

SUBSTRAT DE TYPE SEMI-CONDUCTEUR SUR ISOLANT POUR DES APPLICATIONS RADIOFRÉQUENCES

5 DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

La présente invention concerne un substrat de type semi-conducteur sur isolant pour des applications radiofréquences. L'invention se rapporte également à un procédé de fabrication d'un tel substrat par transfert d'une couche d'un substrat donneur sur un substrat receveur.

10

ETAT DE LA TECHNIQUE

Les substrats de type semi-conducteur sur isolant sont des structures multicouches comprenant un substrat support qui est généralement en silicium, une couche électriquement isolante agencée sur le substrat, typiquement une couche d'oxyde de silicium, et une couche semi-conductrice, dite couche active, agencée sur la couche isolante, dans laquelle sont réalisés des composants électroniques, qui est généralement une couche de silicium.

15

De tels substrats sont dits « Semiconductor on Insulator » (acronyme SeOI) en anglais, en particulier « Silicon on Insulator » (SOI) lorsque le matériau semi-conducteur est du silicium.

20

La couche d'oxyde, qui se trouve entre le substrat support et la couche active, est alors dite « enterrée », et est appelée « BOX » pour Buried OXide en anglais.

Les substrats SOI sont largement utilisés pour la fabrication de dispositifs radiofréquences. Dans ce cas, des composants radiofréquences sont réalisés dans la couche active.

25

Un problème récurrent des substrats SOI pour applications radiofréquences est que des charges électriques qui sont piégées dans la couche de BOX conduisent à une accumulation sous cette même couche, dans le substrat support, de charges de signe opposé formant un plan électriquement conducteur.

30

Dans ce plan conducteur, les charges mobiles sont susceptibles d'interagir fortement avec les champs électromagnétiques générés par les composants radiofréquences de la couche active. On observe alors une forte chute de la résistivité du substrat support, dans un plan situé directement sous la couche de BOX, et ce même lorsque le substrat support présente une résistivité électrique élevée.

35

Ceci aboutit à une consommation inutile d'une partie de l'énergie du signal par perte de couplage entre les composants radiofréquences et le substrat, et des interactions possibles entre les composants radiofréquences eux-mêmes par diaphonie (« crosstalk » selon la terminologie anglosaxonne).

De plus, les porteurs de charges du substrat peuvent entraîner la génération d'harmoniques non voulues susceptibles d'interférer avec les signaux se propageant dans le dispositif radiofréquence et de dégrader leur qualité.

Pour limiter ces phénomènes, il est connu d'insérer entre la couche de BOX et le substrat support, directement sous la couche de BOX, une couche de piégeage de charges, en silicium polycristallin. Les joints des grains formant le cristal constituent alors des pièges pour les porteurs de charges, ceux-ci pouvant provenir de la couche de piégeage elle-même ou du substrat support sous-jacent. De la sorte, on prévient l'apparition du plan conducteur sous la couche électriquement isolante et la chute de résistivité du substrat support.

Cependant, l'efficacité d'une telle couche de piégeage de charge n'est pas toujours optimale, et les phénomènes de perte de couplage et de génération d'harmoniques non voulues peuvent néanmoins se produire.

En particulier, la couche de silicium polycristallin, qui est au contact du substrat support qui est en silicium monocristallin, a tendance à recristalliser sous l'effet des traitements thermiques appliqués au substrat pendant sa fabrication et la fabrication des composants radiofréquences. Le substrat support sert en effet de germe à la recristallisation. Or, la recristallisation de la couche de silicium polycristallin, en réduisant le nombre de grains, réduit également la capacité de ladite couche à piéger des charges électriques.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

Un but de l'invention est de proposer un substrat de type semi-conducteur sur isolant permettant de surmonter les inconvénients mentionnés précédemment.

L'invention vise à proposer un tel substrat permettant de limiter les interactions entre les charges mobiles dans le substrat et les champs électromagnétiques générés par les composants radiofréquences de la couche active.

L'invention vise de ce fait à limiter voire à supprimer les phénomènes de perte de couplage entre les composants radiofréquences et le substrat et de génération d'harmoniques indésirables.

A cette fin, l'invention propose un substrat de type semi-conducteur sur isolant pour des applications radiofréquences, comprenant :

- un substrat support en silicium,
- une couche électriquement isolante agencée sur le substrat support,
- une couche monocristalline agencée sur la couche électriquement isolante,

le substrat étant principalement caractérisé en ce qu'il comprend en outre une couche de carbure de silicium SiC agencée entre le substrat support et la couche électriquement isolante, qui présente une épaisseur comprise entre 1 nm et 5 nm, la

surface de la couche de carbure de silicium SiC qui est du côté de la couche électriquement isolante étant rugueuse.

