

PROCEDE DE FABRICATION D'UN SUBSTRAT SEMI-CONDUCTEUR SUR ISOLANT POUR APPLICATIONS RADIOFREQUENCES

DOMAINE DE L'INVENTION

- 5 La présente invention concerne un procédé de fabrication d'un substrat semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquences.

ETAT DE LA TECHNIQUE

- 10 Les composants électroniques radiofréquences formés dans ou sur des substrats semi-conducteurs sont particulièrement sensibles à des phénomènes d'atténuation causés par les propriétés desdits substrats.

A cet effet, on utilise habituellement des substrats semi-conducteurs, notamment de silicium massif, présentant une résistivité électrique élevée, c'est-à-dire supérieure à 500 Ω .cm.

- 15 Par ailleurs, les substrats semi-conducteurs sur isolant de type FDSOI (acronyme du terme anglo-saxon « Fully Depleted Semiconductor On Insulator », c'est-à-dire semiconducteur sur isolant totalement déplété), apparaissent comme des alternatives intéressantes aux substrats semi-conducteurs massifs. Les substrats FDSOI comprennent successivement un substrat support, une couche électriquement isolante et une couche
20 mince semi-conductrice dans ou sur laquelle peuvent être fabriqués des composants électroniques. Dans un substrat FDSOI, la couche semi-conductrice présente une épaisseur suffisamment fine pour permettre une déplétion complète du canal de conduction d'un transistor formé dans ladite couche. Une telle couche présente typiquement une épaisseur de quelques dizaines de nanomètres. La couche électriquement isolante, qui est
25 généralement constituée d'un oxyde, est également fréquemment appelée BOX (acronyme du terme anglo-saxon « Buried OXide » ou oxyde enterré). Le procédé de fabrication des substrats FDSOI vise à assurer une grande précision de l'épaisseur de la couche semi-conductrice et de la couche électriquement isolante ainsi qu'une grande uniformité de ces épaisseurs, tant au sein d'un substrat que d'un substrat à l'autre au sein d'un même lot de
30 fabrication.

Il pourrait donc être intéressant, pour les applications radiofréquences, de former des substrats FDSOI avec des substrats supports constitués d'un matériau semi-conducteur à haute résistivité électrique.

- 35 Le procédé de fabrication d'un substrat FDSOI est schématisé sur les figures 1A à 1C. Ce procédé met en œuvre un transfert de couche d'un substrat donneur vers un substrat support, également connu sous le nom de procédé Smart Cut™.

En référence à la figure 1A, on fournit un substrat donneur 1, par exemple de silicium, recouvert d'une couche 10 électriquement isolante, par exemple d'oxyde de silicium (SiO_2).

Comme schématisé par les flèches, on met en œuvre une implantation d'espèces ioniques, telles que de l'hydrogène et/ou de l'hélium, au travers de la couche électriquement isolante 10, de sorte à former une zone de fragilisation 11 dans le substrat donneur 1. Ladite zone de fragilisation 11 définit une couche mince 12 à transférer.

En référence à la figure 1B, on colle le substrat donneur 1 ainsi implanté sur un substrat support 2 par l'intermédiaire de la couche électriquement isolante 10 qui remplit alors la fonction de couche de collage. Le substrat support 2 peut avantageusement être un substrat semi-conducteur, par exemple de silicium, à haute résistivité électrique. Le collage peut être renforcé par un traitement thermique.

En référence à la figure 1C, on détache le substrat donneur 1 le long de la zone de fragilisation 11, ce qui conduit au transfert de la couche mince 12 sur le substrat support 2. L'initiation du détachement peut être réalisée au moyen d'un traitement thermique.

On met ensuite en œuvre un traitement de finition de la couche transférée, de sorte à guérir les défauts liés à l'implantation et à lisser la surface libre de ladite couche.

On obtient ainsi un substrat semi-conducteur sur isolant.

Dans le cas d'un substrat FDSOI, l'épaisseur cible pour la couche semi-conductrice transférée est comprise entre 4 nm et 100 nm, avec une variation maximale de $\pm 5 \text{ \AA}$ par rapport à la valeur cible, au sein de chaque substrat et entre les différents substrats fabriqués par le procédé. Une telle uniformité et une très faible rugosité de la couche transférée peuvent être obtenues par un procédé de finition dit « batch anneal », qui est un procédé de lissage long, à haute température, avantageusement réalisé dans un four permettant de traiter une pluralité de substrats en même temps. Un tel « batch anneal » est typiquement mis en œuvre à une température comprise entre 1150 et 1200°C, pendant une durée de plusieurs minutes, généralement supérieure à 15 minutes. Ce lissage permet d'amener la couche semi-conductrice transférée à un niveau de rugosité de surface compatible avec la fabrication ultérieure de transistors.

