

PROCEDE DE CORRECTION D'ÉPAISSEUR D'UNE COUCHE PIEZOELECTRIQUE

DOMAINE DE L'INVENTION

L'invention concerne un système La présente invention concerne un procédé de
5 correction d'épaisseur d'une couche piézoélectrique, ainsi qu'un substrat du type
piézoélectrique sur isolant dont l'épaisseur est corrigée par ledit procédé. L'invention trouve
notamment application dans la fabrication de dispositifs radiofréquence, tels que des
résonateurs ou des filtres.

10 ETAT DE LA TECHNIQUE

Il est connu de fabriquer un dispositif radiofréquence (RF), tel qu'un résonateur ou
filtre, sur un substrat comprenant successivement, de sa base vers sa surface, un substrat
support, généralement en un matériau semi-conducteur tel que du silicium, une ou plusieurs
couches intermédiaires, et une couche piézoélectrique.

15 La couche piézoélectrique est typiquement obtenue par transfert d'un substrat épais
d'un matériau piézoélectrique (obtenu par exemple par découpe d'un lingot) sur un substrat
support, par exemple par un procédé de transfert de couche du type Smart Cut TM. Le
substrat support est typiquement un substrat de silicium comprenant éventuellement une
ou plusieurs couches d'un ou plusieurs autres matériaux.

20 Le transfert de la couche piézoélectrique implique un collage du substrat
piézoélectrique épais sur le substrat support, suivi d'un amincissement du substrat
piézoélectrique épais, de sorte à ne laisser sur le substrat support qu'une couche
piézoélectrique mince, de l'épaisseur souhaitée pour la fabrication du dispositif RF.

Pour une bonne adhésion du substrat piézoélectrique sur le substrat support, on
25 procède généralement à un dépôt d'une couche d'oxyde (par exemple un oxyde de silicium
SiO₂) sur chacun des deux substrats, et on colle lesdits substrats par l'intermédiaire
desdites couches d'oxyde.

Les propriétés de la couche piézoélectrique, tels que le coefficient de couplage
électromécanique, la vitesse de propagation d'ondes acoustiques et le coefficient de
30 température de la fréquence dépendent de l'épaisseur de la couche piézoélectrique.

Il est connu d'ajuster localement l'épaisseur de la couche piézoélectrique par
abrasion par un faisceau d'ions, par exemple des ions d'argon, balayant la surface de la
couche piézoélectrique, afin d'uniformiser cette épaisseur. Ce procédé d'ajustement est
appelé « trimming » en anglais.

35 Cependant, la couche piézoélectrique étant très mince, des irrégularités d'épaisseur
de la ou les couches situées sous la couche piézoélectrique peuvent engendrer des
variations importantes de ces propriétés.

EXPOSE DE L'INVENTION

Un but de l'invention est de mettre à disposition un procédé permettant d'obtenir une distribution homogène d'au moins un parmi les paramètres suivants de la couche piézoélectrique : coefficient de couplage électromécanique, vitesse de propagation d'ondes
5 acoustiques, et coefficient de température de la fréquence.

A cet effet, l'invention propose un procédé de correction d'épaisseur d'une couche piézoélectrique agencée sur un substrat du type piézoélectrique sur isolant, comprenant les étapes suivantes :

- 10 ○ la mesure de l'épaisseur d'au moins une couche intermédiaire localisée entre la couche piézoélectrique et un substrat support,
- la mesure de l'épaisseur de la couche piézoélectrique,
- à partir desdites mesures d'épaisseur de l'au moins une couche intermédiaire et de la couche piézoélectrique et d'un modèle numérique d'au moins une propriété de la
15 couche piézoélectrique en fonction d'une pluralité de couples d'épaisseurs de la couche piézoélectrique et de ladite au moins une couche intermédiaire, le calcul d'une correction d'épaisseur de la couche piézoélectrique pour obtenir une valeur cible de chaque propriété,
- l'application de la correction de l'épaisseur de la couche piézoélectrique par un procédé d'abrasion de manière topographiquement discriminée.

20 Avantageusement, ladite propriété de la couche piézoélectrique est choisie parmi un coefficient de couplage électromécanique, une vitesse de propagation d'ondes et/ou un coefficient de température de la fréquence.

Le choix du ou des propriétés de la couche piézoélectrique peut être réalisé selon l'application à laquelle est destiné le substrat. On peut soit choisir une seule propriété de
25 manière à obtenir une distribution très homogène de cette propriété sur l'étendue du substrat, soit choisir un compromis entre deux ou trois paramètres, de manière que chaque paramètre soit le plus homogène possible sans générer des inhomogénéités importantes pour les autres paramètres respectifs.

De préférence, la mesure de l'épaisseur de l'au moins une couche intermédiaire et
30 de la couche piézoélectrique est effectuée de manière localisée en une pluralité de points de mesure, le procédé comprenant en outre une étape d'interpolation linéaire d'épaisseur de chaque couche entre au moins deux points de mesure. La grille de points de mesure peut être choisie en fonction la technique de mesure et de la précision souhaitée.

De manière avantageuse, le procédé d'abrasion est un procédé de gravure par
35 faisceau d'ions. Le procédé peut comprendre une étape de balayage du faisceau d'ions selon deux axes d'un plan principal de la couche piézoélectrique, dans laquelle la durée d'irradiation par ledit faisceau d'ions sur chaque position est ajustée en fonction de l'épaisseur de la couche piézoélectrique à obtenir.