La présence d'une couche de SiC rugueuse permet de limiter la chute de résistivité observée habituellement à l'interface entre le substrat support et la couche de piégeage de charges, et d'obtenir un substrat de type semi-conducteur sur isolant présentant de
5 meilleures performances radiofréquences.

Une épaisseur comprise entre 1 nm et 5 nm pour la couche de SiC rugueuse permet de reproduire le niveau de rugosité dû au niveau de rugosité du substrat support sur lequel elle repose, et ainsi de maximiser la surface de cette couche de SiC.

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

- la couche monocristalline est de type semi-conducteur, c'est-à-dire qu'elle comprend un matériau semi-conducteur ;
- la couche monocristalline est de type ferroélectrique, c'est-à-dire qu'elle
15 comprend un matériau ferroélectrique. De préférence, 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 ;
- la surface de la couche de carbure de silicium présente une rugosité supérieure ou égale à 10 nm RMS, de préférence supérieure ou égale à 100 nm RMS ;
- 20 - le substrat comprend en outre une couche de piégeage de charges en silicium polycristallin agencée entre la couche de carbure de silicium et la couche électriquement isolante ;
- le substrat support est monocristallin ;
- la couche électriquement isolante est une couche d'oxyde de silicium.

25

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

- fourniture d'un substrat support en silicium,
- 30 - rugosification d'une surface libre du substrat support par gravure sélective,
- formation d'une couche de carbure de silicium sur la surface rugosifiée, la surface de la couche de carbure de silicium qui est du côté opposé au substrat support étant rugueuse,
- formation d'une couche de collage sur la couche de carbure de silicium,
- 35 - transfert d'une couche électriquement isolante et d'une couche monocristalline sur la couche de collage, la couche électriquement isolante étant à l'interface avec la couche de collage.

La gravure est dite « sélective » en ce que le silicium constitutif du substrat support n'est pas attaqué de manière uniforme sur toute la surface libre du substrat support, mais que des régions privilégiées de cette surface (correspondant à des plans cristallins particuliers) sont attaquées plus rapidement que les autres régions. De cette manière, la
5 rugosification est contrôlée.

Le paramétrage de la gravure sélective permet de choisir et d'ajuster la profondeur souhaitée des cavités formées dans l'épaisseur du substrat support depuis sa surface libre, et donc d'ajuster la rugosité attendue de la surface de la couche de SiC formée ultérieurement.

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

- la couche monocristalline est de type semi-conducteur, c'est-à-dire qu'elle comprend un matériau semi-conducteur ;
- la couche monocristalline est de type ferroélectrique, c'est-à-dire qu'elle
15 comprend un matériau ferroélectrique. De préférence, 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 ;
- l'étape de rugosification comprend une gravure sélective selon des plans cristallins de la surface libre du substrat support ;
- 20 - l'étape de rugosification comprend :
 - la nucléation d'îlots de carbure de silicium sur la surface libre du substrat support par exposition de ladite surface libre à un gaz précurseur contenant des espèces chimiques carbonées qui engendre une réaction desdites espèces chimiques carbonées avec du silicium du substrat support,
 - 25 - la gravure sélective des zones de la surface libre du substrat support séparant les îlots.
- la gravure sélective est réalisée par voie sèche ;
- la gravure sélective par voie sèche est réalisée avec de l'acide chlorhydrique ;
- la couche de carbure de silicium est formée par exposition de ladite surface
30 rugosifiée à un gaz précurseur contenant des espèces chimiques carbonées qui engendre une réaction desdites espèces chimiques carbonées avec du silicium du substrat support ;
- la couche de carbure de silicium sur la surface rugosifiée du substrat support est formée par dépôt chimique en phase vapeur ;
- 35 - le procédé comprend en outre, avant le transfert de la couche électriquement isolante et de la couche monocristalline, le dépôt d'une couche de piégeage de charges en silicium polycristallin sur la couche de carbure de silicium ;
- l'étape de transfert comprend :

- la fourniture d'un substrat donneur recouvert d'une couche électriquement isolante,
- la formation d'une zone de fragilisation dans le substrat donneur, de sorte à délimiter une couche monocristalline,
- 5 - le collage du substrat donneur sur le substrat support par l'intermédiaire de la couche électriquement isolante et de la couche de collage,
- le détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation, de sorte à transférer la couche monocristalline sur le substrat support.