Cependant, ce procédé est pénalisant pour les applications radiofréquences, notamment pour les applications à extrêmement haute fréquence, c'est-à-dire dans une bande de fréquences comprise entre 30 et 300 GHz. Cette bande de fréquences est également appelée « mmWave ».

En effet, le substrat support est à haute résistivité électrique et de ce fait faiblement dopé. Ainsi, le substrat support est généralement sensiblement moins dopé (par exemple dopé au bore) que le substrat donneur, autrement dit, moins dopé que la couche mince transférée.

Or, en raison de cette différence de niveau de dopage entre la couche mince transférée et le substrat support, sous l'effet du budget thermique important du traitement de finition du substrat FDSOI et, dans une moindre mesure, sous l'effet du budget thermique du collage et/ou du détachement, les atomes de bore diffusent au travers de la couche
5 électriquement isolante dans le substrat support, conduisant à une réduction de la résistivité électrique dans une portion superficielle s'étendant à partir de la couche électriquement isolante.

Or, même si cette portion superficielle ne s'étend que sur quelques micromètres de profondeur dans le substrat support, la baisse de résistivité électrique dans cette zone
10 engendre des pertes électriques importantes pour des ondes de type mmWave.

EXPOSE DE L'INVENTION

Un but de l'invention est de définir un procédé de fabrication d'un substrat semi-conducteur sur isolant de type FDSOI adapté à des applications radiofréquences, permettant de maintenir une haute résistivité du substrat support même au voisinage de la
15 couche électriquement isolante.

A cet effet, l'invention propose un procédé de fabrication d'un substrat de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquences, comprenant les étapes suivantes :

- 20 - fourniture d'un substrat donneur semi-conducteur dopé de type P,
 - formation d'une couche sacrificielle sur le substrat donneur,
 - implantation d'espèces atomiques au travers de ladite couche sacrificielle, de sorte à former dans le substrat donneur une zone de fragilisation délimitant une couche mince semi-conductrice à transférer,
- 25
 - retrait de la couche sacrificielle du substrat donneur après ladite implantation,
 - fourniture d'un substrat support semi-conducteur présentant une résistivité électrique supérieure ou égale à 500 $\Omega \cdot \text{cm}$,
 - formation d'une couche électriquement isolante sur le substrat support,
 - collage du substrat donneur sur le substrat support, la couche mince semi-
- 30 conductrice et la couche électriquement isolante étant à l'interface de collage,
 - détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation de sorte à transférer la couche mince semi-conductrice du substrat donneur sur le substrat support.

Ainsi, en utilisant une couche de collage formée sur le substrat support et non sur le substrat donneur, et en retirant la couche sacrificielle du substrat donneur avant le collage, on évite que des atomes de dopants contenus dans la couche de collage ne
35 diffusent dans le substrat support malgré la différence de niveau de dopage entre la couche mince transférée et le substrat support et ne provoquent une diminution de la résistivité électrique du substrat support.

Par ailleurs, les étapes de fabrication des substrats FDSOI postérieures au collage restent inchangées, de sorte que ce procédé est compatible avec les lignes de fabrication industrielles existantes.

Dans certains modes de réalisation, la formation de la couche sacrificielle comprend
5 une oxydation du matériau du substrat donneur.

Dans certains modes de réalisation, le retrait de la couche sacrificielle comprend une gravure humide de ladite couche.

De manière optionnelle, le retrait de la couche sacrificielle peut comprendre en outre un retrait d'une portion superficielle de la couche mince à transférer du substrat donneur.

10 Dans certains modes de réalisation, le substrat donneur présente un dopage au bore.

Dans certains modes de réalisation, la formation de la couche électriquement isolante comprend un dépôt d'un oxyde sur le substrat support.

Dans d'autres modes de réalisation, la formation de la couche électriquement
15 isolante est réalisée par une oxydation du substrat support.

Dans certains modes de réalisation, la couche électriquement isolante présente une épaisseur comprise entre 10 et 150 nm.

Dans certains modes de réalisation, la couche semi-conductrice transférée présente une épaisseur comprise entre 4 et 100 nm.