Avantageusement, la couche intermédiaire comprend une couche diélectrique, un empilement de plusieurs couches diélectriques, une couche métallique et/ou une couche de piégeage de charges électriques.

De préférence, la mesure de l'épaisseur de la couche piézoélectrique et/ou de la
5 couche intermédiaire est effectuée par ellipsométrie et/ou par réflectométrie. L'utilisation de ces techniques permet la mesure simultanée de plusieurs épaisseurs de couches superposées.

L'invention se rapporte aussi à un procédé de fabrication d'un substrat du type piézoélectrique sur isolant, comprenant les étapes suivantes

- 10 ○ la fourniture d'un substrat support,
- la fourniture d'un substrat donneur piézoélectrique,
- le collage du substrat donneur sur le substrat support, une couche intermédiaire étant agencée à l'interface entre le substrat donneur et le substrat support,
- l'amincissement du substrat donneur de sorte à transférer une couche
15 piézoélectrique dudit substrat donneur sur le substrat support,
- la correction de l'épaisseur de ladite couche piézoélectrique par un procédé tel que décrit ci-dessus.

De préférence, l'amincissement du substrat donneur comprend, avant le collage, la formation d'une zone de fragilisation de sorte à délimiter une couche piézoélectrique à
20 transférer, et, après le collage, le détachement du substrat donneur le long de ladite zone de fragilisation.

Dans certains modes de réalisation la mesure de l'épaisseur de l'au moins une couche intermédiaire est effectuée après le transfert de la couche piézoélectrique sur le substrat support.

25 Dans d'autres modes de réalisation, la mesure de l'épaisseur de l'au moins une couche intermédiaire est effectuée avant le collage du substrat donneur sur le substrat support. Cette méthode permet de mesurer également l'épaisseur de couches opaques.

De manière avantageuse, l'au moins une couche intermédiaire comprend : une couche métallique, une couche diélectrique, un empilement de plusieurs couches
30 diélectriques et/ou une couche de piégeage de charges électriques.

Un autre objet de l'invention concerne un substrat du type piézoélectrique sur isolant, comprenant successivement une couche piézoélectrique, une couche intermédiaire et un substrat support, caractérisé en ce que l'épaisseur locale de ladite couche piézoélectrique est ajustée en fonction de l'épaisseur locale de la couche intermédiaire par
35 abrasion de la couche piézoélectrique de manière topographiquement discriminée à partir d'un modèle numérique d'au moins une propriété de la couche piézoélectrique en fonction d'une pluralité de couples d'épaisseurs de la couche piézoélectrique et de ladite au moins une couche intermédiaire, selon un procédé tel que décrit ci-dessus.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée qui va suivre, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

La figure 1 illustre un substrat du type piézoélectrique sur isolant (POI)
5 comprenant un substrat de base, une couche intermédiaire et une couche piézoélectrique.

Les figures 2A à 2E illustrent des étapes d'un procédé de fabrication d'un substrat du type POI comprenant un ajustement d'épaisseur de la couche piézoélectrique selon l'invention.

10 La figure 3 illustre une grille de points de mesure d'épaisseur de la couche intermédiaire.

La figure 4 est une cartographie d'un substrat du type POI, représentant l'épaisseur d'une couche en LiTaO_3 .

15 La figure 5 est un exemple de réflectométrie à deux angles différents sur un substrat POI comprenant une couche intermédiaire transparente.

La figure 6 montre la variation du coefficient de température de la fréquence pour des substrats du type POI présentant différentes épaisseurs d'une couche intermédiaire en LiTaO_3 .

20 La figure 7 montre la variation du coefficient de couplage électromécanique et de la vitesse de propagation d'ondes acoustiques pour des substrats du type POI présentant différentes épaisseurs d'une couche intermédiaire en LiTaO_3 .

Pour des raisons de lisibilité des figures, les différents éléments n'ont pas nécessairement été dessinés à l'échelle. Notamment, les variations d'épaisseur des différentes couches du substrat piézoélectrique sur isolant ont pu être exagérées.

25

DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION

La figure 1 illustre un substrat pour un dispositif RF, comprenant un substrat support 1, généralement en un matériau semi-conducteur tel que du silicium, au moins une couche intermédiaire 2 agencé sur le substrat support, et une couche piézoélectrique 3 agencée
30 sur la couche intermédiaire. Dans certains cas, plusieurs couches intermédiaires sont agencées entre le substrat support et la couche piézoélectrique.

Par « sur » on désigne une position relative des couches en considérant les couches de la face arrière (c'est-à-dire du côté du substrat support) vers la face avant (c'est-à-dire du côté de la couche piézoélectrique) du substrat.

35 Bien que la couche intermédiaire 2 et la couche piézoélectrique 3 soient représentées avec une épaisseur constante, lesdites couches présentent en général des variations d'épaisseur non représentées sur la figure 1.

Un procédé de fabrication d'un tel substrat comprend :

- une ou plusieurs étapes de formation du substrat, pouvant impliquer des étapes de dépôt, de collage et/ou de transfert de couches,
 - une ou plusieurs étapes de mesure d'épaisseur de la ou les couches intermédiaires,
 - une étape de calcul d'une correction d'épaisseur de la couche piézoélectrique, et
- 5 ○ l'application de ladite correction à la couche piézoélectrique par un procédé d'abrasion.

