de la mémoire informatique des données incluant des paramètres de géométrie et de nature des électrodes, de la couche piézoélectrique, et du substrat ;
- calculer une atténuation d'un mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique, à partir des données récupérées ;
- 10 - comparer l'atténuation du mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique à une valeur prédéfinie d'atténuation de $0,1 \text{ dB}/\lambda$;
- calculer un rapport de célérités entre un mode élastique volumique de cisaillement du substrat sur un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique, à partir des données récupérées ;
- 15 - comparer le rapport de célérités à une valeur prédéterminée de rapport de célérités ;
- 20 - émettre le signal représentatif d'une adaptation du substrat au dispositif à onde élastique de surface, lorsque :
 - 25 - l'atténuation du mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique est plus petite que la valeur prédéfinie d'atténuation ; et
 - le rapport de célérités est plus petit que la valeur prédéterminée de rapport de célérité.

30 Selon d'autres caractéristiques non limitatives de l'invention, s'appliquant au dispositif ainsi qu'au procédé, prises seules ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- la valeur prédéterminée de rapport de célérités est égale à $0,9$;

- l'atténuation *Attn* du mode élastique d'électrode est définie par la formule $Attn = -40\pi \frac{\pi}{\pi - \Delta} \frac{f_h - f_b}{f_h + f_b} \log(e)$ où, pour une excitation des électrodes générant un mode propagatif d'une onde élastique de cisaillement, Δ est le coefficient de réflexion acoustique par électrode, la fonction log représente le logarithme décimal tel que $\log(e) \sim 0,434$ et f_h et f_b sont des fréquences associées à une résonance de l'onde élastique de cisaillement auxquelles une susceptance électrique du dispositif à ondes élastiques atteint respectivement un maximum et un minimum.

L'invention s'étend également à un procédé de fabrication du dispositif SAW à électrodes encastrées dans la couche piézoélectrique, procédé comprenant ledit procédé de détermination.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

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 :

[Fig. 1] La figure 1 illustre schématiquement en vue plane un transducteur SAW avec des électrodes encastrées dans une couche piézoélectrique ;

[Fig. 2] La figure 2 illustre schématiquement le transducteur SAW de la figure 1 selon une vue en coupe de ce transducteur selon le plan passant par le segment indiqué par Y-Y' sur la vue plane et perpendiculaire à celle-ci ;

[Fig. 3] La figure 3 illustre une géométrie possible des électrodes du transducteur SAW de la figure 1, utilisée pour la modélisation informatique de ce transducteur ;

[Fig. 4] La figure 4 montre un graphe de simulation de l'admittance électrique d'un résonateur SAW centré sur la résonance d'un mode d'électrode ;

5 [Fig. 5] La figure 5 montre un graphe de simulation de l'admittance électrique d'un transducteur SAW montrant les effets d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat et d'un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique ;

[Fig. 6] La figure 6 illustre un filtre SAW en échelle ;

10 [Fig. 7] La figure 7 montre une fonction de transfert théorique d'un premier exemple de filtre en échelle ;

[Fig. 8] La figure 8 montre une fonction de transfert théorique d'un deuxième exemple de filtre en échelle ;

15 [Fig. 9] La figure 9 montre un diagramme d'évaluation d'un substrat pour un dispositif SAW ;

[Fig. 10] La figure 10 illustre un dispositif de mise en œuvre d'un procédé correspondant au diagramme de la figure 9 ; et

[Fig. 11] La figure 11 illustre un procédé de fabrication d'un dispositif SAW.

20

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

La fréquence de travail des dispositifs à ondes élastiques de surface (dispositifs SAW) est définie par la fréquence de synchronisme des transducteurs.

25 Afin d'augmenter la fréquence de travail des dispositifs à ondes élastiques de surface, différentes approches peuvent être envisagées.

Une première approche consiste à diminuer la longueur d'onde des ondes élastiques employées dans les dispositifs, la fréquence étant inversement proportionnelle à cette longueur d'ondes.

Cependant, cette méthode est limitée par les frontières techniques actuelles de la lithographie UV en usage dans

l'industrie des filtres SAW qui ne permettent pas de fabriquer des électrodes d'une largeur inférieure à quelques centaines de nanomètres, la longueur d'ondes mentionnée ci-dessus étant égale à deux fois la période p des électrodes interdigitées des dispositifs SAW.

En outre, des problèmes de stabilité structurelle des électrodes peuvent également apparaître : la tenue en puissance de ces dispositifs est insuffisante pour satisfaire aux besoins en courant en raison de la petite taille des électrodes et de la densité de puissance qui en découle.

Une seconde approche pour augmenter la fréquence de fonctionnement des dispositifs SAW consiste à augmenter la célérité des ondes élastiques dans le dispositif, la fréquence étant proportionnelle à cette célérité.

Cependant, la célérité des ondes élastiques dans les dispositifs SAW est limitée par les propriétés des matériaux servant de substrat.

Afin de contourner cette limitation, on peut envisager, par exemple, l'utilisation d'ondes guidées au moyen de substrats composites.

La solution envisagée dans le cadre du présent document repose sur l'intégration des électrodes dans la couche piézoélectrique afin d'augmenter la célérité du mode de travail, c'est-à-dire la célérité de l'onde élastique exploitée dans le dispositif SAW considéré.

Il est entendu dans ce document qu'une couche piézoélectrique est une couche constituée d'un ou plusieurs matériaux piézoélectriques c'est-à-dire une couche d'un ou plusieurs matériaux possédant des caractéristiques piézoélectriques.

On considère une paire d'électrodes interdigitées (IDTs pour Inter-Digitated Transducer en terminologie anglaise) de formes générales similaires à celles utilisées dans un transducteur SAW conventionnel avec des électrodes reposant sur

la couche piézoélectrique, à la différence près que les électrodes sont ici encastrées dans la couche piézoélectrique.

Grâce à l'intégration des IDTs dans la couche piézoélectrique, un mode élastique de cisaillement majoritairement confiné dans chacune des électrodes (appelé "mode d'électrode") peut être excité. L'impédance acoustique de ces électrodes est inférieure à celle de la couche piézoélectrique.

Cette onde est polarisée parallèlement au substrat et perpendiculairement aux parois latérales des électrodes et produit un déplacement de cisaillement dans la direction orthogonale à la direction de propagation, avec des avantages sensibles par rapport aux ondes de surfaces employées conventionnellement, particulièrement en matière de fréquence atteignable pour un mode élastique propagatif pour une géométrie et des dimensions données d'un transducteur SAW, comme détaillé dans le document de brevet WO21053401.

