

Procédé de fabrication d'un substrat pour la croissance épitaxiale d'une couche d'un alliage III-N à base de gallium

Domaine technique

- 5 La présente invention concerne un procédé de fabrication d'un substrat pour la croissance épitaxiale d'une couche d'un alliage III-N à base de gallium (c'est-à-dire une couche de nitrure de gallium (GaN), de nitrure d'aluminium et de gallium (AlGaN) ou une couche de nitrure de gallium et d'indium (InGaN)), ainsi qu'un procédé de fabrication d'une telle couche d'alliage III-N et un procédé de fabrication d'un transistor à haute
- 10 mobilité d'électrons (HEMT) dans une telle couche d'alliage III-N.

Etat de la technique

- Les matériaux semi-conducteurs III-N, en particulier le nitrure de gallium (GaN), le nitrure d'aluminium et de gallium (AlGaN) ou le nitrure de gallium et d'indium (InGaN),
- 15 apparaissent particulièrement prometteurs notamment pour la formation de diodes électroluminescentes (LEDs) de forte puissance et de dispositifs électroniques fonctionnant à haute fréquence, tels que des transistors à haute mobilité d'électrons (HEMTs) ou d'autres transistors à effet de champ (FETs).

- Dans la mesure où ces alliages III-N sont difficiles à trouver sous la forme de substrats massifs de grande dimension, il sont généralement formés par hétéoépitaxie, c'est-à-
- 20 dire par épitaxie sur un substrat constitué d'un matériau différent.

- Le choix d'un tel substrat prend en compte en particulier la différence de paramètre de maille et la différence de coefficient de dilatation thermique entre le matériau du substrat et l'alliage III-N. En effet, plus ces différences sont importantes, plus les risques de
- 25 formation dans le nitrure de gallium de défauts cristallins, tels que des dislocations, et la génération de contraintes mécaniques importantes, susceptibles de provoquer des déformations excessives, sont grands.

- Les matériaux les plus fréquemment considérés pour l'hétéroépitaxie d'alliages III-N sont le saphir et le carbure de silicium (SiC).

- 30 Outre sa plus faible différence de paramètre de maille avec le nitrure de gallium, le carbure de silicium est particulièrement préféré pour les applications électroniques de forte puissance en raison de sa conductivité thermique qui est nettement supérieure à celle du saphir et qui permet par conséquent de dissiper plus facilement l'énergie thermique générée lors du fonctionnement des composants.

- 35 Pour les applications radiofréquences (RF), on cherche à utiliser du carbure de silicium semi-isolant, c'est-à-dire présentant typiquement une résistivité électrique supérieure ou égale à $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, afin de minimiser les pertes parasites (généralement appelées pertes

RF) dans le substrat. Cependant, ce matériau est particulièrement onéreux et ne se trouve actuellement que sous la forme de substrats de dimension limitée.

Le silicium permettrait de réduire drastiquement les coûts de fabrication et d'accéder à des substrats de grande dimension, mais les structures de type alliage III-N sur silicium sont pénalisées par des pertes RF et par une faible dissipation thermique.

Des structures composites, telles que des structures SopSiC ou SiCopSiC, ont également été investiguées [1] mais ne se révèlent pas totalement satisfaisantes. Ces structures comprennent respectivement une couche de silicium monocristallin ou une couche de SiC monocristallin (destinée à former une couche germe pour la croissance épitaxiale du nitrure de gallium) sur un substrat de SiC polycristallin. Bien que le SiC polycristallin soit un matériau peu onéreux, disponible sous la forme de substrats de grande dimension et procurant une bonne dissipation thermique, ces structures composites sont pénalisées par la présence d'une couche d'oxyde de silicium à l'interface entre la couche de silicium ou de SiC monocristallin et le substrat de SiC polycristallin, qui forme une barrière thermique entravant la dissipation de chaleur de la couche d'alliage III-N vers le substrat de SiC polycristallin.

Brève description de l'invention

Un but de l'invention est donc de remédier aux inconvénients précités et notamment aux limitations liées à la taille et au coût des substrats de SiC semi-isolant.

L'invention a donc pour but de concevoir un procédé de fabrication d'un substrat pour la croissance épitaxiale d'un alliage III-N à base de gallium, notamment en vue de la formation de transistors HEMT ou d'autres dispositifs électroniques à haute fréquence et forte puissance dans lesquels les pertes RF sont minimisées et la dissipation thermique est maximisée.

A cet effet, l'invention propose un procédé de fabrication d'un substrat pour la croissance épitaxiale d'une couche de nitrure de gallium (GaN), de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGaN) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGaN), comprenant les étapes successives suivantes :

- fourniture d'un substrat de base comprenant au moins une couche de carbure de silicium monocristallin,
- croissance épitaxiale d'une couche de SiC semi-isolant sur la couche de SiC monocristallin pour former un substrat donneur,
- implantation d'espèces ioniques dans la couche de SiC semi-isolant de sorte à former une zone de fragilisation délimitant une couche mince de SiC semi-isolant monocristallin à transférer,
- collage de la couche de SiC semi-isolant sur un substrat receveur présentant une haute résistivité électrique,

- détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation de sorte à transférer la couche mince de SiC semi-isolant monocristallin sur le substrat receveur.

Par « haute fréquence », on entend dans le présent texte une fréquence supérieure à 3 kHz.

- 5 Par « forte puissance », on entend dans le présent texte une densité de puissance supérieure à 0,5 W/mm injectée au niveau de la grille du transistor.

Par « haute résistivité électrique », on entend dans le présent texte une résistivité électrique supérieure ou égale à 100 Ω .cm.

- 10 Par « SiC semi-isolant », on entend dans le présent texte du carbure de silicium présentant une résistivité électrique supérieure ou égale à $10^5 \Omega$.cm.