20

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

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

- la figure 1A est une vue schématique en coupe de l'implantation d'espèces
25 atomiques au travers d'une couche électriquement isolante agencée sur un substrat donneur ;

- la figure 1B est une vue schématique en coupe du collage du substrat donneur ayant subi l'implantation de la figure 1A sur un substrat support ;

- la figure 1C est une vue schématique en coupe du transfert d'une couche mince
30 du substrat donneur sur le substrat support de la figure 1B ;

- la figure 2 est une vue schématique en coupe de la formation d'une couche sacrificielle sur un substrat donneur ;

- la figure 3 est une vue schématique en coupe de l'implantation d'espèces atomiques dans le substrat donneur de la figure 2 au travers de la couche sacrificielle ;

35 - la figure 4 est une vue schématique en coupe du retrait de la couche sacrificielle du substrat donneur après l'implantation de la figure 3 ;

- la figure 5 est une vue schématique en coupe de la formation d'une couche électriquement isolante sur un substrat support ;

- la figure 6 est une vue schématique en coupe du collage du substrat donneur de la figure 4 et du substrat support de la figure 5 ;

- la figure 7 est une vue schématique en coupe du transfert d'une couche mince du substrat donneur sur le substrat support pour former un substrat FDSOI.

5 Pour des raisons de lisibilité des figures, les différentes couches n'ont pas nécessairement été représentées à l'échelle.

Les signes de référence identiques d'une figure à l'autre désignent des éléments similaires ou tout au moins remplissant la même fonction.

10 DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION

Le procédé de fabrication d'un substrat FDSOI est modifié pour réaliser le collage du substrat donneur sur le substrat support par l'intermédiaire d'une couche électriquement isolante formée sur le substrat support et non sur le substrat donneur. Contrairement au substrat donneur, le substrat support n'est pas dopé ou tout au moins présente une
15 concentration en dopants de type P inférieure ou égale à 10^{13} at/cm³. Ainsi, la couche électriquement isolante ne contient pas une concentration significative en dopants susceptibles de diffuser dans le substrat support lors de traitements thermiques ultérieurs.

Une couche électriquement isolante reste utile à la surface du substrat donneur pour réduire l'impact des trajectoires directes des espèces atomiques lors de l'implantation
20 (phénomène connu sous le terme anglo-saxon de « channeling »). Cependant, cette couche est sacrificielle dans la mesure où elle est retirée après l'implantation, avant le collage.

La figure 2 illustre la formation d'une telle couche sacrificielle 13 sur le substrat donneur 1.

25 Le substrat donneur est un substrat semi-conducteur monocristallin, par exemple de silicium. Généralement, le substrat donneur est légèrement dopé P. Par exemple, le substrat donneur contient des atomes de bore avec une concentration inférieure ou égale à 10^{15} at/cm³. Un substrat donneur ainsi dopé est en effet moins onéreux, plus standard qu'un substrat donneur non dopé.

30 La couche sacrificielle 13 est une couche électriquement conductrice, notamment d'un oxyde du matériau du substrat donneur 1. La couche sacrificielle 13 est avantageusement formée par oxydation thermique du substrat donneur 1. Une telle oxydation thermique consomme une portion superficielle du matériau du substrat donneur. Pour éviter le phénomène de « channeling », la couche sacrificielle présente
35 avantageusement une épaisseur comprise entre 4 et 150 nm et préférentiellement entre 10 et 40 nm.

En référence à la figure 3, on met en œuvre une implantation d'espèces ioniques (schématisée par les flèches) dans le substrat donneur 1 au travers de la couche sacrificielle.

Les espèces implantées comprennent habituellement de l'hydrogène et/ou de l'hélium.

La dose et l'énergie des espèces implantées est choisie pour former une zone de fragilisation 11 dans le substrat donneur 1, à une profondeur déterminée pour délimiter, entre la couche sacrificielle 13 et la zone de fragilisation 11, une couche mince 12 à transférer.

En référence à la figure 3, on retire ensuite la couche sacrificielle 13. Ainsi, même si la couche sacrificielle contient des dopants provenant du substrat donneur, elle n'est pas présente lors du collage ultérieur.

Le retrait de la couche sacrificielle peut être effectué par exemple par gravure humide. L'homme du métier est en mesure de choisir la solution de gravure adaptée. Cette gravure laisse la surface du substrat donneur suffisamment peu rugueuse et exempte de défauts pour permettre un collage ultérieur de bonne qualité.

Le retrait de la couche sacrificielle peut éventuellement être suivi du retrait d'une portion superficielle de la couche mince 12 à transférer. Le retrait de cette portion superficielle, dont l'épaisseur est typiquement de l'ordre de quelques nanomètres, peut être effectué par tout moyen adapté, par exemple par oxydation thermique ou par gravure chimique, qui permet de ne pas dégrader l'uniformité de la couche transférée. De manière moins préférée, un polissage mécano-chimique pourrait être utilisé.