Un problème à résoudre est qu'il n'existe pas de standard ou de table de caractéristiques de matériaux auxquels se référer pour déterminer les matériaux adaptés à la fabrication d'un tel transducteur.

Le choix d'un substrat est particulièrement critique, puisqu'il conditionne la possibilité même d'employer le transducteur selon le mode d'électrode et, au-delà, les performances du dispositif.

Dans ce contexte, les inventeurs de la présente invention ont testé de nombreux matériaux en tant que candidats pour servir de substrat, et recherché quelles caractéristiques pouvaient servir de critères de sélection.

Ainsi, les inventeurs ont pu déterminer des caractéristiques s'avérant prédictives de l'adéquation d'un matériau de substrat à un dispositif SAW destiné à mettre en œuvre un mode d'électrode.

Deux caractéristiques ont été isolées, permettant de sélectionner un substrat de manière telle qu'un dispositif SAW comprenant le substrat sélectionné sera effectivement capable de mettre convenablement en œuvre un mode d'électrode.

5 On entend par « convenablement » le fait que le mode d'électrode se propage de façon prépondérante par rapport au mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique, c'est-à-dire que le rapport entre l'atténuation (ou coefficient d'atténuation) du mode fondamental de la couche piézoélectrique
10 sur l'atténuation du mode d'électrode est préférablement supérieur à 10, plus préférablement supérieur à 50, encore plus préférablement supérieur à 100. Dans ces conditions, il est possible d'exploiter un mode d'électrode présentant une atténuation inférieure ou égale à celle d'un mode SAW dans un
15 transducteur conventionnel.

Comme illustré par les figures 1 et 2, les dispositifs SAW
100 considérés en exemple consistent en un transducteur SAW constitué d'une couche piézoélectrique 120 d'épaisseur h , d'une première et d'une deuxième électrodes 150A et 150B
20 interdigitées, encastrées dans la couche piézoélectrique 120 et de hauteur h correspondant ici à l'épaisseur de la couche piézoélectrique, et d'un substrat 130 supportant la couche piézoélectrique et les électrodes.

Bien que les électrodes soient de préférence des électrodes
25 qui traversent entièrement la couche piézoélectrique et sont de la même épaisseur que celle-ci, c'est-à-dire qu'elles sont en contact direct avec le substrat 130, ou avec une couche intermédiaire interposée entre celui-ci et la couche piézoélectrique, et ne dépassent pas en hauteur la couche
30 piézoélectrique 120, comme illustré par les figure 2 et 3, d'autres géométries sont acceptables tant que le mode d'électrode peut exciter la couche piézoélectrique : il suffit que les électrodes soient partiellement traversantes vis-à-vis de la couche piézoélectrique, elles pourraient également

dépasser en hauteur la couche piézoélectrique. Elles pourraient ainsi traverser entièrement la couche piézoélectrique et dépasser celle-ci en hauteur.

Dans le cas d'une électrode non traversante, des charges
5 électriques qui n'apparaissent pas dans le cas où l'électrode est traversante apparaîtront sous les électrodes. Cela signifie que la contribution globale des charges d'une électrode à l'autre dans le réseau interdigité périodique peut s'avérer diminuée par rapport au cas où l'électrode est traversante. En conséquence,
10 un dispositif SAW muni d'électrodes traversantes présentera un couplage électromécanique plus fort, donc meilleur, qu'un dispositif SAW muni d'électrodes non traversantes. Des électrodes non traversantes sont aussi susceptibles de coupler un résidu d'un mode fondamental qui pourrait nuire à la pureté
15 spectrale de la réponse en fréquence.

Le présent mode de réalisation présente la situation d'un contact direct entre le substrat 130 et chacune de la couche piézoélectrique 120 et des électrodes 150A et 150B, il est cependant tout-à-fait possible d'avoir une couche intermédiaire
20 recouvrant le substrat et interposée entre celui-ci et chacune de la couche piézoélectrique 120 et des électrodes 150A et 150B, comme déjà mentionné plus haut.

Cette couche intermédiaire peut comprendre par exemple une couche de collage utilisée pour fixer la couche piézoélectrique
25 au substrat, telle qu'une couche de dioxyde de silicium ayant de 10 nm à 400 nm d'épaisseur, préférablement entre 20 nm et 150 nm par exemple 30 nm d'épaisseur sans que cela soit restrictif.

Il est à noter que l'ensemble des calculs et conclusions mentionnés dans cette description s'applique également aux
30 situations où cette couche intermédiaire est présente et pour les différentes géométries d'électrodes mentionnées plus haut, les inventeurs ayant obtenu des conclusions identiques pour les différents cas de figure.

La paire d'électrodes comprend une première électrode 150A et une deuxième électrode 150B chacune avec une face inférieure en contact direct ou non avec une face supérieure 130_{up} du substrat et des faces latérales 150_{lat} en contact direct ou non
5 avec la couche piézoélectrique 120.

De la même manière que pour la couche intermédiaire interposée entre le substrat et la couche piézoélectrique, il est ici envisageable d'avoir une couche interposée entre les électrodes et la couche piézoélectrique ainsi qu'entre la face
10 inférieure des électrodes et le substrat ou la couche intermédiaire, sans que cela influe sur les conclusions des auteurs sur le choix d'un substrat.

Les électrodes 150A et 150B comprennent respectivement des doigts 152A et 152B s'étendant selon une même direction D, de
15 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, de manière à former une paire d'électrodes interdigitées ou IDTs.

La longueur d'ondes élastique λ du mode excité par le
20 transducteur est égale à deux fois la période p, soit 2p, le transducteur fonctionnant dans les conditions de Bragg pour cette longueur d'ondes particulière qui correspond à la longueur d'ondes élastique opérationnelle mentionnée plus haut.

Cette longueur d'onde s'entend également comme la distance
25 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 en vue plane, cet axe étant parallèle à la direction D d'extension des doigts.

La structure décrite par la figure 1 a été modélisée par
30 voie informatique, par exemple par une méthode de calcul par éléments finis, comme illustré par la figure 3, laquelle montre une période du modèle selon la direction x parallèle à la surface du substrat et perpendiculaire à la direction D, seule une petite partie du substrat étant illustrée selon la direction y

perpendiculaire à la surface du substrat, celui-ci étant considéré comme semi-infini.

Cette modélisation a été employée par les inventeurs pour déterminer par simulation informatique les caractéristiques électromécaniques des dispositifs SAW en fonction des matériaux employés, et tester ainsi la pertinence de nombreuses caractéristiques dans la sélection du matériau constituant le substrat.