10 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 illustrant un mode de réalisation d'un substrat de type
15 semi-conducteur sur isolant pour des applications radiofréquences selon l'invention ;

la figure 2A est un schéma d'un substrat support en silicium ;

la figure 2B est un schéma illustrant une étape de gravure du substrat support de la figure 1, selon un premier mode de réalisation ;

la figure 2C est un schéma illustrant une étape de formation d'une couche de SiC
20 sur la surface gravée du substrat de la figure 2B, selon le premier mode de réalisation, pour fabriquer un substrat intermédiaire ;

la figure 3A est un schéma illustrant une étape de la nucléation d'îlots de carbure de silicium sur un substrat support, selon un deuxième mode de réalisation ;

la figure 3B est un schéma illustrant une étape de gravure du substrat de la figure
25 3A ;

la figure 3C est un schéma illustrant la croissance de la couche de SiC jusqu'à l'obtention d'une couche continue de SiC ;

la figure 4 est un schéma d'un substrat de type semi-conducteur sur isolant pour des applications radiofréquences fabriqué à partir du substrat intermédiaire obtenu par le
30 premier mode réalisation du procédé illustré sur les figures 2A, 2B, et 2C ;

la figure 5 est un schéma d'un substrat de type semi-conducteur sur isolant pour des applications radiofréquences fabriqué à partir du substrat intermédiaire obtenu par le deuxième mode réalisation du procédé illustré sur les figures 3A, 3B, et 3C ;

la figure 6 est un graphe représentant la résistivité en fonction de l'épaisseur de
35 substrat dans le cas d'un substrat de type semi-conducteur sur isolant comprenant une couche de carbure de silicium SiC lisse ou une couche de carbure de silicium SiC rugueuse.

DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION DE L'INVENTION

Un premier objet de l'invention concerne un substrat de type semi-conducteur sur isolant, dit « substrat SOI », pour des applications radiofréquences.

La figure 1 illustre un mode de réalisation du substrat SOI selon l'invention.

- 5 Le substrat SOI, sous la référence 1, comprend un substrat support 2 en silicium, une couche électriquement isolante 3 agencée sur le substrat support, et une couche monocristalline 4 agencée sur la couche électriquement isolante. Par « sur » on désigne une position relative des couches en considérant le substrat de sa base (du côté du substrat support) vers sa surface (du côté de la couche monocristalline), mais ce terme
10 n'implique pas nécessairement un contact direct entre les couches considérées.

Le substrat support 2 est de préférence monocristallin.

- La couche électriquement isolante 3 est de préférence une couche d'oxyde. Du fait de son positionnement dans le substrat SOI entre le substrat support 2 et la couche monocristalline 4, une telle couche d'oxyde est généralement désignée par le terme
15 « BOX » pour Buried OXide (oxyde enterré) en anglais. La couche électriquement isolante est de préférence une couche d'oxyde de silicium.

La couche monocristalline 4 est avantageusement une couche active, c'est-à-dire une couche destinée à la réalisation de composants radiofréquences en fonction de l'application radiofréquence souhaitée pour le substrat SOI.

- 20 La couche monocristalline est de préférence de type semi-conducteur. De manière particulièrement préférée, il s'agit d'une couche de silicium monocristallin.

- Selon l'invention, le substrat SOI 1 comprend en outre une couche 5 de carbure de silicium (SiC), agencée entre le substrat support 2 et la couche électriquement isolante 3. La couche 5 de SiC est en contact direct avec le substrat support 2. Dans le mode de
25 réalisation de la figure 1, la couche 5 de SiC est également en contact direct avec la couche électriquement isolante 3.

Le carbure de silicium est de préférence polycristallin.

- La surface supérieure 6 de la couche de SiC, qui se trouve à l'interface avec la couche électriquement isolante, est rugueuse. Cela signifie que la surface supérieure de
30 la couche de SiC présente des cavités 7. Ces cavités ont une taille, c'est-à-dire une hauteur (selon l'épaisseur de la couche) et une largeur (dans un sens perpendiculaire à la hauteur), qui dépend de la valeur de rugosité de la surface de la couche SiC.

- Dans le domaine des semi-conducteurs, on considère que la surface d'un substrat est rugueuse lorsqu'elle ne permet pas un collage de bonne qualité (c'est-à-dire
35 présentant une énergie de collage suffisamment élevée et uniforme sur l'interface de contact au regard des étapes de procédé ultérieures) avec un autre substrat, par exemple un autre substrat semi-conducteur, éventuellement recouvert d'une couche d'oxyde.

De manière générale, une surface est ainsi dite rugueuse lorsqu'elle présente une rugosité RMS d'au moins 6 Angströms, c'est-à-dire 0,6 nanomètres (nm).

