

PROCÉDÉ DE FABRICATION D'UN SUBSTRAT RECEVEUR POUR UNE STRUCTURE DE TYPE SEMI-CONDUCTEUR SUR ISOLANT POUR APPLICATIONS RADIOFREQUENCES ET PROCÉDÉ DE FABRICATION D'UNE TELLE STRUCTURE

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

La présente invention concerne la fabrication d'un substrat dit « substrat receveur » pour la réalisation d'une structure de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquence. L'invention se rapporte également à un procédé de fabrication d'une telle structure par transfert d'une couche d'un second substrat, dit « substrat donneur », sur le substrat receveur.

ETAT DE LA TECHNIQUE

Dans le cadre de la fabrication d'une structure de type semi-conducteur sur isolant, dite structure « semiconductor on insulator » (acronyme SeOI) en anglais, en particulier « silicon on insulator » (SOI) lorsque le matériau semi-conducteur est du silicium, on effectue le collage d'un substrat donneur sur un substrat receveur.

De manière générale, le substrat donneur comprend un substrat en matériau semi-conducteur monocristallin, par exemple du silicium monocristallin, et le substrat receveur comprend au moins un substrat de base destiné notamment à servir de support à une couche mince semi-conductrice devant être transférée du substrat donneur sur le substrat receveur.

On forme une couche d'oxyde sur le substrat donneur ou sur le substrat receveur, de sorte que ladite couche d'oxyde se trouve à l'interface de collage après collage du substrat donneur et du substrat receveur. La couche d'oxyde est alors dite « enterrée », et appelée « BOX » pour Buried OXide en anglais.

Pour des applications radiofréquence (RF), on intègre au substrat receveur une couche de polysilicium (silicium polycristallin) sous la couche d'oxyde enterrée, pour piéger les charges électriques présentes à l'interface entre la couche de base et la couche d'oxyde enterrée. Cette couche de polysilicium est agencée sur la couche de base du substrat receveur avant collage.

La couche d'oxyde est formée soit sur le substrat en matériau semi-conducteur monocristallin du substrat donneur, selon un premier procédé dit de « collage direct » ou « direct bonding » en anglais, soit sur la couche de polysilicium du substrat receveur selon un second procédé dit de « collage inversé » ou « reverse bonding » en anglais.

Conformément au procédé de collage direct, en référence à la figure 1, on fournit un substrat receveur 10 comprenant un substrat de base 1 recouvert d'une couche de piégeage de charges 2 en polysilicium (silicium polycristallin), et un substrat donneur 20

comprenant un substrat en matériau semi-conducteur monocristallin 4. Le substrat en matériau monocristallin du substrat donneur est oxydé pour former une couche d'oxyde 3.

On réalise ensuite une implantation d'espèces atomiques dans la couche en matériau monocristallin 4, à travers la couche d'oxyde 3, afin de former une zone dite « de fragilisation » dans ladite couche en matériau monocristallin. La zone de fragilisation est créée à une profondeur déterminée qui correspond sensiblement à l'épaisseur de la couche à transférer. La couche à transférer comprend alors la couche d'oxyde et une portion du substrat monocristallin.

Le substrat donneur 20 est ensuite collé sur le substrat receveur 10, la couche en polysilicium 2 et la couche d'oxyde 3 étant à l'interface de collage, puis on détache le substrat donneur 20 le long de la zone de fragilisation, de manière à transférer la couche d'oxyde 3 et la portion de substrat monocristallin sur le substrat receveur 10.

Le procédé par collage direct présente l'inconvénient que la couche d'oxyde se trouve sur le substrat donneur. Ainsi, lors de l'implantation, les espèces atomiques doivent traverser la couche d'oxyde avant de parvenir à la couche monocristalline, ce qui nécessite une énergie d'implantation importante. Or plus l'énergie d'implantation est élevée, plus la quantité d'ions à planter doit être élevée, et plus le courant d'implantation (densité de courant) est faible, ce qui aboutit à une augmentation des coûts de production et limite la faisabilité du procédé, en particulier, limite l'épaisseur maximale de la couche d'oxyde. De plus, ce procédé réduit la réutilisabilité du substrat donneur, puisqu'une partie du substrat donneur est consommée pour former la couche d'oxyde.