On va maintenant décrire chacune de ces étapes en détail.

Formation du substrat

10 La formation du substrat met généralement en œuvre le collage d'un substrat support et d'un substrat donneur piézoélectrique par l'intermédiaire d'au moins une couche intermédiaire, suivi du transfert d'une couche piézoélectrique du substrat donneur sur le substrat support.

15 Avant l'étape de collage, au moins une couche intermédiaire est formée sur le substrat support et/ou sur le substrat donneur. Ladite couche peut être présente sur l'un et/ou l'autre des substrats utilisés, ou être déposée lors du procédé de fabrication du substrat piézoélectrique sur isolant.

20 En référence à la figure 2A, on dépose une couche intermédiaire 2 sur un substrat support 1. De manière illustrative et non limitative, une telle couche intermédiaire peut être une couche diélectrique telle qu'une couche d'oxyde. Bien qu'une seule couche intermédiaire 2 soit illustrée sur la figure 2A, deux couches intermédiaires ou davantage peuvent être déposées sur le substrat support. Dans certains modes de réalisation, ces couches peuvent se présenter sous forme d'un empilement de plusieurs couches diélectriques superposées, par exemple au moins une couche d'oxyde (tel que SiO_2), au moins une couche de nitrure (tel que SiN) et/ou au moins une couche d'oxynitrure (tel que SiON).

25 Dans certains modes de réalisation, distincts ou combinés aux modes de réalisation précités, on dépose au moins une couche intermédiaire métallique et/ou au moins une couche intermédiaire de piégeage de charges électriques, par exemple en silicium polycristallin.

30 De manière alternative (non illustrée), on dépose au moins une couche intermédiaire telle que décrite ci-dessus sur le substrat donneur piézoélectrique. Le dépôt est réalisé de sorte que la couche intermédiaire soit sur la face du substrat donneur destinée à être collée sur le substrat support.

35 Dans certains modes de réalisation (non illustrés), on dépose au moins une première couche intermédiaire sur le substrat support, et au moins une deuxième couche intermédiaire sur le substrat donneur piézoélectrique, de sorte que les première et deuxième couches intermédiaires soient situées à l'interface de collage du substrat donneur sur le substrat support.

Typiquement, le nombre de couches intermédiaires est compris entre un et trois, sans pour autant limiter l'invention.

Comme schématisé sur la figure 2A, chaque couche intermédiaire 2 présente une certaine variation de son épaisseur sur l'étendue de la surface de la couche 2. De manière illustrative et non limitative, la variation de l'épaisseur de chaque couche intermédiaire est comprise entre 5 % et 30 %.

Le transfert d'une couche piézoélectrique sur le substrat support peut avantageusement être réalisée par le procédé Smart Cut TM. A cet effet, en référence à la figure 2B, on forme une zone de fragilisation 31 dans un substrat donneur 30, de sorte à délimiter la couche piézoélectrique 3.

La zone de fragilisation 31 est formée dans le substrat donneur 30 à une profondeur prédéterminée qui correspond sensiblement à l'épaisseur de la couche piézoélectrique 3 à transférer. La couche piézoélectrique 3 présente typiquement une épaisseur comprise entre 100 nm et 15 µm. De préférence, la zone de fragilisation 31 est créée par implantation d'atomes d'hydrogène et/ou d'hélium dans le substrat donneur 30.

On peut effectuer un traitement optionnel de la surface du substrat donneur pour préparer ladite surface au collage par adhésion moléculaire. Ce traitement peut comporter, à titre d'exemple illustratif et non limitatif, un nettoyage chimique ou une activation plasma. Dans certains modes de réalisation, on dépose la ou les couches intermédiaires sur le substrat donneur après la formation de la zone de fragilisation et/ou le traitement optionnel de la surface du substrat donneur.

En référence à la figure 2C, on colle ensuite le substrat donneur 30 sur le substrat support 1. La ou les couches intermédiaires 2 sont ainsi agencées à l'interface de collage entre le substrat support 1 et le substrat donneur 30.

On provoque un détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation 31, de sorte à transférer la couche piézoélectrique 3 sur le substrat support 1, la ou les couches intermédiaires étant agencés entre la couche piézoélectrique 3 et le substrat support 1 (cf. figure 2D). La ou les couches intermédiaires 2 et la couche piézoélectrique 3 sont agencées en contact direct sur l'étendue de leurs interfaces.

De manière alternative au procédé Smart Cut TM, le transfert de la couche piézoélectrique et/ou d'une ou plusieurs couches intermédiaires peut être réalisé par d'autres techniques, sans création d'une zone de fragilisation. Par exemple, la couche piézoélectrique peut être transférée par amincissement par la face arrière du substrat donneur.

La couche piézoélectrique transférée sur le substrat support présente une épaisseur supérieure à l'épaisseur de la couche piézoélectrique souhaitée pour l'application envisagée, afin de permettre un ajustement de l'épaisseur par abrasion dans une étape

ultérieure tel que décrite ci-dessous. En partant d'une couche de matériau piézoélectrique suffisamment épaisse, on dispose d'une marge pour permettre une optimisation locale.