Ce procédé permet de former un substrat à base d'un matériau à haute résistivité électrique et haute conductivité thermique, comprenant une couche de SiC semi-isolant présentant une qualité cristalline adaptée à la croissance épitaxiale ultérieure d'une couche de nitrure de gallium et faisant bénéficier la structure finale de ses bonnes propriétés de dissipation thermique et de limitation des pertes RF. La couche de SiC semi-isolant étant en contact direct avec le substrat à haute résistivité électrique et haute conductivité thermique, la structure ne contient en outre aucune barrière thermique.

- 15 Un procédé qui consisterait à former la couche de SiC semi-isolant par épitaxie directement sur un substrat à haute résistivité électrique conduirait à former un grand nombre de dislocations dans le SiC semi-isolant en raison de la qualité cristalline insuffisante du substrat à haute résistivité électrique ou de différence de paramètre de maille entre le matériau dudit substrat et le carbure de silicium. Au contraire, le procédé selon l'invention permet d'utiliser comme germe pour la croissance du SiC semi-isolant une couche de SiC monocristallin de qualité optimale car obtenue par transfert du substrat donneur.

Selon des caractéristiques avantageuses mais optionnelles de l'invention, qui peuvent être considérées seules ou en combinaison lorsque cela est techniquement possible :

- le substrat receveur présente une différence de coefficient de dilatation thermique avec le carbure de silicium inférieure ou égale à $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- 30 - lequel le substrat receveur est choisi parmi un substrat de silicium à haute résistivité électrique, un substrat de SiC polycristallin à haute résistivité électrique, un substrat d'AlN polycristallin, et un substrat de diamant ;
- la couche épitaxiale de SiC semi-isolant présente une épaisseur supérieure ou égale à 3 μm , de préférence supérieure ou égale à 5 μm , et de manière encore préférée
- 35 supérieure ou égale à 10 μm ;
- l'épaisseur de la couche mince transférée sur le substrat receveur présente une épaisseur inférieure à 1 μm ;

- la couche de SiC semi-isolant est formée par dopage au vanadium pendant la croissance épitaxiale du SiC ;
- le procédé comprend en outre une étape de recyclage de la portion du substrat donneur détachée de la couche transférée, en vue de former un nouveau substrat donneur ;
- 5 - ledit recyclage comprend un polissage d'une portion résiduelle de la couche de SiC semi-isolant, le nouveau substrat donneur ainsi obtenu étant apte à être utilisé dans une nouvelle étape d'implantation d'espèces ioniques ;
- ledit recyclage comprend un polissage d'une portion résiduelle de la couche de SiC semi-isolant et une reprise d'épitaxie pour augmenter l'épaisseur de ladite couche de
- 10 SiC semi-isolant pour former le nouveau substrat donneur ;
- ledit recyclage comprend un retrait d'une portion résiduelle de la couche de SiC semi-isolant pour exposer la face carbone de la couche de SiC monocristallin la et croissance épitaxiale d'une nouvelle couche de SiC semi-isolant sur la face carbone de la couche de SiC monocristallin pour former le nouveau substrat donneur ;
- 15 - la couche de carbure de silicium monocristallin du substrat de base présente une face carbone libre, la croissance épitaxiale de la couche de SiC semi-isolant est réalisée sur ladite face carbone de la couche de SiC monocristallin, l'implantation d'espèces ioniques est réalisée au travers de la face carbone de la couche de SiC semi-isolant, la face carbone de la couche de SiC semi-isolant est collée sur le substrat receveur, à l'issue
- 20 du détachement, la face silicium de la couche de SiC semi-isolant monocristallin transférée est exposée ;
- le procédé comprend la fabrication du substrat de base par les étapes successives suivantes : fourniture d'un substrat de départ de SiC monocristallin présentant une face silicium ; implantation d'espèces ioniques au travers de la face silicium (50-Si) du
- 25 substrat de départ de sorte à former une zone de fragilisation délimitant une couche mince de SiC monocristallin à transférer ; collage de la face silicium du substrat de départ sur un support intermédiaire ; détachement du substrat de départ le long de la zone de fragilisation de sorte à transférer la couche mince de SiC monocristallin sur le support intermédiaire et exposer la face carbone de ladite couche de SiC monocristallin
- 30 transférée, le support intermédiaire et la couche de SiC monocristallin transférée formant ensemble le substrat de base ;
- le support intermédiaire est un substrat de SiC présentant une qualité cristalline inférieure à celle du substrat de départ ;
- le substrat de départ est collé directement sur le support intermédiaire après activation
- 35 de chaque surface à coller par bombardement d'espèces neutres ;
- le substrat de départ est collé sur le support intermédiaire par l'intermédiaire d'une couche de collage réfractaire ;

- le procédé comprend une étape de recyclage de la portion du substrat de départ détachée de la couche transférée, en vue de former un nouveau substrat de départ.

Un autre objet de l'invention concerne un procédé de fabrication d'une couche d'un alliage III-N à base de gallium sur un substrat obtenu par le procédé qui vient d'être décrit.

Ledit procédé comprend :

- la fourniture d'un substrat fabriqué par le procédé décrit précédemment,
- la croissance épitaxiale de la couche de nitrure de gallium, de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGa_N) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGa_N) sur la couche de SiC semi-isolant dudit substrat.

La couche de nitrure de gallium, de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGa_N) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGa_N) présente typiquement une épaisseur comprise entre 1 et 2 µm.

Un autre objet de l'invention concerne un procédé de fabrication d'un transistor à haute mobilité d'électrons (HEMT) dans une telle couche d'alliage III-N à base de gallium.

Ledit procédé comprend :

- la fabrication par épitaxie d'une couche de nitrure de gallium, de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGa_N) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGa_N) par le procédé susmentionné,
- la formation d'une hétérojonction par épitaxie d'une couche d'un matériau III-N différent du nitrure de gallium sur la couche de nitrure de gallium, de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGa_N) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGa_N),
- la formation d'un canal du transistor au niveau de ladite hétérojonction,
- la formation d'une source, d'un drain et d'une grille du transistor sur le canal.