Conformément au procédé de collage inversé, en référence à la figure 2, on fournit un substrat receveur 10 comprenant un substrat de base 1 recouvert d'une couche de piégeage de charges 2 en polysilicium, et un substrat donneur 20 comprenant un substrat en matériau semi-conducteur monocristallin 4. Mais contrairement au procédé de collage direct, la couche d'oxyde 3 est formée directement sur le substrat receveur 10 par oxydation de la couche de piégeage de charges 2.

L'implantation d'espèces atomiques est ensuite réalisée directement dans la couche en matériau monocristallin 4 du substrat donneur, sans traverser de couche d'oxyde 3, afin de former la zone de fragilisation. La couche à transférer comprend alors uniquement une portion du substrat monocristallin.

Le substrat donneur est ensuite collé sur le substrat receveur, le substrat monocristallin et la couche d'oxyde étant à l'interface de collage, puis on détache le substrat donneur le long de la zone de fragilisation, de manière à transférer la portion de substrat monocristallin sur le substrat receveur.

Le procédé de collage inversé permet de réduire les coûts de production et améliore la réutilisabilité du substrat donneur.

En revanche, la couche d'oxyde formée sur la couche de silicium polycristallin présente une tension de claquage, dite « breakdown voltage » (V_{bd}) en anglais, trop basse par rapport à celle obtenue par croissance sur le matériau monocristallin du substrat donneur, en particulier sur du silicium monocristallin, par le procédé de collage direct. Une tension de claquage aussi basse n'est pas compatible avec les applications radiofréquences.

Pour illustrer cette affirmation, la figure 3 montre un graphe qui représente l'évolution du courant électrique, en ampère (A), en fonction du champ électrique, en Mégavolt par centimètre (MV/cm), pour différents substrats receveurs dans lesquels la couche d'oxyde enterrée a été formée par collage direct (substrat de type celui de la figure 1) ou par collage inversé (substrat de type celui de la figure 2) conformément à l'état de l'art.

Les deux courbes de droite sur le graphe, référencées D_1 et D_2 , correspondent aux deux substrats obtenus par collage direct. Dans ces deux substrats, la couche d'oxyde est formée par oxydation du matériau semi-conducteur monocristallin du substrat donneur et est ensuite transférée sur la couche de piégeage de charges.

Les cinq courbes de gauche sur le graphe, référencées I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , et I_5 , correspondent aux cinq substrats obtenus par collage inversé. Dans ces substrats, la couche d'oxyde est formée par oxydation de la couche de piégeage de charges en silicium polycristallin du substrat receveur.

On mesure l'intensité du courant électrique entre la masse et la surface libre du substrat par l'intermédiaire d'une pièce d'aluminium agencée sur la couche d'oxyde et d'une pointe de mesure.

Concernant le collage direct, les deux courbes D_1 et D_2 présentent une rupture de pente correspondant à un champ électrique maximal que le substrat peut supporter avant court-circuit d'environ 7 MV/cm. La valeur du champ électrique maximal correspondant à la courbe D_2 est légèrement supérieure à celui correspondant à la courbe D_1 .

Concernant le collage inversé, les cinq courbes I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , et I_5 présentent une rupture de pente correspondant à un champ électrique maximal que le substrat peut supporter d'environ 3 MV/cm. La valeur du champ électrique maximal est croissante entre I_1 et I_5 .

Par comparaison, la valeur du champ électrique maximal est nettement inférieure pour les substrats obtenus par collage inversé par rapport à ceux obtenus par collage direct. La différence moyenne entre les deux jeux de courbes est d'environ 4 MV/cm.

La fabrication d'un substrat par collage inversé induit donc une chute du champ électrique maximal, ce qui se traduit par une chute correspondante de la tension de claquage.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

Un but de l'invention est de proposer un procédé permettant de surmonter les inconvénients mentionnés précédemment. L'invention vise à proposer un tel procédé permettant de fabriquer un substrat receveur pour une structure de type semi-conducteur sur isolant dont la couche d'oxyde enterrée possède une tension de claquage suffisante pour des applications radiofréquence, tout en limitant les coûts de production.