Selon l'invention, la surface de la couche de SiC présente de préférence une rugosité supérieure ou égale à 10 nm RMS, et de manière davantage préférée supérieure
5 ou égale à 100 nm RMS. La rugosité RMS correspond à la moyenne quadratique de toutes les ordonnées du profil de rugosité dans la longueur de base considérée. L'homme du métier sait à quoi correspond la rugosité RMS et comment la mesurer. Aussi, ces éléments ne seront pas décrits en détail dans le présent texte.

Sur la figure 1, la surface 6 de la couche de SiC est représentée schématiquement
10 avec un profil en dent de scie.

La surface de la couche électriquement isolante 3 qui se trouve au contact de la couche de SiC 5 présente un profil complémentaire de celui de la surface de ladite couche de SiC, comme l'illustre la figure 1. Plus précisément, la surface inférieure de la couche électriquement isolante au contact de la couche SiC présente un profil en dent de
15 scie dont la forme des dents correspond à la forme des cavités de la couche de SiC.

Dès lors, la couche de SiC 5, qui constitue l'interface entre le substrat support 2 et la couche électriquement isolante 3, n'est pas lisse mais au contraire irrégulière, accidentée, avec des cavités.

Le profil irrégulier et accidenté de la couche de SiC permet d'augmenter l'aire de la surface supérieure de ladite couche de SiC, c'est-à-dire l'aire de l'interface entre la
20 couche de SiC et la couche électriquement isolante.

La couche de SiC 5 a une fonction de piégeage des charges électriques dans le substrat SOI. Les joints des grains de la couche de SiC formant le cristal de carbure de silicium constituent en effet des pièges pour les porteurs de charges.

L'augmentation de l'aire de l'interface entre le substrat support et la couche électriquement isolante permet dès lors d'améliorer le piégeage des charges dans le substrat SOI, comparativement à une couche de piégeage des charges de l'état de l'art en silicium polycristallin (notamment du fait de l'absence de recristallisation lors des traitements thermiques ultérieurs), ou à une couche de carbure de silicium lisse (du fait de
25 l'aire plus grande de l'interface).

Selon un deuxième mode de réalisation illustré sur la figure 4, le substrat SOI 1 comprend également au moins une couche de piégeage de charges 8, qui est différente de la couche de SiC. Une telle couche de piégeage de charges, qui est connue en soi, est avantageusement en silicium polycristallin.

La couche de piégeage de charges 8 est agencée entre la couche de SiC 5 et la couche électriquement isolante 3. La combinaison de la couche de piégeage de charges et de la couche de SiC améliore encore le piégeage des charges électriques au sein du substrat SOI. En particulier, la couche de SiC limite la recristallisation du polysilicium de la
35

couche de piégeage de charges. En effet, la couche de SiC forme une barrière entre le silicium du substrat support 2 et les grains du polysilicium de la couche de piégeage de charges 8, évitant ainsi que les grains de polysilicium ne recristallisent suivant le substrat support.

5 Un procédé de fabrication d'un substrat SOI tel que présenté précédemment va maintenant être décrit.

Le procédé de l'invention consiste d'abord, à partir du substrat support en silicium, à rugosifier une surface libre dudit substrat support par gravure sélective. Ceci permet de former des cavités dans la surface libre du substrat support. On forme ensuite une couche
10 de carbure de silicium SiC à partir de la surface rugosifiée.

Le type de gravure sélective ainsi que les paramètres de gravure sont choisis et ajustés en fonction de la profondeur souhaitée des cavités, et donc de la rugosité attendue de la surface de la couche de SiC formée ultérieurement.

La rugosification peut avantageusement être réalisée selon deux modes de
15 réalisation différents qui vont maintenant être décrits.

Selon un premier mode de réalisation de la rugosification, en référence aux figures 2A, 2B, et 2C, on fournit d'abord un substrat support 2 visible sur la figure 2A.

On procède à la rugosification d'une surface libre 9 du substrat support, par gravure sélective. On obtient alors le substrat de la figure 2B.

20 La gravure est dite « sélective » en ce que le silicium n'est pas attaqué de manière uniforme sur toute la surface du substrat, mais que des régions privilégiées de la surface (correspondant à des plans cristallins particuliers) sont attaquées plus rapidement que les autres régions.

La gravure sélective est de préférence réalisée par voie sèche. L'acide
25 chlorhydrique est tout particulièrement adapté à cet effet.

On forme ensuite une couche de SiC 5 sur la surface gravée, comme illustré sur la figure 2C.