Brève description des dessins

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

La figure 1A est une vue schématique en coupe d'un substrat de base de SiC monocristallin ;

La figure 1B est une vue schématique en coupe d'un substrat donneur formé par croissance épitaxiale d'une couche de SiC semi-isolant monocristallin sur la face C du substrat de base de la figure 1A ;

La figure 1C est une vue schématique en coupe du substrat donneur après un détournement destiné à supprimer une excroissance de SiC formée sur les bords dudit substrat lors de l'épitaxie ;

- La figure 1D est une vue schématique en coupe du substrat donneur de la figure 1C lors de la formation d'une zone de fragilisation par implantation d'espèces ioniques dans la couche de SiC semi-isolant pour délimiter une couche mince à transférer ;
- La figure 1E est une vue schématique en coupe de l'assemblage d'un substrat receveur et du substrat donneur de la figure 1D ;
- La Figure 1F est une vue schématique en coupe du détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation pour transférer la couche mince de SiC semi-isolant monocristallin sur le substrat receveur ;
- La figure 1G est une vue schématique en coupe de la couche mince de SiC semi-isolant monocristallin transférée sur le substrat receveur après polissage de sa surface libre (face silicium) ;
- La figure 1H est une vue schématique en coupe de la formation par épitaxie d'une couche de GaN sur la face silicium de la couche de SiC semi-isolant monocristallin de la figure 1G ;
- La figure 1I est une vue schématique en coupe de la formation par épitaxie d'une hétérojonction sur la couche de GaN de la figure 1H ;
- La fFigure 2A est une vue schématique en coupe d'un premier substrat donneur de SiC monocristallin ;
- La figure 2B est une vue schématique en coupe du substrat donneur de la figure 2A lors de la formation d'une zone de fragilisation par implantation d'espèces ioniques au travers de la face Si dudit premier substrat donneur pour former une couche mince de SiC monocristallin à transférer ;
- La figure 2C est une vue schématique en coupe de l'assemblage d'un premier substrat receveur et du premier substrat donneur de la figure 2B ;
- La figure 2D est une vue schématique en coupe du détachement du premier substrat donneur le long de la zone de fragilisation pour transférer la couche mince de monocristallin sur le premier substrat receveur ;
- La figure 2E est une vue schématique en coupe de la couche mince de SiC monocristallin transférée sur le premier substrat receveur après polissage de sa surface libre (face carbone) ;
- La figure 2F est une vue schématique en coupe d'un second substrat donneur formé par croissance épitaxiale d'une couche de SiC semi-isolant monocristallin sur la face carbone de la couche de SiC monocristallin du substrat de la figure 2E ;
- La figure 2G est une vue schématique en coupe du second substrat donneur après un détourage destiné à supprimer une excroissance de SiC formée sur les bords dudit substrat donneur lors de l'épitaxie ;

- La figure 2H est une vue schématique en coupe du second substrat donneur de la figure 2G lors de la formation d'une zone de fragilisation par implantation d'espèces ioniques dans la couche de SiC semi-isolant pour délimiter une couche mince à transférer ;
- La figure 2I est une vue schématique en coupe de l'assemblage d'un second substrat
- 5 receveur et du second substrat donneur de la figure 2H ;
- La figure 2J est une vue schématique en coupe du détachement du second substrat donneur le long de la zone de fragilisation pour transférer la couche mince de SiC semi-isolant monocristallin sur le second substrat receveur ;
- La figure 2K est une vue schématique en coupe de la couche mince de SiC semi-isolant
- 10 monocristallin transférée sur le second substrat receveur après polissage de sa surface libre (face silicium) ;
- La figure 2L est une vue schématique en coupe de la formation par épitaxie d'une couche de GaN sur la face silicium de la couche de SiC semi-isolant monocristallin de la figure 2K ;
- 15 La figure 2M est une vue schématique en coupe de la formation par épitaxie d'une hétérojonction sur la couche de GaN de la figure 2L.
- Pour des raisons de lisibilité des figures, les différentes couches n'ont pas nécessairement été réalisées à l'échelle.

20 Description détaillée de modes de réalisation

- L'invention propose un procédé de fabrication de substrats pour la croissance épitaxiale d'alliages III-N binaires ou ternaires à base de gallium. Lesdits alliages comprennent le nitrure de gallium (GaN), le nitrure de gallium et d'aluminium ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, où $0 < x < 1$, désigné par la suite de manière abrégée par AlGaN) et le nitrure de gallium et d'indium
- 25 ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, où $0 < x < 1$, désigné par la suite de manière abrégée par InGaN). Dans un souci de concision, on décrira dans la suite du texte la fabrication d'un substrat pour la croissance épitaxiale d'une couche de GaN mais l'homme du métier est à même d'adapter les conditions de croissance pour former une couche d'AlGaN ou d'InGaN, le substrat servant à cette croissance épitaxiale étant le même.
- 30 Le procédé utilise un substrat de base de carbure de silicium (SiC) monocristallin qui sert de germe à la croissance d'une couche de SiC semi-isolant, pour former un substrat donneur. Une couche mince de SiC semi-isolant dudit substrat donneur est ensuite transférée par le procédé Smart Cut™ sur un substrat receveur, présentant une haute résistivité électrique.
- 35 A cet effet, on choisit un substrat de base en SiC monocristallin présentant une excellente qualité cristalline, c'est-à-dire notamment exempt de dislocations.
- Dans certains modes de réalisation, le substrat de base peut être un substrat massif de SiC monocristallin. Dans d'autres formes de réalisation, le substrat de base peut être un

substrat composite, comprenant une couche superficielle de SiC monocristallin et au moins une autre couche d'un autre matériau. Dans ce cas, la couche de SiC monocristallin présente une épaisseur supérieure ou égale à 0,5 μm .

Il existe différentes formes cristallines (également appelées polytypes) du carbure de silicium. Les plus répandues sont les formes 4H, 6H et 3C. De manière préférée, le carbure de silicium monocristallin est choisi parmi les polytypes 4H et 6H, mais tous les polytypes sont envisageables pour mettre en œuvre la présente invention.