A cette fin, l'invention propose un procédé de fabrication d'un substrat receveur pour une structure de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquence, comprenant les étapes suivantes :

- fourniture d'un substrat semi-conducteur comprenant une couche de base en matériau monocristallin et une couche de piégeage de charges en silicium polycristallin agencée sur la couche de base,
- oxydation de la couche de piégeage de charges pour former une couche d'oxyde, agencée sur ladite couche de piégeage de charges,

le procédé étant principalement caractérisé en ce que l'oxydation de la couche de piégeage de charges est réalisée au moins en partie à une température inférieure ou égale à 875°C, de la manière suivante :

- démarrage de l'oxydation à une première température comprise entre 750°C et 1000°C,
- diminution de la température jusqu'à une deuxième température, inférieure à la première température, comprise entre 750°C et 875°C,
- poursuite de l'oxydation à la deuxième température.

Les températures inférieures ou égales à 875°C sont inférieures aux températures auxquelles est usuellement réalisée l'oxydation d'une couche de piégeage selon l'état de l'art. Le demandeur a en effet découvert de manière surprenante que le fait de diminuer la température d'oxydation de la couche de piégeage de charges permet d'augmenter la tension de claquage de la couche d'oxyde formée, contrairement à ce que laisse supposer l'état des connaissances actuelles dans le domaine des radiofréquences, tel qu'illustré notamment par la publication [1].

L'oxydation de la couche de piégeage de charges en polysilicium consomme du polysilicium, et la vitesse de formation de l'oxyde dépend de l'orientation cristalline des grains de polysilicium. Dès lors, les grains cristallins de la couche de polysilicium orientés différemment donnent lieu à des vitesses de croissance différentes de l'oxyde de silicium formé à partir de ces grains. Par exemple, l'oxyde croît à une vitesse différente selon la direction $\langle 100 \rangle$ et selon la direction $\langle 111 \rangle$, à partir des grains orientés selon ces mêmes directions $\langle 100 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$. Les indices $\langle 100 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$ sont les indices de Miller permettant de déterminer l'orientation des plans dans un cristal, et donc de traduire l'orientation des grains cristallins dans la structure cristalline.

Ces différences de vitesse de croissance de l'oxyde en fonction de l'orientation des grains cristallins du polysilicium induisent des contraintes mécaniques au sein de la structure cristalline, qui se retrouvent tout particulièrement à l'interface entre la couche d'oxyde en croissance et la couche de silicium polycristallin sous-jacente. Suite à l'augmentation du volume de la couche d'oxyde en croissance au fur et à mesure de l'oxydation, ces contraintes sont amplifiées sur la surface de polysilicium.

Selon d'autres aspects, le procédé proposé présente les différentes caractéristiques suivantes prises seules ou selon leurs combinaisons techniquement possibles :

- l'oxydation de la couche de piégeage de charges est réalisée au moins en partie à une température supérieure ou égale à 750°C. La vitesse d'oxydation est ainsi plus compatible avec les cadences industrielles et reste économiquement viable.
- la diminution de la température depuis la première température T_1 à la deuxième température T_2 est progressive ;
- au moins 50%, de préférence au moins 70%, de l'épaisseur de la couche d'oxyde est réalisée à la première température T_1 , et au moins 20%, de préférence au moins 30%, de l'épaisseur de la couche d'oxyde est réalisée à la deuxième température T_2 ;
- la couche d'oxyde formée a une épaisseur comprise entre 200 nm et 400 nm ;
- la couche de piégeage de charges a une épaisseur comprise entre 20 nm et 500 nm ;
- la couche de piégeage de charges est préalablement déposée sur le substrat de base en matériau monocristallin par dépôt chimique en phase vapeur à basse pression dans un réacteur.

L'invention se rapporte également à un procédé de fabrication d'une structure de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquences, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- fabrication d'un substrat receveur tel que décrit précédemment,
- fourniture d'un substrat donneur comprenant un substrat monocristallin,
- collage du substrat donneur sur le substrat receveur,
- transfert d'une couche du substrat donneur sur le substrat receveur.