Les inventeurs ont constaté que deux caractéristiques permettent de prédire l'adéquation d'un substrat de nature donnée à la fabrication d'un dispositif SAW destiné à employer un mode d'électrode, d'une part l'atténuation du mode élastique d'électrode dans le substrat, et d'autre part l'atténuation du mode de cisaillement fondamental dans la couche piézoélectrique, paramètres à simuler en fonction de la couche piézoélectrique et des électrodes.

Première condition - atténuation du mode d'électrode

Un substrat situé sous la couche piézoélectrique peut, s'il est adapté aux caractéristiques (natures, géométries) des électrodes encastrées et de la couche piézoélectrique, améliorer le confinement et la propagation du mode d'électrode, mais tous les matériaux ne sont pas aptes à former un substrat permettant à la structure illustrée par la figure 1 et modélisée comme illustré par la figure 3 d'exploiter convenablement un mode d'électrode, c'est-à-dire que le mode d'électrode présente une atténuation inférieure ou égale à celle du mode exploité dans un dispositif SAW muni d'électrodes surfaciques, par exemple pour la conception de filtres.

Ainsi, le mode d'électrode se propage dans la couche piézoélectrique et s'y atténue par rayonnement dans le substrat, d'où l'importance de celui-ci dans les caractéristiques du dispositif.

Parmi les caractéristiques considérées et utilisées par les inventeurs pour simuler le comportement de dispositifs SAW, il s'est avéré que ceux dont le substrat est tel que l'atténuation du mode d'électrode dans la couche piézoélectrique est inférieure à la valeur limite d'atténuation de 0,1 dB/ λ , 5 préférablement 0,05 dB/ λ , plus préférablement 0,01 dB/ λ , sont les substrats permettant au dispositif d'exploiter convenablement un mode d'électrode. Cette valeur limite d'atténuation a été choisie de manière telle qu'un dispositif SAW conçu pour fonctionner avec un mode d'électrode et qui 10 comprend un substrat en adéquation avec les caractéristiques des électrodes et de la couche piézoélectrique, ce qui permet d'atteindre ce critère, ait des performances au moins équivalentes aux performances typiques d'un dispositif SAW conventionnel reposant sur l'exploitation d'un mode de la couche 15 piézoélectrique au moyen d'électrodes surfaciques, avec en outre la possibilité de fonctionner à des fréquences plus élevées grâce au fonctionnement reposant sur le mode d'électrode. On doit ici comprendre qu'une atténuation d'un mode élastique d'électrode d'un dispositif SAW selon l'invention présente une atténuation inférieure ou égale à l'atténuation d'un mode d'une couche 20 piézoélectrique excité au moyen d'électrodes de surface.

Ainsi, les substrats amenant, en adéquation avec des électrodes et une couche piézoélectrique données, à une 25 atténuation du mode d'électrode dans la couche piézoélectrique inférieure ou égale à la valeur limite d'atténuation de 0,1 dB/ λ , préférablement 0,05 dB/ λ , plus préférablement 0,01 dB/ λ , sont retenus dans le cadre de la présente invention comme aptes à l'excitation du mode d'électrode, dans le sens où les 30 performances attendues en terme de l'atténuation du mode d'électrode sont au moins équivalentes à celle d'un dispositif SAW conventionnel reposant sur l'exploitation d'un mode de la couche piézoélectrique au moyen d'électrodes surfaciques.

A l'inverse, les substrats qui, combinés à des électrodes et une couche piézoélectrique donnée, amènent à une atténuation du mode d'électrode dans la couche piézoélectrique supérieure à la valeur limite d'atténuation de 0,1 dB/ λ sont rejetés, considérés comme impropres à l'excitation et l'exploitation d'un mode d'électrode dans un dispositif SAW comprenant ces électrodes et cette couche piézoélectrique. En effet, une onde acoustique de surface est, dans une telle configuration, trop atténuée pour se propager convenablement dans le réseau d'électrodes. L'utilisation d'un tel dispositif présentant cette configuration pour réaliser un filtre par exemple est impossible, car présentant en particulier des pertes d'insertion trop importantes.

Un mode de calcul de l'atténuation est détaillé dans la thèse de doctorat de Y. Fusero « Etude théorique et expérimentale de dispositifs à ondes de surface à haute vitesse et fort couplage : application aux filtres télécom haute fréquence », Université de Franche-Comté, pp. 74-75, 2001.

La figure 4 montre un graphe de simulation de l'admittance électrique d'un transducteur SAW en échelles linéaires avec, en fonction de la fréquence indiquée en abscisse et s'étendant de 2,36 à 2,37 GHz, une conductance G et la susceptance B associée indiquées en Siemens par mètre en ordonnée et s'étendant entre -1×10^{10} S/m et 2×10^{10} S/m.

Le pic de résonance de la conductance G est associé à un minimum et à un maximum de la susceptance B aux fréquences respectives f_h et f_b situés de part et d'autre du pic.

L'atténuation du mode d'électrode dans la couche piézoélectrique, désigné par *Attn* par la suite, peut s'exprimer par l'équation Eq. 1 suivante :

$$Attn = -40\pi \frac{\pi}{\pi - \Delta} \frac{f_h - f_b}{f_h + f_b} \log e \quad \text{Eq. 1}$$

dans laquelle Δ est le coefficient de réflexion par électrode, f_h et f_b sont respectivement les fréquences du maximum et du

minimum de la susceptance (partie imaginaire de l'admittance) associés au dispositif SAW considéré, comme illustré par la figure 4.

5 **Deuxième condition - atténuation du mode de cisaillement fondamental**

Le respect de la première condition assure qu'un mode d'électrode peut être effectivement excité dans un dispositif SAW et se propager dans des conditions similaires à ou proches
10 de celles d'une onde élastique excitée par un dispositif SAW conventionnel, conçu pour fonctionner avec un mode de la couche piézoélectrique excité par des électrodes surfaciques.

Cependant, ce seul critère ne garantit pas l'exploitabilité pratique de ce mode.

15 En effet, la réponse générale du dispositif ainsi que la pureté de la réponse en fréquence conditionnent ses performances pour des applications pratiques telles que des opérations de filtrage de signaux de télécommunication.

Afin d'obtenir une réponse en fréquence de pureté
20 acceptable, il est en particulier nécessaire de supprimer le mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique.

Cette suppression peut se faire par atténuation de ce mode dans le substrat, et peut s'évaluer au moyen d'une formule identique à l'équation Eq. 1 ci-dessus, appliquée cette fois au
25 mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique.

Il a été déterminé à la suite de nombreuses simulations que l'atténuation du mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique par le substrat devait être supérieure ou égale à 1 dB/ λ pour que le dispositif SAW ait une réponse en fréquence
30 de pureté acceptable.