Mesure de l'épaisseur

En référence à la figure 2E, on effectue une mesure non-destructive de l'épaisseur de la ou les couches intermédiaires 2 et de la couche piézoélectrique 3 pour établir une cartographie de l'épaisseur de la ou les couches intermédiaires 2.

Quand le substrat comprend plusieurs couches intermédiaires 2A et 2B, en référence à la figure 2F, on peut effectuer successivement ou simultanément une mesure de l'épaisseur d'une première couche intermédiaire 2A et une mesure d'épaisseur de la deuxième couche intermédiaire 2B pour établir une cartographie de l'épaisseur de chaque couche intermédiaire et de la couche piézoélectrique 3. Dans d'autres cas, uniquement les épaisseurs de la couche piézoélectrique 3 et de la couche intermédiaire supérieure 2B sont déterminées, sans mesurer l'épaisseur d'éventuelles couches intermédiaires inférieures 2A.

La mesure de l'épaisseur de la ou les couches intermédiaires est avantageusement réalisée en utilisant un dispositif de mesure optique. Un tel dispositif est de préférence un dispositif d'ellipsométrie ou un dispositif de réflectométrie. Un avantage de ces techniques optiques est qu'elles permettent la mesure simultanée de l'épaisseur de plusieurs couches superposées, comme illustré dans la figure 2F. De telles technologies optiques sont particulièrement adaptées pour des couches piézoélectriques tel que du LiTaO_3 et des couches intermédiaires en oxyde tel que le SiO_2 , car ces matériaux sont optiquement transparents dans la gamme de longueurs d'onde classiquement utilisée dans le domaine des semi-conducteurs (par exemple, 360 nm à 900 nm ou 190 nm à 1700 nm). Un empilement de ces matériaux présente en outre un grand contraste d'indice de réfraction entre chaque couche respective, ce qui facilite la mesure de l'empilement de couches par des moyens optiques.

Cependant, l'invention n'est pas limitée à ces techniques de mesure. La détermination de l'épaisseur de la couche intermédiaire peut être réalisée par tout autre dispositif permettant de mesurer l'épaisseur d'une couche agencée en-dessous la couche piézoélectrique 3 de manière non-destructive.

Dans certains modes de réalisation, on réalise la mesure d'épaisseur d'une ou plusieurs couches intermédiaires avant le transfert de la couche piézoélectrique. Cette technique est particulièrement utilisée en cas de couches supérieures opaques ne permettant pas de détermination d'épaisseur par des moyens optiques à travers la couche opaque.

Par exemple, l'épaisseur d'une couche opaque ou d'une autre couche située en-dessous d'une couche opaque peut être mesurée par analyse ultrasonique avec une

résolution de picosecondes, ou par la fluorescence X à dispersion de longueur d'onde (WDXRF, acronyme du terme anglo-saxon « wavelength dispersive X-ray fluorescence »).

Avantageusement, le dispositif de mesure est configuré de manière à réaliser une série de mesures d'épaisseur automatisée sur une grille de points de mesure qui sont
5 répartis sur la surface du substrat. Une telle grille de points est par exemple illustrée sur la figure 3.

Dans une telle grille, les points de mesure 5 se situent typiquement dans un plan (X, Y) parallèle à la surface du substrat. Chaque point de mesure est associé à une paire de coordonnées X, Y dans ce plan. De manière illustrative et non limitative, les points de
10 mesure sont disposés le long de lignes droites afin de faciliter le guidage des moyens de mesure. Ces lignes peuvent être radiales par rapport au centre du substrat. De manière alternative, les points de mesure peuvent être disposés sur une grille rectangulaire ou être répartis de manière uniforme sur la surface du substrat. Si des variations d'épaisseur plus importantes sont à attendre dans une zone particulière, par exemple au milieu ou, en
15 référence à la figure 3, à proximité du bord du substrat, les points de mesure 5 peuvent être choisis plus denses dans cette zone.

La grille, la densité et le positionnement des points de mesure peuvent être choisis selon la technique de mesure, les variations d'épaisseur dans les couches intermédiaires et la couche piézoélectrique, et en fonction de la précision souhaitée.

La figure 4 illustre une cartographie d'épaisseur sur une grille de points de mesure, c'est-à-dire une représentation spatiale des épaisseurs mesurées sur une grille de points telle que décrite ci-dessus. Chaque point de mesure est associé à une valeur de mesure ou, dans le cas de plusieurs couches intermédiaires superposées, à un ensemble de
20 valeurs de mesure dont chaque valeur respective correspond à une couche intermédiaire respective. Par exemple, chaque gamme d'épaisseur peut être associée à une couleur ou nuance prédéfinie sur la cartographie.

La réflectométrie optique consiste à mesurer la variation de l'intensité d'un faisceau de lumière réfléchi sur une surface ou une interface, par rapport à l'intensité d'un faisceau incident (on appelle ce rapport la réflectivité) en fonction de la longueur d'onde du faisceau.

En référence à la figure 5, des mesures en réflectométrie sous différents angles d'incidence fournissent des spectres d'intensité de réflexion en pourcentage de l'intensité incidente en fonction de la longueur d'onde λ du faisceau incident en nanomètres. Le spectre représenté par une ligne continue correspond à un angle de réflexion de 70°, et le spectre représenté par une ligne en pointillés correspond à un angle de réflexion de 6,5°.
35 D'autres angles d'incidence et/ou un plus grand nombre d'angles différents peuvent être utilisés.