Selon d'autres aspects, le procédé proposé présente les différentes caractéristiques suivantes prises seules ou selon leurs combinaisons techniquement possibles :

- la couche transférée du substrat donneur comprend un matériau semi-conducteur ;
- la couche transférée du substrat donneur comprend un matériau ferroélectrique ;
- le matériau ferroélectrique est choisi parmi : LiTaO_3 , LiNbO_3 , LiAlO_3 , BaTiO_3 , PbZrTiO_3 , KNbO_3 , BaZrO_3 , CaTiO_3 , PbTiO_3 , KTaO_3 ;
- ledit transfert comprend les étapes suivantes :

- implantation d'espèces atomiques dans le substrat donneur de manière à former une zone de fragilisation qui délimite une couche de matériau semi-conducteur ou ferroélectrique monocristallin à transférer,
- collage du substrat donneur sur le substrat receveur, la couche d'oxyde et la couche de matériau semi-conducteur ou ferroélectrique monocristallin à transférer étant à l'interface de collage,
- détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation afin de transférer la couche de matériau semi-conducteur ou ferroélectrique monocristallin sur le substrat receveur, la couche d'oxyde étant agencée entre la couche de piégeage de charges et la couche de matériau semi-conducteur ou ferroélectrique monocristallin transférée

Le matériau semi-conducteur ou ferroélectrique monocristallin s'étend de préférence à la surface du substrat donneur, l'implantation des espèces atomiques étant réalisée directement au travers de ladite surface.

DESCRIPTION DES FIGURES

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante donnée à titre d'exemple illustratif et non limitatif, en référence aux figures annexées suivantes :

la figure 1 est un schéma de principe illustrant la fabrication d'un substrat de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquence par collage direct ;

la figure 2 est un schéma de principe illustrant la fabrication d'un substrat de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquences par collage inversé ;

la figure 3 est un graphe qui représente l'évolution de l'intensité du courant en fonction du champ électrique, pour différents substrats receveurs dans lesquels la couche d'oxyde enterrée a été formée par collage direct ou par collage inversé conformément à l'état de l'art ;

la figure 4 est un graphe qui représente le temps de croissance d'une couche d'oxyde d'une épaisseur de 400 nm pour des cristaux d'oxyde d'indices de Miller $\langle 100 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$ en fonction de la température ;

la figure 5 est un graphe qui représente l'évolution de la différence entre les deux courbes de la figure 6 en fonction de la température ;

la figure 6 est un schéma du substrat de la figure 2 obtenu après oxydation de la couche de piégeage de charges, présentant une courbure convexe ;

la figure 7 est un graphe qui représente l'évolution de l'intensité du courant en fonction du champ électrique, pour différents substrats receveurs dans lesquels la couche d'oxyde enterrée a été formée par collage inversé conformément à l'invention.

Pour des raisons de lisibilité des figures, les différentes couches des substrats ne sont pas nécessairement représentées à l'échelle.

DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION DE L'INVENTION

L'invention concerne un procédé de fabrication d'un substrat receveur 30 pour une structure de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquences.

Le procédé selon l'invention est un procédé de collage inversé. Il comprend, en référence à la figure 2, une étape de fourniture d'un substrat semi-conducteur 10 comprenant un substrat de base 1 en matériau monocristallin et une couche de piégeage de charges 2 en silicium polycristallin agencée sur le substrat de base, suivie d'une étape d'oxydation de la couche de piégeage de charges 2 pour former une couche d'oxyde 3 agencée sur ladite couche de piégeage de charges.

La couche de piégeage de charges 2 peut être formée par épitaxie sur le substrat de base 1, ou alternativement déposée sur ledit substrat de base notamment par dépôt chimique en phase vapeur, communément appelé selon la terminologie anglaise « Chemical Vapor Deposition » et désigné sous l'acronyme CVD.

L'oxydation de la couche de piégeage de charges 2 est réalisée au moins en partie à une température comprise entre 750°C et 875°C.

Un tel procédé permet de former un substrat receveur 30 par collage inversé dont la couche d'oxyde présente une tension de claquage plus élevée que si l'oxydation avait été réalisée à une température supérieure à 875°C.

La couche d'oxyde 3 formée présente une épaisseur de quelques centaines de nanomètres (nm), de préférence comprise entre 200 nm et 400 nm.

La couche de piégeage de charges restant après l'oxydation présente de préférence une épaisseur comprise entre 20 nm et 500 nm.

Les termes « au moins en partie » signifient que l'intégralité de l'oxydation est réalisée à une température comprise entre 750°C et 875°C, ou qu'une partie seulement de l'oxydation est réalisée à une température comprise entre 750°C et 875°C.