Sur les figures, on a représenté un substrat de base 10 massif en SiC monocristallin.

De manière connue en elle-même, comme illustré sur la figure 1, un tel substrat présente une face silicium 10-Si et une face carbone 10-C.

A l'heure actuelle, les procédés d'épitaxie de GaN sont principalement mis en œuvre sur la face silicium du SiC. Cependant, il n'est pas exclu de parvenir à faire croître du GaN sur la face carbone du SiC. L'orientation du substrat de base (face silicium / face carbone) et donc du substrat donneur pendant la mise en œuvre du procédé est choisie en fonction de la face du SiC destinée à la croissance de la couche de GaN.

En référence à la figure 1B, on met en œuvre une croissance épitaxiale d'une couche 11 de SiC semi-isolant sur le substrat de base 10. Le polytype du SiC semi-isolant est avantageusement identique à celui du SiC du substrat donneur.

De manière avantageuse, la croissance de la couche 11 est effectuée sur la face carbone 10-C du substrat 10. C'est donc la face carbone 11-C du SiC semi-isolant qui se trouve à la surface du substrat donneur.

Il existe différentes techniques pour former du SiC semi-isolant. Selon un mode de réalisation, on dope au vanadium la couche de SiC pendant sa croissance épitaxiale. Selon un autre mode de réalisation, on dépose simultanément du silicium, du carbone et du vanadium, en utilisant des précurseurs adaptés dans un bâti d'épitaxie.

La couche de SiC semi-isolant présente avantageusement une épaisseur supérieure à l'épaisseur de la couche à transférer ultérieurement sur le substrat receveur. De préférence, la couche de SiC semi-isolant présente une épaisseur supérieure à plusieurs fois l'épaisseur de la couche à transférer. Ainsi, le substrat donneur pourra être utilisé plusieurs fois pour transférer une couche de SiC semi-isolant, ce qui rend le procédé plus économique. Par exemple, la couche épitaxiale de SiC semi-isolant présente préférentiellement une épaisseur supérieure à 3 μm , de manière encore préférée supérieure ou égale à 5 μm , voire supérieure ou égale à 10 μm .

Le SiC semi-isolant étant un matériau rare, le procédé d'obtention proposé permet de s'affranchir du manque de disponibilité de substrats de SiC semi-isolants sur le marché. En référence à la figure 1C, on met en œuvre un détournage de la couche 11 de SiC semi-isolant et d'une portion sous-jacente du substrat de base 10. Un tel détournage est motivé par le fait que lors de l'épitaxie du SiC semi-isolant, il se forme une surépaisseur

de SiC semi-isolant sur les bords du substrat de base. Or, les équipements présents sur les lignes de fabrication des dispositifs semi-conducteurs sont généralement conçus pour un diamètre de substrat déterminé, également appelé diamètre nominal. Le détournage permet donc de ramener le diamètre de la couche épitaxiale de SiC semi-isolant au diamètre nominal. Cette étape de détournage est réalisée par un équipement de « edge grinding » selon la terminologie anglo-saxonne (c'est-à-dire un équipement de meulage des bords) qui vient retirer le bord de la couche sur quelques centaines de micromètres de largeur et quelques dizaines de micromètres de profondeur.

En référence à la figure 1D, on met en œuvre une implantation d'espèces ioniques dans la couche 11 de SiC semi-isolant du substrat donneur, de sorte à former une zone de fragilisation 13 délimitant une couche mince 12 de SiC semi-isolant monocristallin. Les espèces implantées comprennent typiquement de l'hydrogène et/ou de l'hélium. L'homme du métier est à même de définir l'énergie et la dose d'implantation requises. Dans le mode de réalisation illustré, compte tenu de l'orientation initiale du substrat de base, l'implantation des espèces ioniques est réalisée au travers de la face carbone 11-C du substrat donneur.

De préférence, la couche mince 12 de SiC semi-isolant monocristallin présente une épaisseur inférieure à 1 μm . Une telle épaisseur est en effet accessible à l'échelle industrielle avec le procédé Smart Cut™. En particulier, les dispositifs d'implantation disponibles dans les lignes de fabrications industrielles permettent d'atteindre une telle profondeur d'implantation.

En référence à la figure 1E, on fournit par ailleurs un substrat receveur 20 présentant une haute résistivité électrique.

La fonction principale dudit substrat receveur est de former, avec la couche 12 de SiC semi-isolant transférée sur ledit substrat receveur, un substrat adapté à la croissance épitaxiale de GaN.

L'épitaxie étant mise en œuvre à des températures élevées, le substrat receveur est de préférence choisi pour présenter un coefficient de dilatation thermique sensiblement égal à celui du SiC, afin de ne pas induire de contraintes ou de déformations lors de l'épitaxie du GaN. Ainsi, de manière particulièrement avantageuse, le substrat receveur présente avec le SiC une différence de coefficient de dilatation thermique inférieure ou égale à $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ en valeur absolue.

Par ailleurs, outre sa haute résistivité électrique, le substrat receveur contribue avantageusement à la dissipation de chaleur au sein de la structure finale. On choisit donc avantageusement pour le substrat receveur un matériau présentant une haute conductivité thermique.

Ainsi, les matériaux préférés pour le substrat receveur sont : les céramiques (par exemple mais de manière non limitative le SiC polycristallin (pSiC), le nitrure d'aluminium

polycristallin (pAlN), l'oxyde de béryllium (BeO)), le diamant, ou, dans une moindre mesure, le silicium de résistivité électrique supérieure ou égale à 100 $\Omega\cdot\text{cm}$ (la conductivité thermique de ce dernier étant plus faible que celle des autres matériaux cités).

- 5 La couche 11 de SiC semi-isolant du substrat donneur est collée sur le substrat receveur 20. Il s'agit d'un collage direct, c'est-à-dire sans utiliser une couche de collage – qui serait susceptible de former une barrière thermique - interposée entre lesdits substrats. En référence à la figure 1F, on détache le substrat donneur le long de la zone de fragilisation 13. De manière connue en elle-même, le détachement peut être provoqué
- 10 par un traitement thermique, une action mécanique, ou une combinaison de ces moyens. Le détachement a pour effet de transférer la couche 12 de SiC semi-isolant sur le substrat receveur 20.