Pour ce faire, selon un premier mode de réalisation, la surface gravée 9 est exposée à un gaz précurseur contenant des espèces chimiques carbonées. Ces dernières
30 réagissent avec le silicium présent dans le substrat support, pour former du carbure de silicium SiC. La croissance de la couche de SiC se fait donc à partir de la surface rugosifiée, dans l'épaisseur du substrat support. De ce fait, la surface libre de la surface de la couche de SiC (qui était initialement la surface du substrat support de silicium) reste rugueuse.

35 Les paramètres expérimentaux pour la formation de la couche SiC, tels que le temps d'exposition, la température réactionnelle, ou encore la nature du gaz précurseur, sont ajustés de manière à former une fine couche de SiC, de préférence d'une épaisseur inférieure ou égale à 5 nm. On préférera également que l'épaisseur de la couche de SiC

soit supérieure ou égale à 1 nm. Compte tenu de la température appliquée, la couche de SiC présente avantageusement une structure polycristalline.

La gravure est de préférence réalisée à une température comprise entre 700°C et 1300°C, à pression atmosphérique ou à une pression inférieure à la pression atmosphérique. On utilise de préférence l'acide chlorhydrique HCl sous forme gazeuse pour la gravure.

Concernant la formation de la couche de SiC, celle-ci est de préférence réalisée à une température comprise entre 700°C et 1300°C, à une pression inférieure à la pression atmosphérique. On peut utiliser comme gaz précurseur notamment du propane ou du méthane dans de l'hydrogène. Le temps de la réaction est fonction de la quantité de gaz précurseur ; en effet, la réaction est auto-limitante c'est-à-dire que le gaz carboné réagit avec le silicium en surface du substrat support et la réaction s'arrête lorsqu'il n'y a plus de silicium en surface libre.

Alternativement, selon un deuxième mode de réalisation, la couche de SiC est déposée sur la surface gravée par dépôt chimique en phase vapeur, communément appelé selon la terminologie anglaise « Chemical Vapor Deposition » et désigné sous l'acronyme CVD. La croissance de la couche de SiC se fait à partir de la surface rugosifiée, dans une direction opposée au substrat support. Ce mode de réalisation est moins préféré car, la couche de SiC étant déposée à une température plus basse que dans le précédent mode de réalisation, elle présente une structure amorphe. La couche de SiC est déposée de manière sensiblement homogène sur l'ensemble de la surface gravée, mais ce dépôt n'a pas pour effet de combler les cavités de la surface gravée, de sorte que la surface libre de la couche de SiC conserve au moins en partie la rugosité de la surface 9 sous-jacente.

Optionnellement, on dépose une couche de piégeage de charges 8 en silicium polycristallin sur la couche de SiC.

De manière particulièrement avantageuse, les étapes de gravure sélective, de formation de la couche de SiC et éventuellement de la couche de piégeage de charges sont réalisées dans un même bâti d'épitaxie, ce qui simplifie considérablement le procédé. De manière alternative, lesdites étapes peuvent être réalisées au moyen d'au moins deux équipements différents.

On ne réalise pas d'opération de lissage ou planarisation de la couche de SiC formée. Un polissage mécano-chimique (CMP, acronyme du terme anglo-saxon « chemical-mechanical polishing ») par exemple, serait d'ailleurs impossible à réaliser du fait de la faible épaisseur de la couche de SiC.

Selon un deuxième mode de réalisation de la rugosification, en référence aux figures 3A, 3B, et 3C, on fournit d'abord un substrat support visible sur la figure 3A.

On procède alors à la rugosification de la surface libre 9 du substrat support, en deux étapes. Une première étape comprend la nucléation (ou germination) d'îlots de carbure de silicium 10 sur ladite surface supérieure. Pour ce faire, on expose d'abord la face supérieure 9 à un gaz précurseur contenant des espèces chimiques carbonées. Ces dernières réagissent avec le silicium présent dans le substrat support, pour former du carbure de silicium SiC.

Les îlots 10 sont obtenus en stoppant l'exposition aux espèces chimiques carbonées avant que les îlots ne coalescent et forment une couche de SiC continue sur la surface gravée. A l'issue de cette étape de nucléation, les îlots de SiC sont séparés les uns des autres par des zones 11 de silicium.

Dans une seconde étape du procédé de rugosification, on effectue ensuite une gravure sélective du substrat support. La gravure est dite « sélective » en ce que seules les zones de silicium sont gravées, tandis que les îlots 10 de SiC ne le sont pas. Les îlots de SiC jouent en effet le rôle d'un masque qui protège le matériau du substrat support sous-jacent de la gravure. La gravure sélective est de préférence réalisée par voie sèche. L'acide chlorhydrique est tout particulièrement adapté à cet effet.