Selon un mode de réalisation, on commence par oxyder la couche de piégeage de charges 2 à une température T_1 comprise entre 750°C et 1000°C, puis on diminue la température directement ou progressivement jusqu'à atteindre une température T_2 inférieure à T_1 , comprise entre 750°C et 875°C, où l'oxydation est poursuivie.

La température T_1 peut donc être inférieure à 875°C, ou bien être supérieure à 875°C par exemple égale à 900°C ou à 950°.

Selon ce mode de réalisation, la portion supérieure de la couche d'oxyde 3 a été réalisée à la température T_1 , tandis que la portion inférieure de la couche d'oxyde 3 a été réalisée à la température T_2 , inférieure à T_1 . En effet, la couche de piégeage de charges 2 est oxydée depuis sa face supérieure vers sa face inférieure, et l'interface d'oxydation se

déplace depuis la face supérieure vers la face inférieure au fur et à mesure de l'avancement de la réaction.

Ce mode de réalisation permet d'augmenter la vitesse d'oxydation de la portion supérieure de la couche de piégeage de charges 2, puisque la vitesse d'oxydation augmente avec la température, et donc de diminuer le temps nécessaire à l'oxydation de la couche de piégeage.

L'augmentation de la tension de claquage de la couche d'oxyde 3 est observée à la fois dans le cas où l'intégralité de l'oxydation est réalisée à une température comprise entre 750°C et 875°C, et dans le cas où une partie seulement de l'oxydation est réalisée à une température comprise entre 750°C et 875°C. Il est en effet simplement nécessaire qu'au moins une portion de la couche de piégeage de charges 2 qui s'étend depuis l'interface entre ladite couche de piégeage de charges et le substrat de base vers la surface libre de la couche de piégeage de charges, soit oxydée à une température comprise entre 750°C et 875°C.

Il est possible d'ajuster les paramètres d'oxydation afin de minimiser la portion de la couche de piégeage de charges réalisée à la température comprise entre 750°C et 875°C, et donc le temps total de l'étape d'oxydation.

Selon un mode de réalisation, au moins 50%, de préférence au moins 70%, de l'épaisseur de la couche d'oxyde 3 est réalisée à la première température T_1 , et au moins 20%, de préférence au moins 30%, de l'épaisseur de la couche d'oxyde est réalisée à la deuxième température T_2 .

Une étude de l'évolution du temps de croissance d'une couche d'oxyde en fonction de la température, pour des cristaux d'orientations cristallines différentes, a été réalisée.

La figure 4 est un graphe qui représente le temps de croissance (en heures) d'une couche d'oxyde d'une épaisseur de 400 nm en fonction de la température (en degrés Celsius), pour des cristaux d'oxyde d'indices de Miller $\langle 100 \rangle$ (courbe E_1) et $\langle 111 \rangle$ (courbe E_2).

La figure 5 est un graphe qui représente l'écart relatif de vitesse de croissance Δv (en pourcentage relatif) entre les cristaux d'oxyde d'indices de Miller $\langle 100 \rangle$ de la courbe E_1 et $\langle 111 \rangle$ de la courbe E_2 de la figure 4, en fonction de la température (en degrés Celsius).

Ces résultats montrent que plus la température est basse, plus l'écart de vitesse de croissance entre les cristaux d'orientations cristallines différentes $\langle 100 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$ est important. En particulier, cet écart relatif est d'environ 48 % lorsque la température est de 875°C, puis augmente pour des températures inférieures à 875°C, au-delà de 50 %.

Au contraire, plus la température est élevée, plus l'écart de vitesse de croissance entre les cristaux d'orientations cristallines différentes $\langle 100 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$ est faible. En particulier, cet écart est d'environ 9 % lorsque la température est de 1200°C.

De plus, le temps d'oxydation augmente très fortement pour des températures inférieures à 1000°C, et encore davantage pour des températures inférieures à 850°C. Ainsi, il est souhaitable de ne pas descendre en dessous de 750°C afin que le procédé puisse être réalisable dans un temps compatible avec les cadences industrielles et reste économiquement viable.

L'oxydation de la couche de piégeage de charges 2 est accompagnée de l'oxydation de la face opposée du substrat de base 1. Compte tenu de la différence de matériaux entre les deux faces du substrat, il se produit une déformation du substrat semi-conducteur 10 comprenant le substrat de base 1 et la couche de piégeage de charges 2. Cette déformation est globale, c'est-à-dire que la courbure du substrat dans son ensemble est modifiée afin de prendre une forme concave ou convexe. Lorsque le substrat se présente sous la forme d'un disque, celui-ci possède après déformation une forme généralement parabolique.