Cette condition traduit le fait qu'un substrat adapté à une couche piézoélectrique donnée permet une atténuation suffisamment forte du mode de cette couche piézoélectrique pour que ce mode soit absorbé par le substrat et ne se propage pas

dans la couche piézoélectrique, ce qui aurait des effets inacceptables sur la pureté de la réponse en fréquence, en particulier la présence d'un deuxième pic de conductance avec un couplage élevé.

5 La valeur de $1 \text{ dB}/\lambda$ représente une valeur limite à laquelle on peut encore avoir une superposition de modes susceptibles de produire des réponses parasites.

 Comme déjà mentionné, on peut calculer à l'aide de l'équation 1 cette atténuation de la même manière que
10 l'atténuation du mode d'électrode.

 Alternativement, le respect de cette condition, qui porte sur un critère d'atténuation, peut se vérifier au moyen d'un critère portant sur le rapport de la célérité $C(\text{Subst})$ d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat sur la célérité
15 $C(\text{Piezo})$ du mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique.

 Ainsi, avec un substrat dans lequel ce rapport $C(\text{Subst})/C(\text{Piezo})$ est supérieur ou égal à 1 (célérité d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat supérieure ou
20 égale à la célérité d'un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique), le mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique aura tendance à être guidé dans la couche piézoélectrique plutôt qu'être absorbé par le substrat, et aura donc tendance à
25 détériorer la réponse en fréquence du dispositif considéré, en particulier sa pureté spectrale.

 Un tel substrat sera rejeté comme impropre à assurer un fonctionnement satisfaisant du dispositif considéré.

 A l'inverse, un substrat dans lequel ce rapport
30 $C(\text{Subst})/C(\text{Piezo})$ est inférieur à 1 (célérité d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat inférieure à la célérité du mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique) propage le mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique dans le volume du

substrat et celui-ci absorbe le mode, l'empêchant de détériorer la réponse en fréquence du dispositif considéré.

Un tel substrat pourra être retenu pour la fabrication et la mise en œuvre du dispositif considéré.

5 Plus le rapport de célérités décrit précédemment sera petit, plus le rayonnement dans le substrat du mode de la couche piézoélectrique sera fort et meilleure sera la pureté spectrale de la réponse en fréquence du dispositif.

Même si un rapport de 1 peut être considéré comme acceptable
10 pour certaines applications, il est préférable de retenir un rapport plus petit que 1, un rapport de 0,9 permettant déjà une amélioration nette de la réponse en fréquence et donc des performances du dispositif.

Les célérités des modes peuvent être déterminées par mesures
15 sur une ou des structures de test sur le substrat.

Alternativement, les célérités peuvent être déterminées par une méthode de calcul par éléments finis, et plus spécifiquement une méthode FEM-BEM, Finite Element Method - Boundary Element Method en terminologie anglaise, modélisant en deux dimensions
20 une période d'un transducteur SAW donné en tenant compte des effets de rayonnement dans le substrat, de géométrie telle qu'illustré par la figure 3.

Une méthode de calcul par éléments finis permet de prendre en compte l'encastrement des électrodes dans la couche
25 piézoélectrique ainsi que l'effet de masse des électrodes.

La réponse en fréquences du transducteur SAW donné ayant été calculée selon la méthode ci-dessus, on peut obtenir la célérité d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat et la célérité d'un mode élastique fondamental de
30 cisaillement de la couche piézoélectrique de la formule Eq. 2 ci-dessous :

$$c = \lambda \times f \quad \text{Eq. 2}$$

où c représente la célérité d'une onde considérée, λ sa longueur d'ondes et f sa fréquence.

La longueur d'ondes λ est déterminée par la géométrie des électrodes du transducteur SAW donné et la fréquence du mode considéré, cette fréquence pouvant s'extraire de la réponse en fréquences de ce transducteur, comme illustré par la figure 5.

5 La figure 5 montre, pour un transducteur SAW donné illustré par la figure 1, un graphe de simulation de l'impédance électrique d'un transducteur SAW en échelle linéaire en abscisse et en échelle logarithmique en ordonnée avec, en fonction de la fréquence indiquée en abscisse et s'étendant de 2,2 à 2,6 GHz,
10 une conductance G et la susceptance B associée indiquées en Siemens par mètre en ordonnée, les ordonnées visibles sur le graphe s'étendant entre 100 S/m et 1×10^{11} S/m.

Les signatures particulières du mode élastique volumique de cisaillement du substrat et d'un mode élastique fondamental de
15 cisaillement de la couche piézoélectrique sont indiquées respectivement par BS et FS sur le graphe.

On peut tirer de ce graphe la fréquence du mode « Bulk Shear » à environ 2,55 MHz et la fréquence du mode « Fundamental Shear » à environ 2,36 MHz, qui permettent de calculer les
20 célérités de ces modes à partir de l'équation Eq. 2 dans ce dispositif SAW donné.

Procédé d'évaluation d'un substrat

Sur la base des conditions d'acceptation d'un substrat
25 détaillées ci-dessus, on peut détailler un procédé 900 d'évaluation d'un matériau pour son utilisation en tant que substrat dans un dispositif SAW à électrodes encastrées dans une couche piézoélectrique, procédé illustré par le diagramme de la figure 9.

30 Un tel procédé est de préférence mis en œuvre au moyen d'un système informatique 1000 illustré par la figure 10, comprenant une unité informatique de calcul 1010 et une mémoire informatique 1020 fonctionnellement en communication avec l'unité de calcul informatique et stockant une base de données stockant des

paramètres de géométrie et de nature des électrodes, de la couche piézoélectrique, et du substrat.

A une étape 910, l'unité informatique 1010 récupère dans la base de données 920 des données incluant des paramètres de
5 géométrie et de nature des électrodes, de la couche piézoélectrique, et du substrat.

Ces données incluent en particulier les caractéristiques du matériau considéré pour le substrat : sa nature et, le cas échéant, son orientation cristallographique.

10 A une étape 920, l'unité informatique calcule une atténuation d'un mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique à partir des données récupérées à l'étape 910.

A une étape 925, l'unité informatique compare l'atténuation calculée à l'étape 920 à une valeur prédéfinie d'atténuation.

15 Si l'atténuation du mode élastique d'électrode est plus grande ou égale à la valeur prédéfinie d'atténuation, alors l'unité informatique émet un signal R1 de rejet du substrat, celui-ci n'étant pas apte à permettre au dispositif SAW de mettre en œuvre un mode d'électrode par excitation acousto-électrique.

20 Si l'atténuation du mode élastique d'électrode est plus petite que la valeur prédéfinie d'atténuation (situation indiquée par « Y »), alors l'unité informatique émet un signal A1 d'acceptation partielle du substrat, celui-ci respectant au moins l'une des conditions nécessaires à son acceptation, qui
25 est ici celle de son aptitude à permettre au dispositif SAW de mettre en œuvre un mode d'électrode par excitation acousto-électrique.