Après gravure, on obtient le substrat de la figure 3B.

Chaque îlot 10 comprend une portion du substrat support recouverte d'une couche de SiC, et est séparé des îlots adjacents par les zones 12 de silicium gravées, les îlots et les zones gravées formant ensemble une surface rugueuse du substrat support.

On poursuit ensuite la formation de la couche de SiC (croissance) jusqu'à l'obtention d'une couche continue 5 de SiC, comme illustré sur la figure 3C.

Pour ce faire, selon un premier mode de réalisation, la surface rugosifiée 9 est exposée à un gaz précurseur contenant des espèces chimiques carbonées. Ces dernières réagissent avec le silicium présent dans le substrat support, pour former du carbure de silicium SiC.

Les paramètres expérimentaux pour la formation de la couche de SiC, tels que le temps d'exposition, la pression, la température réactionnelle, ou encore la nature du gaz précurseur, et le débit de gaz précurseur sont ajustés de manière à former une fine couche de SiC, de préférence d'une épaisseur inférieure ou égale à 5 nm. On préférera également que l'épaisseur de la couche de SiC soit supérieure ou égale à 1 nm.

La formation de la couche de SiC est de préférence réalisée à une température comprise entre 700°C et 1300°C, à une pression inférieure à la pression atmosphérique. Le temps de réaction est de préférence de l'ordre de quelques minutes pour des températures comprises dans la gamme précédente de 700°C à 1300°C. Le ratio de débit entre le gaz carboné et l'hydrogène influe sur les vitesses de germination et de croissance et sur l'épaisseur finale de la couche de SiC.

Alternativement, la couche de SiC peut être déposée sur la surface rugosifiée par CVD comme décrit plus haut pour le premier mode de réalisation de la rugosification.

Optionnellement, on dépose une couche de piégeage de charges 8 en silicium polycristallin sur la couche de SiC.

- 5 De manière particulièrement avantageuse, les étapes de nucléation des îlots de SiC, de gravure sélective, de poursuite de la formation de la couche de SiC et éventuellement la formation de la couche de piégeage de charges sont réalisées dans un même bâti d'épitaxie, ce qui simplifie considérablement le procédé.

- 10 Quel que soit le mode de réalisation, après rugosification de la surface libre 9 du substrat support, on forme une couche de collage sur la couche de SiC, puis on transfère une couche électriquement isolante 3 et une couche monocristalline 4 sur la couche de collage, de sorte que la couche électriquement isolante se trouve à l'interface avec la couche de collage. Contrairement à la couche de SiC, la couche de collage présente une surface lisse adaptée pour assurer un collage de bonne qualité.

- 15 La couche de collage permet d'assurer une bonne adhésion de la couche électriquement isolante 3 et de la couche monocristalline 4 sur la couche SiC 5. Il peut s'agir d'une couche d'oxyde de silicium, d'une couche adhésive, d'une colle, ou de tout autre moyen adapté à cet effet.

- 20 Selon un mode de réalisation préféré, le transfert est réalisé selon le procédé Smart Cut™ bien connu en soi, dont les principales étapes sont rappelées ci-après.

- On fournit un premier substrat, dit substrat receveur, qui comprend le substrat support 2, la couche de carbure de silicium SiC 5, et la couche de collage. Optionnellement, le substrat receveur comprend une couche de piégeage de charges 8 sur la couche de SiC, et la couche de collage est agencée sur la couche de piégeage de charges. On fournit également un second substrat, dit substrat donneur.

- 25 On forme une zone de fragilisation dans le substrat donneur, de sorte à délimiter une couche monocristalline 4. La zone de fragilisation est formée dans le substrat donneur à une profondeur prédéterminée qui correspond sensiblement à l'épaisseur de la couche monocristalline à transférer.

- 30 De préférence, la zone de fragilisation est créée par implantation d'atomes et/ou d'ions d'hydrogène et/ou d'hélium dans le substrat donneur.

On colle ensuite le substrat donneur sur le substrat receveur.

Une couche électriquement isolante 3 est agencée entre le substrat support 2 et la couche monocristalline 4.

- 35 Selon un premier mode de réalisation, la couche électriquement isolante 3 est sur le substrat receveur, agencée sur la couche SiC 5 ou, lorsque présente, sur la couche de piégeage de charges 8. La couche monocristalline 4 est collée sur la couche électriquement isolante 3 et se trouve donc à l'interface de collage.