- Comme illustré sur la figure 1G, la face libre de la couche 12 de SiC monocristallin transférée est la face silicium 12-Si (la face carbone étant du côté de l'interface avec le
- 15 substrat receveur 20). On met en œuvre un polissage de cette face, par exemple par un polissage mécano-chimique (CMP, acronyme du terme anglo-saxon « Chemical Mechanical Polishing ») pour réduire la rugosité de la couche 12 et supprimer les défauts liés à l'implantation.

- Le reliquat du substrat donneur, qui comprend le substrat de base 10 et la portion 11' de
- 20 la couche 11 de SiC semi-isolant qui n'a pas été transférée sur le substrat receveur 20 (cf. figure 1E), peut avantageusement être recyclé en vue d'une nouvelle utilisation.

Le mode de recyclage peut varier suivant l'épaisseur de la portion résiduelle 11'.

- Dans le cas où cette épaisseur est très faible, notamment inférieure à l'épaisseur d'une nouvelle couche de SiC semi-isolant à transférer (c'est-à-dire typiquement inférieure à 1
- 25 μm), on peut retirer la totalité de cette portion pour ne conserver que le substrat de base 10. Ledit substrat de base 10 peut ainsi être réutilisé dans le procédé décrit à partir de la figure 1A, et peut notamment recevoir une nouvelle couche épitaxiale de SiC semi-isolant comme illustré sur la figure 1B.

- Dans le cas où l'épaisseur de la portion résiduelle 11' de SiC semi-isolant est significative
- 30 (c'est-à-dire typiquement supérieure à 1 μm), ladite portion 11' peut être conservée sur le substrat de base 10, après un polissage de sa surface.

- Si l'épaisseur de ladite portion après polissage est supérieure à l'épaisseur de la couche 12 à transférer sur un nouveau substrat receveur, la structure constituée du substrat de base 10 et de la portion 11' de SiC semi-isolant peut être utilisée comme un nouveau
- 35 substrat donneur dans le procédé décrit plus haut à partir de l'étape décrite à la figure 1D.

Eventuellement, notamment si l'épaisseur de ladite portion 11' de SiC semi-isolant après polissage est inférieure à l'épaisseur de la couche 12 à transférer sur un nouveau

substrat receveur, on peut faire croître par une reprise d'épitanie sur la portion 11' après polissage une nouvelle épaisseur de SiC semi-isolant afin d'obtenir une couche de SiC semi-isolant présentant une épaisseur suffisante pour la mise en œuvre du procédé à partir de l'étape décrite à la figure 1D.

- 5 Revenant au substrat de la figure 1G, ledit substrat est adapté à la croissance d'un alliage III-N à base de gallium sur la couche 12 de SiC semi-isolant transférée.

En référence à la figure 1H, on fait croître, sur la face silicium de la couche 12 de SiC semi-isolant, une couche 30 de GaN (ou, comme mentionné plus haut, d'AlGaN ou d'InGaN). L'épaisseur de la couche 30 est typiquement comprise entre 1 et 2 μm .

- 10 Ensuite, comme illustré sur la figure 1I, on forme une hétérojonction en faisant croître par épitanie, sur la couche 30, une couche 60 d'un alliage III-N différent de celui de la couche 30.

- On peut ainsi poursuivre la fabrication de transistors, notamment de transistors HEMT, à partir de cette hétérojonction, par des procédés connus de l'homme du métier, le canal du transistor étant formé au niveau de l'hétérojonction, et la source, le drain et la grille du transistor étant formés sur le canal.

- 15 Compte tenu de l'orientation initiale du substrat de base 10 (dont la face carbone 10-C a reçu l'implantation et a été collée sur le substrat receveur), c'est la face silicium 12-Si de la couche de SiC semi-isolant qui est exposée sur le substrat final, ce qui est particulièrement favorable à la croissance du GaN, de l'AlGaN ou de l'InGaN.

On va maintenant décrire une variante du procédé décrit plus haut, permettant notamment d'utiliser une orientation plus classique du SiC monocristallin, dans laquelle c'est la face silicium qui reçoit l'implantation et est collée sur le substrat receveur.

- A cet effet, on forme le substrat de base par transfert d'une couche de SiC monocristallin d'un substrat de départ sur un support intermédiaire, puis l'on fait croître par épitanie sur la couche de SiC transférée une couche de SiC semi-isolant pour former le substrat donneur.

- 25 En référence à la figure 2A, on fournit un substrat de départ 50 de SiC monocristallin présentant une excellente qualité cristalline, c'est-à-dire notamment exempt de dislocations.

- Dans certains modes de réalisation, le substrat de départ peut être un substrat massif de SiC monocristallin. Dans d'autres formes de réalisation, le substrat de départ peut être un substrat composite, comprenant une couche superficielle de SiC monocristallin et au moins une autre couche d'un autre matériau. Dans ce cas, la couche de SiC monocristallin présente une épaisseur supérieure ou égale à 0,5 μm .

Il existe différentes formes cristallines (également appelées polytypes) du carbure de silicium. Les plus répandues sont les formes 4H, 6H et 3C. De manière préférée, le

carbure de silicium monocristallin est choisi parmi les polytypes 4H et 6H, mais tous les polytypes sont envisageables pour mettre en œuvre la présente invention.

Sur les figures, on a représenté un substrat de départ 50 massif en SiC monocristallin.

De manière connue en elle-même, comme illustré sur la figure 2A, un tel substrat

5 présente une face silicium 50-Si et une face carbone 50-C.

L'orientation du substrat de départ (face silicium / face carbone) et donc du substrat donneur pendant la mise en œuvre du procédé est choisie en fonction de la face du SiC destinée à la croissance de la couche de GaN.