Plus précisément, lors de l'oxydation, la couche de piégeage de charges 2 récupère les contraintes mécaniques de la couche d'oxyde 3 en croissance. Le substrat se déforme alors de manière convexe.

Les termes « convexe » et « concave » s'entendent par rapport à la courbure de la face du substrat 30 destinée à former l'interface de collage avec le substrat donneur décrit dans la suite du présent texte, dite « face avant ». Dès lors, le substrat est dit « convexe » lorsque la courbure de la face avant est convexe, et est dit « concave » lorsque la courbure de la face avant est concave.

Le substrat 30 représenté sur la figure 6 a été déformé de manière convexe. La face avant 31 est la face supérieure. La face arrière 32 est parallèle à la face avant.

La courbure du substrat est typiquement quantifiée par un paramètre d'amplitude appelé « bow » en anglais et noté Bw.

Bw correspond à la distance entre le point central C du plan médian Pm (représenté en traits pointillés) du substrat et un plan de référence P correspondant à un support de référence sur lequel repose le substrat. Bw est positif dans le cas d'une courbure convexe conformément à la figure 6, et négatif dans le cas d'une courbure concave.

Le demandeur a en outre remarqué que le fait de réaliser au moins en partie l'oxydation de la couche de piégeage de charges 2 à une température plus basse comparativement à l'état de l'art, en particulier à une température comprise entre 750°C et 875°C, permet de diminuer le bow Bw. Les différences de courbure entre la surface inférieure de la couche de piégeage de charges 2 à l'interface avec le substrat de base 1 et la surface supérieure de la couche de piégeage de charges à l'interface avec l'oxyde 3 sont ainsi réduites, ce qui réduit de ce fait les contraintes mécaniques au sein de la couche de piégeage de charges.

A partir du substrat receveur 30 obtenu par le procédé décrit précédemment, on fabrique une structure de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquences, par un procédé de fabrication dont les étapes sont décrites ci-dessous.

On fournit le substrat receveur 30, qui comprend successivement le substrat de base 1, la couche de piégeage de charges 2, et la couche d'oxyde 3. On fournit également un second substrat, dit substrat donneur, en matériau monocristallin.

De préférence, le substrat donneur comprend un substrat en matériau semi-conducteur.

On forme une zone de fragilisation dans le substrat donneur, de sorte à délimiter une couche à transférer.

La couche à transférer est de préférence une couche semi-conductrice.

La zone de fragilisation est formée dans le substrat donneur à une profondeur prédéterminée qui correspond sensiblement à l'épaisseur de la couche à transférer. De préférence, la zone de fragilisation est créée par implantation d'espèces atomiques, par exemple des atomes d'hydrogène et/ou d'hélium, dans le substrat donneur. En pratique, l'implantation des espèces atomiques est de préférence réalisée directement au travers du matériau monocristallin à la surface libre du substrat donneur.

On colle ensuite le substrat donneur sur le substrat receveur. La couche d'oxyde et la couche à transférer se trouvent à l'interface de collage.

On procède ensuite au détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation, afin de transférer la couche sur le substrat receveur (procédé Smart Cut™). On obtient ainsi la structure finale, dans laquelle la couche d'oxyde est agencée entre la couche de piégeage de charges et la couche transférée.

De manière alternative, le transfert de la couche peut être réalisé par amincissement du substrat donneur par sa face opposée à l'interface de collage, jusqu'à l'obtention de l'épaisseur souhaitée pour la couche.

Selon un mode de réalisation, la couche à transférer du substrat donneur comprend un matériau ferroélectrique.

Le matériau ferroélectrique est avantageusement choisi parmi : LiTaO_3 , LiNbO_3 , LiAlO_3 , BaTiO_3 , PbZrTiO_3 , KNbO_3 , BaZrO_3 , CaTiO_3 , PbTiO_3 ou de KTaO_3 .