Selon un deuxième mode de réalisation, la couche électriquement isolante 3 est sur le substrat donneur. A la fois la couche monocristalline 4 et la couche électriquement isolante 3 sont collées sur la couche de SiC par l'intermédiaire de la couche de collage. La couche électriquement isolante 3 se trouve donc à l'interface de collage.

- 5 Le procédé de transfert de couche n'est cependant pas limité au procédé Smart Cut™ ; ainsi, il pourra consister par exemple à coller le substrat donneur sur le substrat receveur puis à amincir le substrat donneur par sa face opposée au substrat receveur jusqu'à l'obtention de l'épaisseur souhaitée pour la couche monocristalline.

- 10 Les substrats SOI 1 obtenus après transfert selon le premier mode de réalisation et le deuxième mode de réalisation, sont représentés respectivement sur les figures 4 et 5.

Selon un mode de réalisation, la couche monocristalline 4 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 .

- 15 Le substrat donneur de ladite couche monocristalline peut avantageusement 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
20 substrat donneur présentant une orientation cristalline prédéterminée. De manière alternative, le substrat donneur peut comprendre une couche de matériau ferroélectrique assemblée 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
25 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.

- 30 Quelle que soit l'orientation cristalline du matériau ferroélectrique de la couche monocristalline 4, le procédé comprend par exemple l'introduction d'espèces (ions et/ou atomes) d'hydrogène et/ou d'hélium dans le 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.

- 35 De façon connue en soi, les atomes ou ions implantés ont pour but de former un plan de fragilisation délimitant une première couche de matériau ferroélectrique à transférer et une autre partie formant le reste du substrat. La nature, la dose des espèces implantées et le type des espèces implantées ainsi que l'énergie d'implantation sont

choisies en fonction de l'épaisseur de la couche à transférer et des propriétés physico-chimiques du substrat donneur. Dans le cas d'un substrat donneur en LiTaO_3 , on pourra tout particulièrement choisir d'implanter une dose d'hydrogène comprise entre $1\text{E}16$ et $5\text{E}17$ at/cm^2 avec une énergie comprise entre 30 et 300 keV pour délimiter une première

5 couche de l'ordre de 20 à 2000 nm d'épaisseur.

EXEMPLE : mesure de la résistivité électrique

On fournit initialement deux substrats.

Un premier substrat a été fabriqué par dépôt d'une couche de SiC sur un substrat

10 support dont la surface libre est lisse, c'est-à-dire sans réalisation d'une gravure préalable, puis transfert d'une couche électriquement isolante et d'une couche monocristalline sur la couche de SiC. La surface supérieure de la couche de SiC, du côté de la couche électriquement isolante, est donc lisse.

Un deuxième substrat a été fabriqué selon l'un des deux modes de réalisation du

15 procédé de fabrication décrits précédemment. Ce deuxième substrat comprend donc un substrat support, une couche de SiC dont la surface supérieure est rugueuse, ainsi qu'une couche électriquement isolante et une couche monocristalline agencées sur la couche de SiC rugueuse.

On mesure la résistivité électrique de chacun des deux substrats, par exemple par la

20 méthode des quatre points.

La figure 6 représente l'évolution de la résistivité électrique R (en ohm.cm) des substrats en fonction de leur profondeur P (en μm) à partir de la surface de la couche monocristalline pour le premier substrat dont la couche de SiC est lisse (courbe C1), et pour le deuxième substrat dont la couche de SiC est rugueuse (courbe C2).

25 Concernant la courbe C1, la résistivité chute fortement depuis la surface libre du substrat jusqu'à une profondeur légèrement inférieure à $1\ \mu\text{m}$ qui correspond à la profondeur de la couche de SiC, pour atteindre une valeur minimale d'environ $5\ \Omega.\text{cm}$.

Concernant la courbe C2, la résistivité chute beaucoup moins que pour la courbe 1, depuis la surface libre du substrat jusqu'à une profondeur légèrement inférieure à $1\ \mu\text{m}$,

30 pour atteindre une valeur minimale d'environ $90\ \Omega.\text{cm}$.

Ces courbes montrent que la couche de SiC rugueuse permet de limiter l'effet de l'interface entre le substrat support et la couche de piégeage. Plus la chute de résistivité à l'interface est importante, plus cette chute a un impact négatif sur les performances globales de piégeage de la couche de SiC.