De manière particulièrement avantageuse, c'est la face silicium 50-Si du substrat de
10 départ 50 qui est choisie pour la mise en œuvre des étapes du procédé. Il s'agit en effet de l'orientation la plus classique dans les procédés industriels impliquant du carbure de silicium monocristallin.

En référence à la figure 2B, on effectue une implantation d'espèces ioniques (schématisée par les flèches) au travers de la face silicium 50-Si du substrat de départ
15 50, de sorte à former une zone de fragilisation 52 délimitant une couche mince 51 de SiC monocristallin à transférer.

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

L'homme du métier est à même de définir l'énergie et la dose d'implantation requises.

De préférence, la couche mince 52 de SiC semi-isolant monocristallin présente une
20 épaisseur inférieure à 1 μm . Une telle épaisseur est en effet accessible à l'échelle industrielle avec le procédé Smart Cut™. En particulier, les dispositifs d'implantation disponibles dans les lignes de fabrications industrielles permettent d'atteindre une telle profondeur d'implantation.

En référence à la figure 2C, on colle la face silicium 50-Si du substrat de départ 50 sur
25 un support intermédiaire 40.

La fonction principale dudit support intermédiaire est de supporter temporairement la couche 52 de SiC monocristallin entre son transfert depuis le substrat de départ et la croissance d'une couche de SiC semi-isolant sur la couche de SiC monocristallin.

A cet effet, le support intermédiaire 40 est choisi pour présenter un coefficient de
30 dilatation thermique sensiblement égal à celui du SiC, afin de ne pas induire de contraintes ou de déformations lors de l'épitaxie du SiC semi-isolant. Ainsi, de manière particulièrement avantageuse, le support intermédiaire et le substrat de départ (ou la couche de SiC monocristallin dans le cas d'un substrat de départ composite) présentent une différence de coefficient de dilatation thermique inférieure ou égale à $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ en
35 valeur absolue.

De préférence, le support intermédiaire est également en SiC de manière à minimiser la différence de coefficient de dilatation thermique. De manière particulièrement avantageuse, le support intermédiaire 40 est un substrat de SiC présentant une qualité

cristalline inférieure à celle du substrat de départ. On entend par là que le support intermédiaire peut être un substrat de SiC polycristallin, ou bien un substrat de SiC monocristallin mais pouvant comprendre des dislocations de tous types (contrairement au SiC monocristallin du substrat de départ qui est choisi d'une excellente qualité cristalline afin d'assurer la qualité de la couche épitaxiale de SiC semi-isolant). Un tel

5 substrat de qualité cristalline inférieure présente l'avantage d'être moins onéreux qu'un substrat de même qualité que le substrat de départ, tout étant parfaitement adapté à la fonction de support temporaire.

Le collage du substrat de départ sur le support intermédiaire est avantageusement

10 direct, c'est-à-dire sans utilisation d'une couche de collage à l'interface entre le substrat de départ et le support intermédiaire. Eventuellement, au moins une des surfaces à mettre en contact peut être nettoyée et/ou activée, par exemple par bombardement d'espèces neutres, afin d'augmenter l'énergie de collage.

De manière alternative, le collage du substrat de départ sur le support intermédiaire peut

15 être assuré par une couche de collage (non représentée) en un matériau réfractaire, adapté pour supporter la température d'épitaxie du SiC semi-isolant sans se dégrader.

En référence à la figure 2D, on détache le substrat de départ 50 le long de la zone de fragilisation 52. De manière connue en elle-même, le détachement peut être provoqué par un traitement thermique, une action mécanique, ou une combinaison de ces moyens.

20 Le détachement a pour effet de transférer la couche 51 de SiC monocristallin sur le support intermédiaire 40.

Comme illustré sur la figure 2E, la face libre de la couche 51 de SiC monocristallin transférée est la face carbone 51-C (la face silicium étant du côté de l'interface avec le support intermédiaire 40). On met en œuvre un polissage de cette face, par exemple par

25 un polissage mécano-chimique (CMP, acronyme du terme anglo-saxon « Chemical Mechanical Polishing ») pour réduire la rugosité de la couche 51 et supprimer les défauts liés à l'implantation. Le support intermédiaire 40 et la couche 51 de SiC monocristallin transférée forment ensemble le substrat de base tel que décrit dans le mode de réalisation illustré aux figures 1A à 1I ; c'est la face carbone du SiC monocristallin qui

30 est exposée (comme dans ce premier mode de réalisation), l'étape de transfert sur le support intermédiaire ayant permis de partir d'un substrat de base avec la face silicium exposée.

Le reliquat 50' du substrat de départ (cf. figure 2D) peut être avantageusement recyclé en vue d'une nouvelle utilisation. A cet effet, ledit reliquat peut faire l'objet d'un polissage

35 permettant de supprimer les défauts liés à l'implantation. Il peut ensuite être réutilisé en tant que nouveau substrat de départ comme illustré à la figure 2A.

La suite du procédé comprend des étapes similaires aux étapes décrites en référence aux figures 1B à 1I, et que l'on décrira donc ici de manière plus succincte.

En référence à la figure 2F, on met en œuvre une croissance épitaxiale d'une couche 11 de SiC semi-isolant sur la couche 51 du substrat de base 10, pour former le substrat donneur. Le polytype du SiC semi-isolant est avantageusement identique à celui du SiC du substrat de départ.

- 5 La croissance de la couche 11 étant effectuée sur la face carbone 51-C du substrat de base, c'est la face carbone 11-C du SiC semi-isolant qui se trouve à la surface du substrat donneur.

La couche de SiC semi-isolant présente avantageusement une épaisseur supérieure à l'épaisseur de la couche à transférer ultérieurement sur le substrat receveur.

- 10 En référence à la figure 2G, on met en œuvre un détournement de la couche 11 de SiC semi-isolant et d'une portion sous-jacente du substrat de base 10.

En référence à la figure 2H, on met en œuvre une implantation d'espèces ioniques dans la couche 11 de SiC semi-isolant du substrat donneur, de sorte à former une zone de fragilisation 13 délimitant une couche mince 12 de SiC semi-isolant monocristallin.