Cette valeur prédéfinie d'atténuation peut être 1 dB/ λ , pour les raisons expliquées plus haut.

30 A une étape 930, l'unité informatique calcule un rapport de célérités entre un mode élastique volumique de cisaillement du substrat sur un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique, à partir des données récupérées.

A une étape 935, l'unité informatique compare le rapport de célérités calculé à l'étape 930 à une valeur prédéterminée de rapport de célérités.

Si le rapport de célérités est plus petit que la valeur
5 prédéterminée de rapport de célérités (situation indiquée par
« Y »), alors l'unité informatique émet un signal A2
d'acceptation partielle du substrat, celui-ci respectant au
moins l'une des conditions nécessaires à son acceptation, qui
est ici celle de son aptitude à atténuer suffisamment le mode de
10 cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique pour que
le dispositif SAW considéré présente des performances
acceptables en termes de pureté de sa réponse en fréquence.

Si le rapport de célérités est plus grand ou égal à la
valeur prédéterminée de rapport de célérités, alors l'unité
15 informatique émet un signal R2 de rejet du substrat, celui-ci
n'étant pas apte à permettre au dispositif SAW de fonctionner de
manière acceptable.

La valeur prédéterminée de rapport de célérités peut être
égale à 1, préférentiellement égale à 0,9 comme expliqué ci-dessus.
20 A une étape 940, l'unité informatique vérifie si les deux
signaux A1 et A2 ont effectivement été émis et, dans ce cas,
émet un signal A représentatif d'une acceptation du substrat
dans le sens où celui-ci remplit les deux conditions nécessaires
pour être considéré comme apte à former un dispositif SAW destiné
25 à fonctionner en mettant en œuvre un mode d'électrode.

Ce procédé d'évaluation d'un substrat permet d'effectuer le
choix d'un substrat à associer à des électrodes et une couche
piézoélectrique données pour obtenir un dispositif SAW destiné
à mettre en œuvre un mode d'électrode, sans avoir à passer par
30 une phase chronophage et coûteuse de fabrication d'échantillons
de test et de caractérisation de ces derniers du point de vue
électro-acoustique, ou permet au moins de cibler le type
d'échantillons à produire.

Il est à noter que ces conditions d'acceptation d'un substrat s'appliquent particulièrement aux cas où les électrodes sont faites d'un métal relativement léger, tel que l'aluminium ou un alliage d'aluminium (par exemple un alliage d'aluminium à 5 2% de cuivre $\text{AlCu}_{2\%}$), et où la couche piézoélectrique est formée de tantalate de lithium LiTaO_3 ou de niobate de lithium LiNbO_3 , selon la géométrie décrite dans les figures 1 et 2.

Cependant, ces conditions restent valides pour d'autres matériaux d'électrodes et de couches piézoélectriques, ainsi 10 qu'à des géométries ne se limitant pas à celles des figures 1 et 2.

Procédé de fabrication d'un dispositif SAW

Le procédé d'évaluation d'un substrat décrit ci-dessus peut 15 être intégré à un procédé 1100 de fabrication d'un dispositif SAW illustré par le diagramme de la figure 11, et dont la première étape 1110 consiste en la sélection du substrat pour un dispositif de caractéristiques déjà partiellement définies, c'est-à-dire pour une géométrie et des matériaux de couches 20 piézoélectriques et d'électrodes déjà fixées.

Cette première étape 1110 peut consister en la mise en œuvre du procédé 900 illustré par la figure 9.

A une étape 1120, une couche piézoélectrique est formée directement sur un substrat retenu comme étant acceptable à 25 l'issue de l'étape 1110.

Alternativement, à l'étape 1120, la couche piézoélectrique peut être obtenue séparément, puis fixée au substrat par collage moléculaire.

A une étape 1130, la couche piézoélectrique est préparée 30 pour accueillir les électrodes, par exemple par gravure d'un motif prédéterminé dans l'épaisseur de la couche piézoélectrique.

A une étape 1140, les électrodes sont formées de manière à être encastrées dans la couche piézoélectrique selon des procédés conventionnels.

En procédant selon ce procédé, on peut s'attendre à obtenir
5 un dispositif SAW apte à exploiter un mode d'électrode d'excitation électro-acoustique.

Exemples de substrats

Le respect des première et seconde caractéristiques
10 définies ci-dessus a été vérifié pour un ensemble de transducteurs de géométrie illustrée par les figures 1 et 2.

Dans une première série de transducteurs, un substrat de verre de quartz, ou « fused quartz » en terminologie anglaise,
15 a été considéré en association avec des électrodes d'un alliage d'aluminium à 2% de cuivre $\text{AlCu}_{2\%}$ et une couche piézoélectrique constituée de tantalate de lithium LiTaO_3 ou de niobate de lithium LiNbO_3 , pour des transducteurs SAW de conçus pour fonctionner à 4,8 GHz ou 2,4 GHz.

20 Les résultats des simulations sont exposés dans la table 1 ci-dessous.

[Table 1]

Matériau piézoélectrique et fréquence de travail	LiTaO_3 4,8 GHz	LiTaO_3 2,4 GHz	LiNbO_3 4,8 GHz	LiNbO_3 2,4 GHz
C(Subst) en m/s	3766			
C(Piezo) en m/s	4,658	4,620	3,876	3,797
C(Subst)/C(Piezo)	0,81 (OK)	0,82 (OK)	0,97 (OK)	0,99 (OK)
Atténuation (Elec) en dB/ λ	$3,18 \cdot 10^{-3}$ (OK)	$2,54 \cdot 10^{-2}$ (OK)	$9,31 \cdot 10^{-2}$ (OK)	$7,72 \cdot 10^{-2}$ (OK)
Atténuation (Piezo) en dB/ λ	3,61 (OK)	6,12 (OK)	3,06 (OK)	4,09 (OK)
Statut du substrat	OK	OK	OK	OK

C(Subst) et C(Piezo) indiquent respectivement la célérité d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat et la célérité d'un mode élastique fondamental de cisaillement de la
 5 couche piézoélectrique, C(Subst)/C(Piezo) indique le rapport de ces célérités.

Atténuation (Elec) et Atténuation (Piezo) indiquent respectivement les atténuations d'un mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique et du mode fondamental de la
 10 couche piézoélectrique dans le substrat.

Les commentaires (OK) indiquent que le substrat respecte la condition concernée par la case correspondante du tableau, c'est-à-dire l'un des critères d'atténuation ou de rapport de célérités détaillés plus haut.