L'intensité réfléchie dépend de la longueur d'onde de la lumière et de l'épaisseur de chaque couche traversée par le faisceau incident et le faisceau réfléchi. L'intensité dépend

en outre les propriétés optiques de chaque couche, qui sont connues pour les matériaux utilisés. Pour chaque angle de réflexion, la variation de l'intensité avec la longueur d'onde est différente. Chaque spectre enregistré à un angle de réflexion différent peut ainsi fournir des informations supplémentaires sur l'épaisseur de chaque couche dans un empilement de plusieurs couches superposées.

On peut calculer l'épaisseur d'un ensemble de n couches à partir de n spectres de réflectométrie à différents angles, n étant un nombre entier. La rugosité des couches peut être utilisée en tant que paramètre d'ajustement supplémentaire, ou être considérée constante.

L'ellipsométrie est une technique de caractérisation fondée sur le changement d'état de polarisation de la lumière, par réflexion de la lumière sur une surface ou interface. Un spectre d'ellipsométrie (non représenté) montre donc le changement de polarisation en fonction de la longueur d'onde d'un faisceau incident. Le changement de polarisation dépend également de l'épaisseur de chaque couche traversée par le faisceau incident et le faisceau réfléchi, et de l'angle de réflexion du faisceau. Similairement à un ensemble de spectres de réflectométrie, on peut calculer les épaisseurs respectives d'un ensemble de n couches à partir de n spectres d'ellipsométrie à différents angles, n étant un nombre entier.

De même, on peut combiner des spectres d'ellipsométrie et de réflectométrie afin de calculer les épaisseurs respectives d'un ensemble de couches intermédiaires sur chaque point de la grille choisie.

On réalise ensuite une étape d'interpolation d'épaisseur entre les points de mesure afin d'obtenir une cartographie d'épaisseur sur l'étendue du substrat. Avantagusement, on réalise une interpolation linéaire qui est rapide et facile à mettre en œuvre.

Modèle numérique

La couche piézoélectrique présente plusieurs paramètres qui dépendent de l'épaisseur de la couche piézoélectrique et de l'épaisseur de la ou les couches intermédiaires. Ces paramètres sont par exemple le coefficient de couplage électromécanique, la vitesse de propagation d'ondes acoustiques et le coefficient de température de la fréquence.

. Chacun de ces paramètres peut dépendre des épaisseurs de chaque couche intermédiaire de manière différente, en fonction des propriétés mécaniques, électriques et/ou thermiques de chaque couche.

Quand la ou les couches intermédiaires présentent des variations d'épaisseur, on obtient une variation de chacun de ces paramètres en fonction de l'épaisseur respective de chaque couche intermédiaire.

Après obtention de la cartographie de la couche piézoélectrique et d'au moins une couche intermédiaire, les épaisseurs locales et leur localisation sur le substrat sont prises en compte dans un modèle numérique d'au moins une propriété d'une couche

piézoélectrique. Un tel modèle numérique comprend une matrice de données pour un ou plusieurs paramètres de la couche piézoélectrique. Dans cette matrice, le modèle associe chaque valeur du paramètre respectif à toutes les combinaisons d'épaisseurs de couches superposées dans l'empilement du substrat et inversement.

- 5 Partant d'une valeur cible pour un tel paramètre et de l'épaisseur de chaque couche intermédiaire considérée, on peut donc déterminer une épaisseur cible de la couche piézoélectrique.

- Pour homogénéiser un tel paramètre sur l'étendue du substrat, on peut choisir une valeur cible dudit paramètre correspondant à une épaisseur indicative pour chaque couche
10 intermédiaire respective présente dans le substrat. L'épaisseur de la ou les couches intermédiaires n'étant pas modifiée pendant le procédé, on choisit avantageusement une valeur cible qui reste compatible avec toutes les épaisseurs des couches intermédiaires présentes dans le substrat.

- Dans certains cas, on choisit une valeur cible correspondant à une épaisseur
15 indicative proche de l'épaisseur moyenne de chaque couche intermédiaire respective. Dans d'autres cas, il peut s'avérer nécessaire d'utiliser une épaisseur indicative maximale ou minimale, de manière à pouvoir atteindre la valeur cible pour toutes les épaisseurs de la ou les couches intermédiaires présents dans le substrat.

- On calcule ensuite une valeur cible d'épaisseur de la couche piézoélectrique pour
20 chaque position sur l'étendue du substrat, en fonction de l'épaisseur des couches intermédiaires respectives en-dessous de la couche piézoélectrique correspondant à la même position sur le substrat. On obtient une épaisseur cible de la couche piézoélectrique en chaque point du substrat, de manière que le paramètre choisi présente la valeur cible correspondant à la valeur indicative préalablement choisi, indépendamment de la valeur
25 réelle de la ou les couches intermédiaires à chaque position respective. On peut ainsi choisir un paramètre de la couche piézoélectrique qui sera très homogène sur l'étendue du substrat après l'obtention de l'épaisseur cibles à chaque endroit respectif de la couche piézoélectrique.