Le substrat donneur de ladite couche monocristalline à transférer peut prendre la forme d'une plaquette, circulaire, de dimension normalisée, par exemple de 150 mm ou 200 mm de diamètre. L'invention n'est cependant nullement limitée à ces dimensions ou à cette forme. Cette plaquette peut avoir été prélevée d'un lingot de matériau ferroélectrique, ce prélèvement ayant été réalisé de manière à former un substrat donneur présentant une orientation cristalline prédéterminée. De manière alternative, le substrat donneur peut comprendre une couche de matériau ferroélectrique assemblé à un substrat support.

L'orientation cristalline de la couche monocristalline de matériau ferroélectrique à transférer est choisie en fonction de l'application visée. Ainsi, en ce qui concerne le matériau LiTaO_3 , il est usuel de choisir une orientation comprise entre 30° et 60°XY , ou entre 40° et 50°XY , en particulier dans le cas où l'on souhaite exploiter les propriétés de la couche mince pour former un filtre SAW (« Surface Acoustic Wave » en anglais). En ce qui concerne le matériau LiNbO_3 , il est usuel de choisir une orientation autour de 128°XY . Mais l'invention n'est nullement limitée à une orientation cristalline particulière.

Quelle que soit l'orientation cristalline du matériau ferroélectrique du substrat donneur, le procédé comprend par exemple l'introduction d'espèces (ions et/ou atomes) d'hydrogène et/ou d'hélium dans ce substrat donneur. Cette introduction peut par exemple correspondre à une implantation d'hydrogène, c'est-à-dire, un bombardement ionique d'hydrogène de la face plane du substrat donneur.

De façon connue en soi, les ions implantés ont pour but de former un plan de fragilisation délimitant une première couche de matériau ferroélectrique à transférer qui est située du côté de la face et une autre partie formant le reste du substrat. La nature, la dose des espèces implantées et le type d'ions implantés ainsi que l'énergie d'implantation sont choisies en fonction de l'épaisseur de la couche que l'on souhaite transférer et des propriétés physico-chimiques du substrat donneur. Dans le cas d'un substrat donneur en LiTaO_3 , on pourra ainsi choisir d'implanter une dose d'hydrogène comprise entre $1\text{E}16$ et $5\text{E}17\text{ at/cm}^2$ avec une énergie comprise entre 30 et 300 keV pour délimiter une première couche de l'ordre de 20 à 2000 nm d'épaisseur.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Evolution de l'intensité du courant électrique dans la structure en fonction du champ électrique

Pour illustrer les avantages obtenus par le procédé de l'invention décrit précédemment, une étude de l'évolution du courant électrique dans la structure en fonction du champ électrique a été réalisée.

La figure 7 montre un graphe qui représente l'évolution de l'intensité du courant, en ampère (A) avec un facteur 100 afin de rendre le graphe plus lisible, en fonction du champ électrique, en Mégavolt par centimètre (MV/cm), pour différents substrats obtenus par collage inversé conformément à l'invention. Lesdits substrats diffèrent par les conditions de formation d'oxydation du substrat receveur pour former la couche d'oxyde enterrée.

On mesure le courant électrique entre la masse et la surface libre du substrat par l'intermédiaire d'une pièce d'aluminium agencée sur la couche d'oxyde et d'une pointe de mesure.

Les courbes référencées C_{ref} , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , et C_5 sont les suivantes :

- la courbe C_{ref} correspond à la référence, c'est-à-dire un substrat obtenu par collage direct, avec une couche d'oxyde de 4000 Angström. Elle présente une rupture de pente correspondant à un champ électrique maximal d'environ 7 MV/cm ;
- la courbe C_1 correspond à une oxydation réalisée intégralement à 850°C sans recuit additionnel. Elle présente un champ électrique maximal d'environ 6 MV/cm ;
- la courbe C_2 correspond à une oxydation réalisée à 950°C puis dont la température a été augmentée à 1100°C dans un four traditionnel pendant 1 heure.. Elle présente un champ électrique maximal d'environ 3,7 MV/cm ;
- la courbe C_3 correspond à une oxydation réalisée intégralement à 950°C sans recuit thermique. Elle présente un champ électrique maximal d'environ 3,5 MV/cm ;
- la courbe C_4 correspond à une oxydation réalisée intégralement à 950°C suivie d'un recuit thermique RTA (Recuit Thermique Rapide, ou « Rapid Thermal Annealing » en anglais) de 45s à 1100°C. Elle présente un champ électrique maximal d'environ 2,8 MV/cm ;
- la courbe C_5 correspond à une oxydation réalisée intégralement à 1000°C suivie d'un recuit thermique RTA de 45s à 1100°C. Elle présente un champ électrique maximal d'environ 2,8 MV/cm.