- 15 Compte tenu de l'orientation initiale du substrat de base, l'implantation des espèces ioniques est réalisée au travers de la face carbone 51-C du substrat donneur.

De préférence, la couche mince 12 de SiC semi-isolant monocristallin présente une épaisseur inférieure à 1 μm , qui est accessible à l'échelle industrielle avec le procédé Smart Cut™.

- 20 En référence à la figure 2I, on fournit par ailleurs un substrat receveur 20 présentant une haute résistivité électrique.

La fonction principale dudit substrat receveur 20 est de former, avec la couche 12 de SiC semi-isolant transférée sur ledit substrat receveur, un substrat adapté à la croissance épitaxiale de GaN.

- 25 L'épitaxie étant mise en œuvre à des températures élevées, le substrat receveur est de préférence choisi pour présenter un coefficient de dilatation thermique sensiblement égal à celui du SiC, afin de ne pas induire de contraintes ou de déformations lors de l'épitaxie du GaN. Ainsi, de manière particulièrement avantageuse, le substrat receveur présente avec le SiC une différence de coefficient de dilatation thermique inférieure ou égale à $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ en valeur absolue.

Par ailleurs, outre sa haute résistivité électrique, le substrat receveur contribue avantageusement à la dissipation de chaleur au sein de la structure finale. On choisit donc avantageusement pour le substrat receveur un matériau présentant une haute conductivité thermique.

- 35 Ainsi, les matériaux préférés pour le substrat receveur sont : les céramiques (par exemple mais de manière non limitative le SiC polycristallin (pSiC), le nitrure d'aluminium polycristallin (pAlN), l'oxyde de béryllium (BeO)), le diamant, ou, dans une moindre mesure, le silicium de résistivité électrique supérieure ou égale à 100 $\Omega \cdot \text{cm}$ (la

conductivité thermique de ce dernier étant plus faible que celle des autres matériaux cités).

La couche 11 de SiC semi-isolant du substrat donneur est collée sur le substrat receveur 20. Il s'agit d'un collage direct, c'est-à-dire sans utiliser une couche de collage – qui
5 serait susceptible de former une barrière thermique - interposée entre lesdits substrats. En référence à la figure 2J, on détache le substrat donneur le long de la zone de fragilisation 13.

Le détachement a pour effet de transférer la couche 12 de SiC semi-isolant sur le substrat receveur 20.

10 Comme illustré sur la figure 2K, la face libre de la couche 12 de SiC monocristallin transférée est la face silicium 12-Si (la face carbone étant du côté de l'interface avec le substrat receveur 20). On met en œuvre un polissage de cette face, par exemple par un polissage mécano-chimique (CMP, acronyme du terme anglo-saxon « Chemical Mechanical Polishing ») pour réduire la rugosité de la couche 12 et supprimer les défauts
15 liés à l'implantation.

Le reliquat du substrat donneur, qui comprend le substrat de base et la portion 11' de la couche 11 de SiC semi-isolant qui n'a pas été transférée sur le substrat receveur 20 (cf. figure 2J), peut avantageusement être recyclé en vue d'une nouvelle utilisation.

Les différents modes de recyclage ont déjà été décrits plus haut.

20 Revenant au substrat de la figure 2K, ledit substrat est adapté à la croissance d'un alliage III-N à base de gallium sur la couche 12 de SiC semi-isolant transférée.

En référence à la figure 2L, on fait croître, sur la face silicium de la couche 12 de SiC semi-isolant, une couche 30 de GaN (ou, comme mentionné plus haut, d'AlGaN ou d'InGaN). L'épaisseur de la couche 30 est typiquement comprise entre 1 et 2 μm .

25 Ensuite, comme illustré sur la figure 2M, on forme une hétérojonction en faisant croître par épitaxie, sur la couche 30, une couche 60 d'un alliage III-N différent de celui de la couche 30.

On peut ainsi poursuivre la fabrication de transistors, notamment de transistors HEMT, à partir de cette hétérojonction, par des procédés connus de l'homme du métier, le canal
30 du transistor étant formé au niveau de l'hétérojonction, et la source, le drain et la grille du transistor étant formés sur le canal.

Quel que le mode de réalisation, la structure ainsi obtenue est particulièrement intéressante en ce qu'elle comprend une couche de SiC semi-isolant, qui d'une part sert de germe à la croissance épitaxiale de la couche d'alliage III-N et qui d'autre part procure
35 une bonne dissipation thermique et une limitation des pertes RF, obtenue à moindre coût. Par ailleurs, le substrat receveur, qui supporte la couche de SiC semi-isolant, et qui présente à la fois une haute résistivité électrique et une forte conductivité thermique,

est directement en contact avec ladite couche, de sorte que la structure ne comporte pas de barrière thermique.

Références

- 5 [1] Comparative study on stress in AlGaIn/GaN HEMT structures grown on 6H-SiC, Si and on composite substrates of the 6H-SiC/poly-SiC and Si/poly-SiC, M. Guziewicz et al, Journal of Physics: Conference Series 100 (2008) 040235

Revendications

1. Procédé de fabrication d'un substrat pour la croissance épitaxiale d'une couche de nitrure de gallium (GaN), de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGaN) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGaN), comprenant les étapes successives suivantes :
 - fourniture d'un substrat de base comprenant au moins une couche (10, 51) de carbure de silicium monocristallin,
 - croissance épitaxiale d'une couche (11) de SiC semi-isolant sur la couche (10, 51) de SiC monocristallin pour former un substrat donneur,
 - implantation d'espèces ioniques dans la couche (11) de SiC semi-isolant de sorte à former une zone de fragilisation (13) délimitant une couche mince (12) de SiC semi-isolant monocristallin à transférer,
 - collage de la couche (11) de SiC semi-isolant sur un substrat receveur (20) présentant une haute résistivité électrique,
 - détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation (13) de sorte à transférer la couche mince (12) de SiC semi-isolant monocristallin sur le substrat receveur (20).
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel le substrat receveur (20) présente une différence de coefficient de dilatation thermique avec le carbure de silicium inférieure ou égale à $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.
3. Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel le substrat receveur (20) est choisi parmi un substrat de silicium à haute résistivité électrique, un substrat de SiC polycristallin à haute résistivité électrique, un substrat d'AlN polycristallin, et un substrat de diamant.
4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel la couche épitaxiale (11) de SiC semi-isolant présente une épaisseur supérieure ou égale à $3 \text{ }\mu\text{m}$, de préférence supérieure ou égale à $5 \text{ }\mu\text{m}$, et de manière encore préférée supérieure ou égale à $10 \text{ }\mu\text{m}$.
5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel l'épaisseur de la couche mince (12) transférée sur le substrat receveur (20) présente une épaisseur inférieure à $1 \text{ }\mu\text{m}$.