- Dans le cas où le paramètre choisi présente des maxima et/ou des minima en
30 fonction de l'épaisseur de la couche piézoélectrique, plusieurs épaisseurs cibles peuvent être possibles. Dans un tel cas, on peut soit choisir une épaisseur cible qui permet de minimiser les variations d'épaisseur sur le substrat de manière globale, soit choisir l'épaisseur cible en fonction d'autres paramètres à rendre les plus homogènes possible sur l'étendue du substrat.

- 35 De manière alternative, on peut choisir deux ou trois paramètres différents de la couche piézoélectrique, et calculer les valeurs cibles de la couche piézoélectrique pour chacun des deux ou trois paramètres respectifs. En général, ces valeurs cibles ne seront pas les mêmes pour chaque paramètre respectif pour les différents endroits sur l'étendue

du substrat. On calcule donc, pour chaque position sur le substrat, une valeur moyenne présentant un compromis pour les deux ou trois paramètres, de manière que chaque paramètre soit le plus homogène possible sur l'étendue du substrat, sans pour autant générer des inhomogénéités trop importantes pour les autres paramètres respectifs.

- 5 L'épaisseur de la couche piézoélectrique est choisie en fonction des épaisseurs des couches intermédiaires pour chaque endroit sur la surface du substrat.

On peut ainsi ajuster l'épaisseur de la couche piézoélectrique en tenant compte de l'influence de l'épaisseur de la couche intermédiaire sur un paramètre spécifique, ou pour un compromis d'un ensemble de paramètres. Le choix du ou des paramètres à optimiser est typiquement effectué selon l'application envisagée du substrat.

10 Les paramètres de la couche piézoélectrique les plus pertinents sont le coefficient de couplage électromécanique, la vitesse de propagation d'ondes acoustiques et le coefficient de température de la fréquence. Cependant, d'autres paramètres de la couche piézoélectrique peuvent être ajustés avec le procédé de l'invention.

15 Des logiciels disponibles dans le commerce utilisent des modèles basés sur le coefficient de Fresnel des multicouches de films minces en utilisant la méthode de la matrice de transfert. Des tels modèles permettent de déterminer les épaisseurs de manière rapide et fiable.

20 La figure 6 montre les vitesses de propagation d'ondes acoustiques v_l ou v_t sur une surface libre, les vitesses de propagation d'ondes acoustiques v_m sur surface métallisée en m/s, et le carré du coefficient de couplage k_s en %. Ces paramètres sont représentés en fonction du produit $d \cdot f$ de l'épaisseur d d'une couche piézoélectrique en tantalate de lithium (LiTaO_3) et de la fréquence f en m GHz ou km/s.

Typiquement, la fréquence des applications est comprise entre 500 et 3000 MHz.

25 La représentation des paramètres en fonction du produit épaisseur-fréquence permet d'évaluer facilement l'épaisseur nécessaire de la couche piézoélectrique pour une fréquence d'application envisagée.

Les paramètres ont été mesurés pour différentes épaisseurs (100 nm, 500 nm et 900 nm) d'une couche intermédiaire en d'oxyde de silicium (SiO_2). Le tantalate de lithium et l'oxyde de silicium sont optiquement transparents et leurs indices de réfraction présentent un contraste important entre les couches respectives, ce qui facilite les mesures optiques sur l'empilement des couches.

Si, pour cette configuration d'une couche piézoélectrique en LiTaO_3 et une couche intermédiaire en SiO_2 , on souhaite optimiser le coefficient de couplage électromécanique,

35 on peut choisir soit la valeur d'une couche intermédiaire de 500 nm pour une produit épaisseur-fréquence supérieur ou égal à 1 km/s, soit d'une couche intermédiaire de 100 nm pour des petits valeurs du produit épaisseur-fréquence. Partant de la couche de 500 nm à 2 km/s, on obtient un carré du coefficient de couplage électromécanique d'environ 8.5

%. La même valeur peut être obtenu pour une couche de 100 nm à 2,3 km/s et pour une couche de 900 nm à 1,8 km/s (lignes pointillées dans la figure 6).

Pour homogénéiser, pour la même configuration, la vitesse de propagation d'ondes v_m sur surface métallisée à 1 km/s de produit d'épaisseur de la couche piézoélectrique fois la fréquence, on peut choisir comme valeur cible la valeur pour une épaisseur de 500 nm qui est d'environ 4100 m/s.

Dans les zones dans lesquelles l'épaisseur de la couche en SiO_2 est plus fine, de 100 nm, l'épaisseur de la couche piézoélectrique fois la fréquence devra être ajusté à environ 3 km/s. Dans les zones dans lesquelles l'épaisseur de la couche en SiO_2 est de 900 nm, il faudrait soit augmenter ce produit à 3 afin d'obtenir la même vitesse de propagation d'ondes, soit le réduire à environ 0.4 km/s. Si on souhaite simultanément conserver une certaine homogénéité du coefficient de couplage électromécanique, on choisira plutôt une valeur de 3 km/s, car le coefficient de couplage présente des variations importantes pour un produit épaisseur-fréquence de 0.4 km/s.

Le maximum du coefficient de couplage k se décale vers des fréquences plus basses avec l'augmentation de la couche diélectrique. La distribution d'épaisseur sera donc à choisir en fonction de la fréquence utilisée dans l'application du substrat.