15 Nous constatons ici qu'il est possible d'utiliser du verre de quartz en tant que substrat pour chacun des transducteurs SAW considérés, ce que le tableau indique par un statut du substrat comme « OK ».

20 Dans une deuxième série de transducteurs, on considère un verre commercial Planoptik Eagle XG présentant un module d'Young de 64 GPa, un coefficient de poisson de 0,2 et une masse volumique de 2200 kg/m³ au lieu du verre de quartz de la première série, les autres paramètres restant les mêmes.

25 Les résultats des simulations sont exposés dans la table 2 ci-dessous.

[Table 2]

Matériau piézoélectrique et fréquence de travail	LiTaO ₃ 4,8 GHz	LiTaO ₃ 2,4 GHz	LiNbO ₃ 4,8 GHz	LiNbO ₃ 2,4 GHz
C(Subst) en m/s	3531			
C(Piezo) en m/s	4,702	4,704	3,966	3,772
C(Subst)/C(Piezo)	0,75 (OK)	0,75 (OK)	0,89 (OK)	0,94 (OK)

Atténuation (Elec) en dB/λ	$3,77.10^{-3}$ (OK)	$1,41.10^{-2}$ (OK)	$9,94.10^{-2}$ (OK)	$4,95.10^{-2}$ (OK)
Atténuation (Piezo) en dB/λ	3,66 (OK)	5,40 (OK)	5,12 (OK)	7,05 (OK)
Statut du substrat	OK	OK	OK	OK

Nous constatons qu'il est possible d'utiliser ce verre en tant que substrat pour chacun des transducteurs SAW considérés.

5 Dans une troisième série de transducteurs, on considère un substrat de quartz de coupe AT (de notation IEEE (YX1)/36°) au lieu du verre de quartz de la première série, les autres paramètres restant les mêmes.

10 Les résultats des simulations sont exposés dans la table 3 ci-dessous.

[Table 3]

Matériau piézoélectrique et fréquence de travail	LiTaO ₃ 4,8 GHz	LiTaO ₃ 2,4 GHz	LiNbO ₃ 4,8 GHz	LiNbO ₃ 2,4 GHz
C(Subst) en m/s	5103			
C(Piezo) en m/s	4,728	4,930	4,242,	4,594
C(Subst)/C(Piezo)	1,08 (NOK)	1,04 (NOK)	1,20 (NOK)	1,11 (NOK)
Atténuation (Elec) en dB/λ	$2,63.10^{-3}$ (OK)	$1,08.10^{-2}$ (NOK)	$7,43.10^{-2}$ (OK)	$2,13.10^{-2}$ (NOK)
Atténuation (Piezo) en dB/λ	$4,39.10^{-3}$ (NOK)	$6,64. 10^{-5}$ (NOK)	$1,17. 10^{-3}$ (NOK)	$6,18. 10^{-3}$ (NOK)
Statut du substrat	NOK	NOK	NOK	NOK

15 Nous constatons ici qu'il n'est possible d'utiliser du quartz de coupe AT en tant que substrat pour aucun des transducteurs SAW considérés, les substrats étant rejetés et leurs statuts étant alors indiqués comme NOK.

En effet, même si la condition sur l'atténuation du mode d'électrode dans le substrat est respectée pour un fonctionnement à 4,8 GHz pour les deux types de couche piézoélectrique (LiTaO₃ et LiNbO₃), la condition sur l'atténuation du mode propre de la couche piézoélectrique n'est pas respectée, comme indiqué par les commentaires (NOK).

Le tableau indique ainsi par (NOK) la violation de la condition sur l'atténuation du mode fondamental de la couche piézoélectrique dans le substrat qui doit être supérieure ou égale à 1 dB/λ pour respecter la condition.

Le tableau indique également par (NOK) la violation de la condition sur les rapports de célérités d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat sur la célérité d'un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique, qui doit être inférieure à 1.

Dans une quatrième série de transducteurs, on considère un substrat de silicium (100) au lieu du verre de quartz de la première série, les autres paramètres restant les mêmes.

Les résultats des simulations sont exposés dans la table 4 ci-dessous.

[Table 4]

Matériau piézoélectrique et fréquence de travail	LiTaO ₃ 4,8 GHz	LiTaO ₃ 2,4 GHz	LiNbO ₃ 4,8 GHz	LiNbO ₃ 2,4 GHz
C(Subst) en m/s	5845			
C(Piezo) en m/s	4,852	5,291	4,359	4,954
C(Subst)/C(Piezo)	1,20 (NOK)	1,10 (NOK)	1,34 (NOK)	1,18 (NOK)
Atténuation (Elec) en dB/λ	2,27.10 ⁻³ (OK)	1,51.10 ⁻¹ (NOK)	7,27.10 ⁻² (OK)	2,47.10 ⁻¹ (NOK)
Atténuation (Piezo) en dB/λ	2,25.10 ⁻⁴ (NOK)	2,06. 10 ⁻⁵ (NOK)	1,25. 10 ⁻⁵ (NOK)	2,20. 10 ⁻⁵ (NOK)
Statut du substrat	NOK	NOK	NOK	NOK

Comme pour le substrat de quartz de coupe AT, nous constatons qu'il n'est possible d'utiliser du silicium (100) en tant que substrat pour aucun des transducteurs SAW considérés, les substrats étant rejetés et leurs statuts étant alors indiqués comme NOK.

Des résultats de calculs complémentaires similaires à ceux présentés ci-dessus ont validé l'emploi des substrats suivants : un substrat d'arséniure de gallium et un verre commercial Planoptik Borofloat présentant un module d'Young de 73 GPa , un coefficient de poisson de 0,23 et une masse volumique de 2380 kg/m³.

D'autres simulations montrent que le choix du substrat en fonction des électrodes et de la couche piézoélectrique n'est absolument pas intuitif. La Table 5 ci-dessous liste des verres et leurs propriétés physiques (Densité ρ , vitesses longitudinale et transversale de propagation du son v_L et v_T , module d'Young E et coefficient de Poisson ν).