6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel la couche (11) de SiC semi-isolant est formée par dopage au vanadium pendant la croissance épitaxiale du SiC.
- 5 7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, comprenant en outre une étape de recyclage de la portion du substrat donneur détachée de la couche (12) transférée, en vue de former un nouveau substrat donneur.
- 10 8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel ledit recyclage comprend un polissage d'une portion résiduelle (11') de la couche (11) de SiC semi-isolant, le nouveau substrat donneur ainsi obtenu étant apte à être utilisé dans une nouvelle étape d'implantation d'espèces ioniques.
- 15 9. Procédé selon la revendication 7, dans lequel ledit recyclage comprend un polissage d'une portion résiduelle (11') de la couche (11) de SiC semi-isolant et une reprise d'épitaxie pour augmenter l'épaisseur de ladite couche de SiC semi-isolant pour former le nouveau substrat donneur.
- 20 10. Procédé selon la revendication 7, dans lequel ledit recyclage comprend un retrait d'une portion résiduelle (11') de la couche (11) de SiC semi-isolant pour exposer la face carbone de la couche (10, 51) de SiC monocristallin la et croissance épitaxiale d'une nouvelle couche (11) de SiC semi-isolant sur la face carbone (10-C, 51-C) de la couche (10, 51) de SiC monocristallin pour former le nouveau substrat donneur.
- 25 11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 10, dans lequel :
 - la couche (10, 51) de carbure de silicium monocristallin du substrat de base présente une face carbone (10-C, 51-C) libre,
 - la croissance épitaxiale de la couche (11) de SiC semi-isolant est réalisée sur
 - 30 ladite face carbone (10-C, 51-C) de la couche (10, 51) de SiC monocristallin,
 - l'implantation d'espèces ioniques est réalisée au travers de la face carbone (11-C) de la couche (11) de SiC semi-isolant,
 - la face carbone (11-C) de la couche (11) de SiC semi-isolant est collée sur le substrat receveur (20),
 - 35 - à l'issue du détachement, la face silicium (12-Si) de la couche (12) de SiC semi-isolant monocristallin transférée est exposée.

12. Procédé selon l'une des revendications 1 à 11, comprenant la fabrication du substrat de base par les étapes successives suivantes :
- fourniture d'un substrat de départ (50) de SiC monocristallin présentant une face silicium (50-Si),
 - 5 - implantation d'espèces ioniques au travers de la face silicium (50-Si) du substrat de départ (50) de sorte à former une zone de fragilisation (52) délimitant une couche mince (51) de SiC monocristallin à transférer,
 - collage de la face silicium (50-Si) du substrat de départ (50) sur un support intermédiaire (40),
 - 10 - détachement du substrat de départ (50) le long de la zone de fragilisation (52) de sorte à transférer la couche mince (51) de SiC monocristallin sur le support intermédiaire (40) et exposer la face carbone (51-C) de ladite couche (51) de SiC monocristallin transférée, le support intermédiaire (40) et la couche (51) de SiC monocristallin transférée formant ensemble le substrat de base.
 - 15
13. Procédé selon la revendication 12, dans lequel le support intermédiaire (40) est un substrat de SiC présentant une qualité cristalline inférieure à celle du substrat de départ (50).
- 20 14. Procédé selon l'une des revendications 12 ou 13, dans lequel le substrat de départ (50) est collé directement sur le support intermédiaire (40) après activation de chaque surface à coller par bombardement d'espèces neutres.
- 25 15. Procédé selon l'une des revendications 12 ou 13, dans lequel le substrat de départ (50) est collé sur le support intermédiaire (40) par l'intermédiaire d'une couche de collage réfractaire.
- 30 16. Procédé selon l'une des revendications 12 à 15, comprenant une étape de recyclage de la portion du substrat de départ (50') détachée de la couche (51) transférée, en vue de former un nouveau substrat de départ.
- 35 17. Procédé de fabrication par épitaxie d'une couche de nitrure de gallium, de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGa₂N) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGa₂N), comprenant :
- la fourniture d'un substrat fabriqué par le procédé selon l'une des revendications 1 à 16,

- la croissance épitaxiale de la couche (30) de nitrure de gallium, de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGaN) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGaN) sur la couche (30) de SiC semi-isolant dudit substrat.

- 5 18. Procédé selon la revendication 17, dans lequel la couche (30) de nitrure de gallium, de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGaN) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGaN) présente une épaisseur comprise entre 1 et 2 μm .
- 10 19. Procédé de fabrication d'un transistor à haute mobilité d'électrons (HEMT), comprenant :
- 15 - la fabrication par épitaxie d'une couche () de nitrure de gallium, de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGaN) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGaN) par le procédé selon l'une des revendications 17 ou 18,
- 20 - la formation d'une hétérojonction par épitaxie d'une couche (30) d'un matériau III-N différent du nitrure de gallium sur la couche (60) de nitrure de gallium, de nitrure de gallium et d'aluminium (AlGaN) ou de nitrure de gallium et d'indium (InGaN),
- 20 - la formation d'un canal du transistor au niveau de ladite hétérojonction,
- 20 - la formation d'une source, d'un drain et d'une grille du transistor sur le canal.