35

REVENDICATIONS

1. Substrat (1) de type semi-conducteur sur isolant pour des applications radiofréquences, comprenant :
- 5 - un substrat support (2) en silicium,
 - une couche électriquement isolante (3) agencée sur le substrat support,
 - une couche monocristalline (4) agencée sur la couche électriquement isolante,
le substrat (1) étant caractérisé en ce qu'il comprend en outre une couche de
10 carbure de silicium SiC (5) agencée entre le substrat support (2) et la couche électriquement isolante (3), qui présente une épaisseur comprise entre 1 nm et 5 nm, la surface (6) de la couche de carbure de silicium SiC qui est du côté de la couche électriquement isolante (3) étant rugueuse.
- 15 2. Substrat selon la revendication 1, dans lequel la couche monocristalline (4) est de type semi-conducteur.
- 20 3. Substrat selon la revendication 1, dans lequel la couche monocristalline (4) comprend un matériau ferroélectrique.
4. Substrat selon la revendication 3, 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 .
- 25 5. Substrat selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ladite surface (6) de la couche de carbure de silicium (5) présente une rugosité supérieure ou égale à 10 nm RMS, de préférence supérieure ou égale à 100 nm RMS.
- 30 6. Substrat selon l'une des revendications précédentes, comprenant en outre une couche de piégeage de charges (8) en silicium polycristallin agencée entre la couche de carbure de silicium (5) et la couche électriquement isolante (3).
- 35 7. Substrat selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le substrat support (1) est monocristallin.
- 40 8. Substrat selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la couche électriquement isolante (3) est une couche d'oxyde de silicium.

9. Procédé de fabrication d'un substrat (1) de type semi-conducteur sur isolant pour des applications radiofréquences, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :
- fourniture d'un substrat support (2) en silicium,
 - rugosification d'une surface libre (9) du substrat support (2) par gravure sélective,
 - formation d'une couche de carbure de silicium (5) sur la surface rugosifiée (9), la surface de la couche de carbure de silicium qui est du côté opposé au substrat support (2) étant rugueuse,
 - formation d'une couche de collage sur la surface rugueuse de la couche de carbure de silicium (5),
 - transfert d'une couche électriquement isolante (3) et d'une couche monocristalline (4) sur la couche de collage, la couche électriquement isolante (3) étant à l'interface avec la couche de collage.
10. Procédé de fabrication selon la revendication 9, dans lequel la couche monocristalline (4) est de type semi-conducteur.
11. Procédé de fabrication selon la revendication 9, dans lequel la couche monocristalline (4) comprend un matériau ferroélectrique.
12. Procédé de fabrication selon la revendication 11, 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 .
13. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 9 à 12, dans lequel l'étape de rugosification comprend une gravure sélective selon des plans cristallins de la surface libre (9) du substrat support (2).
14. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 9 à 12, dans lequel l'étape de rugosification comprend :
- la nucléation d'îlots (10) de carbure de silicium sur la surface libre (9) du substrat support (2) par exposition de ladite surface libre à un gaz précurseur contenant des espèces chimiques carbonées qui engendre une réaction desdites espèces chimiques carbonées avec du silicium du substrat support (1),
 - la gravure sélective des zones (11) de la surface libre du substrat support séparant les îlots.

15. Procédé de fabrication selon la revendication 13 ou la revendication 14, dans lequel la gravure sélective est réalisée par voie sèche.
- 5 16. Procédé de fabrication selon la revendication 15, dans lequel la gravure sélective par voie sèche est réalisée avec de l'acide chlorhydrique.
- 10 17. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 9 à 16, dans lequel la couche de carbure de silicium (5) est formée par exposition de ladite surface rugosifiée à un gaz précurseur contenant des espèces chimiques carbonées qui engendre une réaction desdites espèces chimiques carbonées avec du silicium du substrat support (2).
- 15 18. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 9 à 17, dans lequel la couche de carbure de silicium (5) sur la surface rugosifiée (9) du substrat support est formée par dépôt chimique en phase vapeur.
- 20 19. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 9 à 18, comprenant en outre, avant le transfert de la couche électriquement isolante (3) et de la couche monocristalline (4), le dépôt d'une couche de piégeage de charges (8) en silicium polycristallin sur la couche de carbure de silicium (5).
- 25 20. Procédé selon l'une des revendications 9 à 18, dans lequel l'étape de transfert comprend :
- la fourniture d'un substrat donneur recouvert d'une couche électriquement isolante (3),
 - la formation d'une zone de fragilisation dans le substrat donneur, de sorte à délimiter une couche monocristalline (4),
 - le collage du substrat donneur sur le substrat support (2) par l'intermédiaire de la couche électriquement isolante (3) et de la couche de collage,
 - 30 - le détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation, de sorte à transférer la couche monocristalline (4) sur le substrat support (2).