[Table 5]

Verre	ρ [kg/m ³]	v_L [m/s]	v_T [m/s]	E [GPa]	ν
Verre A	4360	4127	2414	63	0,24
Verre B	5000	6020	2900	113	0,349
Verre C	2470	5500	3100	60	0,267
Verre D	2440	5565	3408	68	0,2
Pyrex	2230	5710	3494	65	0,201
Verre E	2365	5620	3520	69	0,177
Planoptik Eagle XG	2380	-	3531	73	0,23
Planoptik Borofloat	2200	-	3481	64	0,2

20

La Table 6 et la Table 7 ci-dessous indiquent le résultat de simulations pour des dispositifs munis d'une couche de piézoélectrique de tantale de lithium de 600 nm de hauteur h , et prévus pour fonctionner à une longueur d'onde λ avec des électrodes de hauteur h vérifiant, respectivement, $h/\lambda=15\%$ et

25

h/ λ =30%. Plus spécifiquement, ces tables indiquent pour les verres de la Table 5 associés à des électrodes d'or Au, de molybdène Mo et d'alliage AlCu₂% le rapport C(Subst)/C(Piezo) des célérités C(Subst) d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat et C(Piezo) du mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique, l'atténuation Attn.Elec. du mode élastique d'électrode dans le substrat, l'atténuation Attn.Cis. du mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique, et le rapport Attn.Cis./Attn.Elec. de ces deux dernières.

[Table 6]

Elec- trodes	Verre	C _{vol.sub} /C _{fond.piezo}	Attn.Elec. [dB/ λ]	Attn.Cis. [dB/ λ]	Attn.Cis./Attn.Elec.
AlCu ₂ %	Verre A	0,46	6 (NOK)	-	-
AlCu ₂ %	Verre B	0,51	6,7 (NOK)	-	-
AlCu ₂ %	Verre C	0,65	2,70E-03	11,1	4111,1
AlCu ₂ %	Verre D	0,72	1,80E-02	12,6	700,0
AlCu ₂ %	Pyrex	0,75	2,40E-02	12,8	533,3
Au	Pyrex	1,48 (NOK)	5,37E-02	1,07E-04	1,99E-03 (NOK)
Mo	Pyrex	1,02 (NOK)	1,64 (NOK)	7,37E-05 (NOK)	4,49E-05 (NOK)
AlCu ₂ %	Verre E	0,75	3,00E-02	12,6	420,0
AlCu ₂ %	Planoptik Eagle XG	0,75	1,41E-02	5,4	383,0
AlCu ₂ %	Planoptik Borofloat	0,74	4,24E-03	3,53	832,5
Au	Planoptik Eagle XG	1,49 (NOK)	5,02E-02	1,06E-04 (NOK)	2,11E-03 (NOK)

[Table 7]

Elec- trodes	Verre	C _{vol.sub} /C _{fond.piezo}	Attn.Elec. [dB/ λ]	Attn.Cis. [dB/ λ]	Attn.Cis./Attn.Elec.
AlCu ₂ %	Verre A	0,49	1,9 /NOK	7,5	3,9 (NOK)
AlCu ₂ %	Verre B	0,58	1,9 /NOK	6,5	3,4

					(NOK)
AlCu _{2%}	Verre C	0,66	2,00E-02	8,2	410,0
AlCu _{2%}	Verre D	0,72	1,00E-02	8,4	840,0
AlCu _{2%}	Pyrex	0,75	9,50E-03	8,2	863,2
Au	Pyrex	1,57 (NOK)	4,60E-02	1,13E-03 (NOK)	2,46E-02 (NOK)
Mo	Pyrex	1,04 (NOK)	7,87E-01 /NOK	7,45E-04 (NOK)	9,47E-04 (NOK)
AlCu _{2%}	Verre E	0,75	9,00E-03	8,4	9,33E+02
AlCu _{2%}	Planoptik Eagle XG	0,75	3,77E-03	3,66	970,8
AlCu _{2%}	Planoptik Borofloat	0,74	9,48E-03	5,56	586,5
Au	Planoptik Eagle XG	1,59 (NOK)	4,60E-02	2,45E-06 (NOK)	5,33E-05 (NOK)

Les commentaires « NOK » indiquent que les valeurs associées interdisent au substrat correspondant d'être utilisé pour un dispositif SAW basé sur un mode d'électrode selon les critères de rapport de célérités, d'atténuation du mode élastique d'électrode, d'atténuation du mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique et de rapport des atténuations définis dans le présent document.

Selon les critères définis dans ce document, seuls un substrat constitué de l'un des verres C, D, E, Planoptik Eagle XG, Planoptik Borofloat et du Pyrex, associé à des électrodes constituées d'un alliage d'aluminium à 2% de cuivre AlCu_{2%} permettent d'obtenir une pureté spectrale de la réponse en fréquence telle que le mode de cisaillement fondamental soit atténué (pertes de propagation supérieures à 1 dB/λ), avec de plus un mode d'électrode guidé (pertes de propagation inférieures à 0,1 dB/λ). Pour chaque configuration respectant ces critères, le rapport entre atténuation du mode de cisaillement fondamental et mode d'électrode est, au moins, supérieur à 10.

En outre, le fait que pour un même type de verre, la nature de l'électrode conditionne le respect ou non des critères portant sur (i) l'atténuation d'un mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique et sur (ii) le rapport de célérités entre

un mode élastique volumique de cisaillement du substrat sur un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique indique qu'une adéquation entre le substrat, les électrodes et la couche piézoélectrique est nécessaire. Cette
5 adéquation est contenue dans le respect des deux critères (i) et (ii) rappelés ci-dessus.

Ainsi, ces critères permettent de choisir en fonction les uns des autres les matériaux à employer pour le substrat, les électrodes et la couche piézoélectrique d'un dispositif à ondes
10 élastiques de surface basé sur l'excitation d'un mode d'électrode de manière telle qu'il présente une réponse spectrale suffisamment pure pour répondre à une application envisagée. De plus, il est à noter que les phénomènes mis en œuvre afin d'atténuer le mode de cisaillement fondamental de la
15 couche piézoélectrique n'influent en aucun cas sur le mode d'électrode.

Exemple d'application 1

Afin d'illustrer l'influence du mode de cisaillement
20 fondamental de la couche piézoélectrique dans le cas d'un dispositif résultant d'un choix adéquat de substrat, on a calculé la fonction de transfert théorique (paramètre S_{21}) d'un filtre SAW en échelle 600 conventionnel comportant douze résonateurs
620 identiques montés en échelle (huit en série et quatre en parallèle) entre une entrée 630 et une sortie 640 SAW, comme
25 illustré par la figure 6.

La figure 7 illustre la fonction de transfert théorique d'un tel filtre, formé de résonateurs prévus pour fonctionner à 4,8 GHz et comprenant un substrat de verre de quartz muni d'une
30 couche piézoélectrique de LiTaO_3 et d'électrodes en alliage AlCu_{28} .

Comme indiqué par la table 1, le verre de quartz est un matériau considéré comme acceptable pour former le substrat.

La signature du mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique apparaît à environ 2,4 GHz et augmente la réjection à -34 dB.

5 **Exemple d'application 2**

Afin d'illustrer l'influence du mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique dans le cas d'un dispositif résultant d'un choix inapproprié de substrat, un second exemple d'application reprend l'exemple d'application 1,
10 à la différence près que le substrat des résonateurs est formé de quartz de coupe AT.