La figure 7 montre le coefficient de température de la fréquence CTF en fonction du produit $d \cdot f$ de l'épaisseur d d'une couche piézoélectrique en tantalate de lithium (LiTaO_3) et de la fréquence f en m GHz ou km/s. Le coefficient de température de la fréquence augmente avec l'épaisseur d de la couche diélectrique. Simultanément, le maximum de ce coefficient se décale vers des fréquences plus élevées pour des couches piézoélectriques plus épaisses. Quand on souhaite homogénéiser ce paramètre sur l'étendue d'un substrat, il convient également de choisir l'épaisseur souhaité en fonction de la fréquence de l'application visée.

On peut ajuster ce paramètre, par exemple partant d'une valeur d'environ 9 ppm/K pour une couche de 500 nm et un produit épaisseur-fréquence de 1 km/s. On obtiendra des produits épaisseur-fréquence d'environ 0,6 km/s pour une couche piézoélectrique de 100 nm, d'environ 0.8 km/s pour une couche de 200 nm, de 1,1 km/s pour une couche de 700 nm et de 1,2 km/s pour une couche de 900 nm d'épaisseur.

Abrasion de la couche piézoélectrique

Basé sur la valeur cible de l'épaisseur de la couche piézoélectrique déterminée par le calcul décrit ci-dessus, on effectue ensuite une abrasion locale de la couche piézoélectrique. En référence à la figure 2G, cette abrasion permet d'ajuster l'épaisseur de la couche piézoélectrique selon les paramètres pris en compte lors du calcul.

Le procédé d'abrasion est typiquement un procédé de gravure par un faisceau d'ions, typiquement un faisceau d'ions d'argon. Les ions percutent la surface de l'échantillon

à très haute vitesse arrachant de la matière dans la zone de visée. De manière illustrative et non limitative, on réalise un balayage du faisceau d'ions selon deux axes d'un plan principal de la couche piézoélectrique afin de graver la couche piézoélectrique sur toute l'étendue du substrat. Un tel procédé permet d'ajuster avec précision l'épaisseur de la

5 couche piézoélectrique à chaque position sur l'étendue du substrat, avec un balayage de la surface de manière continue. Ainsi, la variation d'épaisseur est adaptée en continu aux paramètres souhaités sur toute la surface. Le procédé d'abrasion peut en outre comprendre une gravure par un agent de gravure chimique, typiquement un gaz réactif.

10 L'épaisseur locale enlevée est déterminée par le temps d'arrêt du faisceau à chaque endroit sur la surface de la couche piézoélectrique. Ce temps d'arrêt est calculé par un algorithme afin d'adapter le procédé de balayage à l'uniformité d'épaisseur souhaitée.

Dans certains outils d'abrasion, le faisceau peut être ajusté à la dureté du matériau grâce à la variation de l'énergie et du courant du faisceau pour obtenir un débit adapté sans affecter trop la rugosité finale de la surface.

15 La nature des espèces ioniques utilisées pour le faisceau peut également entraîner une réaction chimique avec le matériau gravé qui peut soit accélérer le processus de gravure, soit lisser la surface de la couche piézoélectrique.

Correction d'épaisseur de la couche intermédiaire

La même approche peut être utilisée pour la correction de l'épaisseur de la couche

20 intermédiaire (par exemple, une couche diélectrique telle que SiO_2 , SiON ou SiN) agencée sous la couche piézoélectrique, dans une étape comprise après le dépôt de la couche intermédiaire sur le substrat donneur ou le substrat support et avant le transfert de la couche piézoélectrique sur le substrat support. Ceci peut avantageusement conduire à une couche diélectrique très uniforme, ce qui a également un impact bénéfique sur l'uniformité du

25 coefficient de couplage électromécanique sur l'étendue du substrat. On va maintenant décrire les étapes à réaliser pour obtenir un substrat présentant une correction d'épaisseur de la couche diélectrique tel que décrit ci-dessus.

On commence par le dépôt d'une couche de SiO_2 sur un substrat de base qui est

30 préférablement en Si. Le substrat de base peut comprendre un empilement d'une ou plusieurs couches sur sa surface qui comprend typiquement une couche en silicium polycristallin qui est riche en pièges pour les porteurs de charges électriques. L'empilement peut comprendre en outre une couche en oxyde de silicium, en oxynitride de silicium, en nitrure de silicium, en oxyde d'aluminium, en nitrure de tantalate ou une combinaison

35 desdites couches, d'autres couches en matériaux diélectriques ou d'empilements de couches.

On réalise ensuite une cartographie de la distribution locale de l'épaisseur de la couche diélectrique par ellipsométrie et/ou réflectométrie d'au moins le matériau diélectrique en SiO_2 et la couche sous-jacente, sur une grille de points de mesure, de même

manière comme décrit ci-dessus pour les couches intermédiaires en-dessous de la couche piézoélectrique.

Par la suite, on injecte la cartographie de l'épaisseur locale des couches respectives dans un modèle numérique comprenant des données pour un paramètre à optimiser en fonction de l'épaisseur. De préférence, la cartographie est injectée sous forme de valeurs associées à des coordonnées X, Y sur les points de mesure utilisés. On réalise également une interpolation entre les points de mesure, de préférence une interpolation linéaire.