En référence à la figure 4, on forme par ailleurs une couche électriquement isolante 20 sur le substrat support 2.

Le substrat support 2 est un substrat semi-conducteur, par exemple de silicium, présentant une résistivité électrique élevée, par exemple supérieure à 500 $\Omega\cdot\text{cm}$, de préférence supérieure ou égale à 1000 $\Omega\cdot\text{cm}$.

De manière particulièrement avantageuse, le substrat support est un substrat de silicium présentant une teneur élevée en oxygène interstitiel, c'est-à-dire une teneur supérieure à 20 old ppma (pour la définition de l'unité old ppma, on pourra se référer au mémoire de Robert Kurt Graupner, « A Study of Oxygen Precipitation in Heavily Doped Silicon » (1989), Dissertations and Theses, Paper 1218). Un tel substrat est généralement désigné par l'abréviation « HiOi ». Les atomes d'oxygène interstitiels sont susceptibles de précipiter sous l'effet d'un traitement thermique de sorte à former une grande quantité de défauts, appelés « Bulk Micro Defects » (BMD), constitués par les précipités d'oxygène, qui bloquent les dislocations générées lors de traitements thermiques à haute température, ce qui est avantageux pour préserver la qualité cristalline du substrat support.

En pratique, pour utiliser un tel substrat HiOi pour fabriquer un substrat FDSOI, le procédé comprend, préalablement au collage, une étape de traitement thermique du substrat support à une température suffisante pour faire précipiter l'oxygène interstitiel et former lesdits BMD. Un tel traitement thermique peut typiquement par un cycle thermique

5 atteignant une température de l'ordre de 1000°C durant 12 heures.

Par ailleurs, un substrat HiOi comprend généralement une grande quantité de défauts cristallins appelés COPs (acronyme du terme anglo-saxon « crystal originated particles »), qui sont indésirables dans un substrat FDSOI. De manière avantageuse, le procédé de fabrication comprend donc un traitement thermique de type « déplétion », visant

10 à faire diffuser l'oxygène hors du substrat support. En pratique, ce traitement peut être réalisé simultanément au traitement thermique de précipitation de l'oxygène interstitiel, pour autant que la surface du substrat support soit libre, c'est-à-dire non oxydée, pour permettre la diffusion de l'oxygène hors du substrat. Dans ce cas, ce traitement thermique de précipitation / diffusion doit être réalisé préalablement à la formation de la couche

15 électriquement isolante sur le substrat support.

De manière alternative, l'homme du métier pourra choisir pour le substrat support un substrat de silicium présentant une teneur faible ou moyenne en oxygène interstitiel, c'est-à-dire une teneur inférieure à 10, respectivement comprise entre 10 et 20 old ppma. Un tel substrat est généralement désigné par l'abréviation « LowOi », respectivement

20 « MidOi ». Dans ce cas, les traitements thermiques de précipitation et/ou diffusion susmentionnés ne sont pas nécessaires.

La couche électriquement isolante 20 est avantageusement une couche d'oxyde, afin d'assurer un collage de bonne qualité avec le matériau semi-conducteur du substrat donneur 1.

25 La couche électriquement isolante peut être formée par un procédé de dépôt, notamment un dépôt chimique en phase vapeur (CVD, acronyme du terme anglo-saxon « Chemical Vapor Deposition ») ou par traitement thermique d'oxydation du substrat support.

De préférence, l'épaisseur de la couche électriquement isolante 20 est comprise

30 entre 10 et 150 nm.

En référence à la figure 5, on met en contact le substrat donneur 1 et le substrat receveur 2, la couche mince 12 à transférer et la couche électriquement isolante 20 étant à l'interface de collage. Il se produit alors un collage par adhésion moléculaire entre l'oxyde de la couche 20 et le matériau semi-conducteur de la couche 12.

35 Le collage peut éventuellement être renforcé par un procédé de préparation de la surface électriquement isolante, par exemple par un plasma d'oxygène.

Comme indiqué plus haut, les étapes de fabrication postérieures au collage restent inchangées par rapport au procédé de fabrication de substrats FDSOI existant, le procédé

étant ainsi compatible avec les lignes de fabrication industrielles existantes et n'affectant pas les propriétés physiques et électriques du produit.