Comme vu dans la table 3, le quartz de coupe AT n'est pas considéré comme acceptable pour former le substrat, l'atténuation du mode de cisaillement fondamental de la couche
15 piézoélectrique dans le substrat étant insuffisante.

La figure 8 illustre la fonction de transfert théorique d'un tel filtre.

La signature du mode de cisaillement fondamental de la couche piézoélectrique apparaît à environ 2,4 GHz et augmente la
20 réjection à quasiment 0 dB.

La comparaison de l'exemple d'application 1 rend évidente que l'atténuation du mode de la couche piézoélectrique est insuffisante, largement dégradée par rapport à l'exemple d'application précédent, et vient perturber la réponse du
25 filtre, avec une réjection montant quasiment à 0 dB.

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
30 revendications.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif (100) à ondes élastiques de surface comprenant une couche piézoélectrique (120), des électrodes (150A, 150B) encastrées dans la couche piézoélectrique, et un substrat (130) supportant la couche piézoélectrique et les électrodes, le dispositif étant **caractérisé en ce que** le substrat vérifie les deux conditions suivantes : une atténuation d'un mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique est inférieure à $0,1 \text{ dB}/\lambda$; et un rapport de célérités entre un mode élastique volumique de cisaillement du substrat sur un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique est plus petit qu'une valeur prédéterminée de rapport de célérité égale à 1, le substrat étant choisi parmi l'arséniure de gallium et un verre ayant un module d'Young compris entre 60 GPa et 180 GPa, un coefficient de poisson compris entre 0,15 et 0,35, et une masse volumique comprise entre 2000 kg/m^3 et 6000 kg/m^3 .
2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel un rapport d'une atténuation du mode fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique sur l'atténuation du mode élastique d'électrode est supérieur à 10.
3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, dans lequel les électrodes traversent entièrement la couche piézoélectrique.
4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le substrat est formé de verre ayant un module d'Young compris entre 60 GPa et 80 GPa, un coefficient de poisson compris entre 0,15 et 0,25, et une masse volumique comprise entre 2100 kg/m^3 et 2400 kg/m^3 .
5. Dispositif selon l'une quelconques des revendications 1 à 3, dans lequel le substrat est formé de d'arséniure de gallium.

6. Dispositif selon l'une quelconques des revendications 1 à 5, dans lequel la valeur prédéterminée de rapport de célérités est égale à 0,9.

7. Dispositif selon l'une quelconques des revendications 1 à 6, dans lequel l'atténuation du mode élastique d'électrode est définie par la formule $Attn = -40\pi \frac{\pi}{\pi - \Delta} \frac{f_h - f_b}{f_h + f_b} \log(e)$ où, pour une excitation des électrodes générant un mode propagatif d'une onde élastique de cisaillement, Δ est le coefficient de réflexion acoustique par les électrodes, la fonction log représente le logarithme décimal tel que $\log(e) \sim 0,434$, et f_h et f_b sont des fréquences associées à une résonance de l'onde élastique de cisaillement auxquelles une susceptance du dispositif à ondes élastiques atteint respectivement un maximum et un minimum.

8. Procédé (900) de détermination de l'adaptation d'un substrat à un dispositif à ondes élastiques de surface comprenant une couche piézoélectrique, des électrodes encastrées dans la couche piézoélectrique et ledit substrat, le procédé étant mis en œuvre au moyen d'un système informatique et **caractérisé en ce qu'il** comprend l'étape d'émettre (840) un signal représentatif d'une adaptation du substrat au dispositif à onde élastique de surface, lorsque :

une atténuation d'un mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique est inférieure à 0,1 dB/ λ ; et un rapport entre une célérité d'un mode élastique volumique de cisaillement du substrat et une célérité d'un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique est plus petit qu'une valeur prédéterminée de rapport de célérité égale à 1.

9. Procédé (900) de détermination de l'adaptation d'un substrat à un dispositif à ondes élastiques de surface selon la revendication 8, **caractérisé en ce que** le système informatique (900) comprend une unité informatique de calcul (910) et une mémoire informatique (920) fonctionnellement en communication

avec l'unité de calcul informatique et stockant une base de données stockant des paramètres de géométrie et de nature des électrodes, de la couche piézoélectrique, et du substrat, l'unité de calcul informatique mettant en œuvre les étapes

5 suivantes :

récupérer (810) dans la base de données de la mémoire informatique (920) des données incluant des paramètres de géométrie et de nature de l'électrode, de la couche piézoélectrique, et du substrat ;

10 calculer (820) une atténuation d'un mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique, à partir des données récupérées ;

comparer (825) l'atténuation du mode élastique d'électrode dans la couche piézoélectrique à une valeur prédéfinie d'atténuation

15 de 0,1 dB/ λ ;

calculer (830) un rapport de célérités entre un mode élastique volumique de cisaillement du substrat sur un mode élastique fondamental de cisaillement de la couche piézoélectrique, à partir des données récupérées ;

20 comparer (835) le rapport de célérités à une valeur prédéterminée de rapport de célérités de valeur égale à 1 ; émettre (840) le signal représentatif d'une adaptation du substrat au dispositif à onde élastique de surface, lorsque : l'atténuation du mode élastique d'électrode dans le substrat est

25 plus petite que la valeur prédéfinie d'atténuation ; et le rapport de célérités est plus petit que la valeur prédéterminée de rapport de célérité.

10. Procédé selon la revendications 8 ou 9, dans lequel la valeur prédéterminée de rapport de célérités est égale à 0,9.

30 11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 8 à 10, dans lequel l'atténuation est définie par la formule

$$Attn = -40\pi \frac{\pi}{\pi - \Delta} \frac{f_h - f_b}{f_h + f_b} \log(e) \text{ où, pour une excitation des électrodes générant un mode propagatif d'une onde élastique de}$$

cisaillement, Δ est le coefficient de réflexion acoustique par les électrodes, la fonction $\log$ représente le logarithme décimal tel que $\log(e) \sim 0,434$, et f_h et f_b sont des fréquences associées à une résonance de l'onde élastique de cisaillement auxquelles
5 une susceptance du dispositif à ondes élastiques atteint respectivement un maximum et un minimum.

12. Procédé (1100) de fabrication d'un dispositif à ondes élastiques de surface comprenant une couche piézoélectrique, des électrodes encastrées dans la couche piézoélectrique et un
10 substrat, caractérisé en ce qu'il comprend le procédé (900) de détermination de l'adaptation d'un matériau de substrat selon l'une quelconque des revendications 8 à 11.