On ajuste localement l'épaisseur de la couche diélectrique par un procédé d'abrasion, par exemple par un faisceau d'ions. La valeur de l'épaisseur après l'abrasion est basée sur la valeur cible locale déterminée ci-dessus.

En partant d'une couche de matériau diélectrique assez épaisse, on dispose d'une marge suffisante pour permettre une telle optimisation locale.

On peut par la suite déposer une couche piézoélectrique sur la couche diélectrique, et réajuster l'épaisseur de la couche piézoélectrique par un procédé selon l'invention. On obtient ainsi une couche piézoélectrique dont l'épaisseur est finement ajustée pour optimiser un ou plusieurs paramètres de la couche piézoélectrique.

REVENDICATIONS

1. Procédé de correction d'épaisseur d'une couche piézoélectrique (3) agencée sur un substrat du type piézoélectrique sur isolant, comprenant les étapes suivantes :
 - 5 o la mesure de l'épaisseur d'au moins une couche intermédiaire (2) localisée entre la couche piézoélectrique (3) et un substrat support (1),
 - o la mesure de l'épaisseur de la couche piézoélectrique (3),
 - o à partir desdites mesures d'épaisseur de l'au moins une couche intermédiaire (2) et de la couche piézoélectrique (3) et d'un modèle numérique d'au moins une propriété de la couche piézoélectrique (3) en
10 fonction d'une pluralité de couples d'épaisseurs de la couche piézoélectrique (3) et de ladite au moins une couche intermédiaire (2), le calcul d'une correction d'épaisseur de la couche piézoélectrique (3) pour obtenir une valeur cible de chaque propriété,
 - 15 l'application de la correction de l'épaisseur de la couche piézoélectrique (3) par un procédé d'abrasion de manière topographiquement discriminée.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel ladite propriété de la couche piézoélectrique est choisie parmi un coefficient de couplage électromécanique, une
20 vitesse de propagation d'ondes et/ou un coefficient de température de la fréquence.
3. Procédé selon la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel la mesure de l'épaisseur de l'au moins une couche intermédiaire (2) et de la couche piézoélectrique est effectuée de manière localisée en une pluralité de points de
25 mesure, le procédé comprenant en outre une étape d'interpolation linéaire d'épaisseur de chaque couche entre au moins deux points de mesure.
4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le procédé d'abrasion est un procédé de gravure par faisceau d'ions.
30
5. Procédé selon la revendication 4, comprenant une étape de balayage du faisceau d'ions selon deux axes d'un plan principal de la couche piézoélectrique (3), dans laquelle la durée d'irradiation par ledit faisceau d'ions sur chaque position est ajustée en fonction de l'épaisseur de la couche piézoélectrique (3) à obtenir.
35
6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la couche intermédiaire comprend une couche diélectrique, un empilement de plusieurs

couches diélectriques, une couche métallique et/ou une couche de piégeage de charges électriques.

- 5 7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la mesure de l'épaisseur de la couche piézoélectrique (3) et/ou de la couche intermédiaire (2) est effectuée par ellipsométrie et/ou par réflectométrie.
8. Procédé de fabrication d'un substrat du type piézoélectrique sur isolant, comprenant les étapes suivantes :
- 10 o la fourniture d'un substrat support (1),
 o la fourniture d'un substrat donneur piézoélectrique (30),
 o le collage du substrat donneur (30) sur le substrat support (1), une couche intermédiaire (2) étant agencée à l'interface entre le substrat donneur et le substrat support,
- 15 o l'amincissement du substrat donneur de sorte à transférer une couche piézoélectrique (3) dudit substrat donneur sur le substrat support,
 o la correction de l'épaisseur de ladite couche piézoélectrique (3) par un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7.
- 20 9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel l'amincissement du substrat donneur (30) comprend, avant le collage, la formation d'une zone de fragilisation (31) de sorte à délimiter une couche piézoélectrique (3) à transférer, et, après le collage, le détachement du substrat donneur le long de ladite zone de fragilisation (31).
- 25 10. Procédé selon l'une des revendications 8 ou 9, dans lequel la mesure de l'épaisseur de l'au moins une couche intermédiaire (2) est effectuée après le transfert de la couche piézoélectrique (3) sur le substrat support (1).
- 30 11. Procédé selon l'une des revendications 8 ou 9, dans lequel la mesure de l'épaisseur de l'au moins une couche intermédiaire (2) est effectuée avant le collage du substrat donneur (30) sur le substrat support (1).
- 35 12. Procédé selon l'une des revendications 8 à 11, dans lequel l'au moins une couche intermédiaire (2) comprend : une couche métallique, une couche diélectrique, un empilement de plusieurs couches diélectriques et/ou une couche de piégeage de charges électriques.

13. Substrat du type piézoélectrique sur isolant, comprenant successivement une couche piézoélectrique (3), une couche intermédiaire (2) et un substrat support (1), caractérisé en ce que l'épaisseur locale de ladite couche piézoélectrique (3) est ajustée en fonction de l'épaisseur locale de la couche intermédiaire (2) par abrasion de la couche piézoélectrique de manière topographiquement discriminée à partir d'un modèle numérique d'au moins une propriété de la couche piézoélectrique (3) en fonction d'une pluralité de couples d'épaisseurs de la couche piézoélectrique (3) et de ladite au moins une couche intermédiaire (2), selon un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 12.