En référence à la figure 6, on détache le substrat donneur 1 le long de la zone de fragilisation 11. De manière connue en elle-même, ledit détachement peut être provoqué
5 par l'application d'une contrainte mécanique au voisinage de la zone de fragilisation, par un traitement thermique ou par tout autre moyen adapté.

A l'issue de ce détachement, la couche mince 12 a été transférée du substrat donneur sur le substrat support et l'on obtient une structure FDSOI comprenant le substrat support 2, la couche de collage électriquement isolante 2 et la couche transférée 12 (cf.
10 figure 7).

Ladite structure est ensuite soumise à un traitement de finition classiquement mis en œuvre pour les substrats FDSOI. Ce traitement de finition inclut notamment thermique de lissage de la couche transférée (« batch anneal ») tel que mentionné en introduction.

Dans certains modes de réalisation, ce procédé de lissage consiste à placer un lot
15 de structures FDSOI dans un four, à effectuer une montée lente en température de la température ambiante (20°C) jusqu'à une température de l'ordre de 1500 à 1200°C, puis à maintenir les structures à cette température pendant une durée de plusieurs minutes, de préférence supérieure à 15 minutes.

Le retrait de la couche sacrificielle du substrat donneur avant le collage permet de
20 manière surprenante d'atténuer la diffusion des dopants dans le substrat support et la détérioration du caractère hautement résistif de la structure finale.

Sans vouloir être liés par cette hypothèse, les inventeurs estiment que la formation de la couche d'oxyde de protection sur le substrat donneur pourrait être à l'origine d'un phénomène d'accumulation des dopants à l'interface entre le substrat donneur et ladite
25 couche d'oxyde, qui diffuseraient après le collage du substrat donneur sur le substrat support. Le retrait de cette couche qui est rendue sacrificielle (et éventuellement la portion superficielle de la couche mince à transférer sous-jacente) semble ainsi supprimer ou tout au moins diminuer cette accumulation de dopants.

Bien que le budget thermique de ce procédé de lissage soit suffisamment élevé pour
30 permettre une diffusion des dopants présents dans la structure, les dopants du substrat donneur sont suffisamment éloignés du substrat support par la couche électriquement isolante (qui ne contient pas de tels dopants) pour ne pas diffuser dans le substrat support. Par conséquent, la résistivité électrique du substrat support n'est pas affectée, même dans sa portion voisine de l'interface de collage.

35 La structure FDSOI ainsi formée est donc pleinement fonctionnelle pour des applications radiofréquence, notamment dans la bande mmWave.

REVENDICATIONS

1. Procédé de fabrication d'un substrat de type semi-conducteur sur isolant pour applications radiofréquences, comprenant les étapes suivantes :
 - 5 - fourniture d'un substrat donneur (1) semi-conducteur dopé de type P,
 - formation d'une couche sacrificielle (13) sur le substrat donneur,
 - implantation d'espèces atomiques au travers de ladite couche sacrificielle (13), de sorte à former dans le substrat donneur (1) une zone de fragilisation (11) délimitant une couche mince (12) semi-conductrice à transférer,
 - 10 - retrait de la couche sacrificielle (13) du substrat donneur (1) après ladite implantation,
 - fourniture d'un substrat support (2) semi-conducteur présentant une résistivité électrique supérieure ou égale à 500 Ω .cm,
 - formation d'une couche (20) électriquement isolante sur le substrat support (2),
 - 15 - collage du substrat donneur (1) sur le substrat support (2), la couche mince (12) semi-conductrice et la couche (20) électriquement isolante étant à l'interface de collage,
 - détachement du substrat donneur (1) le long de la zone de fragilisation (11) de sorte à transférer la couche mince (12) semi-conductrice du substrat donneur (1) sur le substrat support (2).
 - 20
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la formation de la couche sacrificielle (13) comprend une oxydation du matériau du substrat donneur (1).
3. Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel le retrait de la
25 couche sacrificielle (13) comprend une gravure humide de ladite couche (13).
4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel le retrait de la couche sacrificielle (13) comprend en outre un retrait d'une portion superficielle de la couche mince (12) à transférer du substrat donneur.
30
5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel le substrat donneur (1) présente un dopage au bore.
6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel la formation de la
35 couche (20) électriquement isolante comprend un dépôt d'un oxyde sur le substrat support (2).

7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel la formation de la couche (20) électriquement isolante comprend une oxydation du substrat support (2).
8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel la couche
5 électriquement isolante (20) présente une épaisseur comprise entre 10 et 150 nm.
9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, dans lequel la couche (12) semi-conductrice transférée présente une épaisseur comprise entre 4 et 100 nm.