Ces résultats montrent qu'une diminution de la température d'oxydation permet d'augmenter le champ électrique maximal, ce qui se traduit par une augmentation correspondante de la tension de claquage.

REFERENCES

[1]: *Effect of Physical Stress on the Degradation of Thin SiO₂ Films Under Electrical Stress*, Tien-Chun Yang, 2000 IEEE.

REVENDICATIONS

1. Procédé de fabrication d'un substrat receveur (30) pour une structure de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquences, comprenant les étapes suivantes :
 - fourniture d'un substrat semi-conducteur (10) comprenant un substrat de base (1) en matériau monocristallin et une couche de piégeage de charges (2) en silicium polycristallin agencée sur le substrat de base (1),
 - oxydation de la couche de piégeage de charges (2) pour former une couche d'oxyde (3) agencée sur ladite couche de piégeage de charges, le procédé étant caractérisé en ce que l'oxydation de la couche de piégeage de charges (2) est réalisée au moins en partie à une température inférieure ou égale à 875°C, de la manière suivante :
 - démarrage de l'oxydation à une première température (T_1) comprise entre 750°C et 1000°C,
 - diminution de la température jusqu'à une deuxième température (T_2), inférieure à la première température (T_1), comprise entre 750°C et 875°C,
 - poursuite de l'oxydation à la deuxième température (T_2).
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel l'oxydation de la couche de piégeage de charges (2) est réalisée au moins en partie à une température supérieure ou égale à 750°C.
3. Procédé selon la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel la diminution de la température depuis la première température (T_1) à la deuxième température (T_2) est progressive.
4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel au moins 50%, de préférence au moins 70%, de l'épaisseur de la couche d'oxyde est réalisée à la première température (T_1), et au moins 20%, de préférence au moins 30%, de l'épaisseur de la couche d'oxyde est réalisée à la deuxième température (T_2).
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la couche d'oxyde (3) formée a une épaisseur comprise entre 200 nm et 400 nm.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la couche de piégeage de charges (2) présente une épaisseur comprise entre 20 nm et 500 nm.
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la couche de piégeage de charges (2) est préalablement déposée sur le substrat de base (1) en matériau monocristallin par dépôt chimique en phase vapeur à basse pression dans un réacteur.
8. Procédé de fabrication d'une structure de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquences, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :
 - fabrication d'un substrat receveur (30) selon l'une quelconque des revendications précédentes,
 - fourniture d'un substrat donneur comprenant un substrat monocristallin,
 - collage du substrat donneur sur le substrat receveur,
 - transfert d'une couche du substrat donneur sur le substrat receveur.
9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel la couche transférée du substrat donneur comprend un matériau semi-conducteur.
10. Procédé selon la revendication 8, dans lequel la couche transférée du substrat donneur comprend un matériau ferroélectrique.
11. Procédé selon la revendication 10, dans lequel le matériau ferroélectrique est choisi parmi : LiTaO_3 , LiNbO_3 , LiAlO_3 , BaTiO_3 , PbZrTiO_3 , KNbO_3 , BaZrO_3 , CaTiO_3 , PbTiO_3 , KTaO_3 .
12. Procédé selon l'une des revendications 8 à 11, dans lequel ledit transfert comprend les étapes suivantes :
 - implantation d'espèces atomiques dans le substrat donneur de manière à former une zone de fragilisation qui délimite une couche de matériau semi-conducteur ou ferroélectrique monocristallin à transférer,
 - collage du substrat donneur sur le substrat receveur, la couche d'oxyde et la couche de matériau semi-conducteur ou ferroélectrique monocristallin à transférer étant à l'interface de collage,
 - détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation afin de transférer la couche de matériau semi-conducteur ou ferroélectrique monocristallin sur le substrat receveur, la couche d'oxyde étant agencée

entre la couche de piégeage de charges et la couche de matériau semi-conducteur ou ferroélectrique monocristallin transférée.

13. Procédé selon la revendication 12, dans lequel le matériau semi-conducteur ou ferroélectrique monocristallin s'étend à la surface du substrat donneur, l'implantation des espèces atomiques étant réalisée directement au travers de ladite surface.