Description

Titre de l'invention : STRUCTURE COMPOSITE A BASE DE CARBURE DE SILICIUM PRESENTANT UNE BONNE CONDUCTION ELECTRIQUE VERTICALE

DOMAINE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention vise le domaine de la microélectronique et des semi-conducteurs. En particulier, l'invention concerne une structure composite comprenant une couche utile en carbure de silicium monocristallin, un substrat support en carbure de silicium polycristallin, et une région intermédiaire, entre la couche utile et le substrat support, favorisant la conduction électrique verticale.

ARRIÈRE-PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

[0002] Le carbure de silicium (SiC) est de plus en plus largement utilisé pour la fabrication de dispositifs de puissance performants. Les substrats en SiC monocristallin (c-SiC) de haute qualité, destinés à l'industrie microélectronique, restent néanmoins chers et difficiles à approvisionner en grande taille. Il est donc avantageux de recourir à des solutions de transfert de couches, pour élaborer des structures composites comprenant typiquement une couche mince en c-SiC (issue d'un substrat en c-SiC de haute qualité et destinée à accueillir les parties fonctionnelles sensibles des dispositifs) sur un substrat support plus bas coût, par exemple en SiC poly-cristallin (p-SiC). Il est également à noter qu'une structure composite peut amener des fonctionnalités et performances additionnelles, notamment en procurant un substrat support dont les propriétés mécaniques, électriques et/ou thermiques sont avantageuses.

[0003] Une solution de transfert de couche mince bien connue est le procédé Smart Cut®, basé sur une implantation d'ions légers dans un substrat donneur (c-SiC) et sur un assemblage, par collage direct, au niveau d'une interface de collage entre le substrat donneur et un substrat support (par exemple en p-SiC).

[0004] Dans le domaine de l'électronique de puissance, les composants verticaux requièrent une bonne conduction électrique entre la couche mince (aussi appelée couche utile) et le substrat support de la structure composite. En particulier, l'interface de collage entre une couche utile et un substrat support doit présenter une résistivité aussi faible que possible, préférentiellement inférieure à 1mohm.cm^2, voire inférieure à 0,1mohm.cm^2.

[0005] Le document WO2022/008809 propose de former une zone d'interface à partir d'une couche très fine d'un matériau métallique, par exemple le tungstène, dans une structure semi-conductrice SiC/SiC. Considérant une couche utile et un substrat support en SiC monocristallin de résistivité 20 mohm.cm, et une couche de 1 nm à 3 nm de tungstène

[0006] (W) en sandwich entre la couche utile et le substrat support, il est possible d'obtenir une résistivité de la zone d'interface inférieure ou égale à 0,1 mohm.cm^2, après application d'un traitement thermique adéquat et formation de très fins nodules en grande partie constitués de métal (W), responsables de la bonne conduction verticale de la

[0007] zone d'interface.

[0008] Le document WO2022/129726 propose de former une zone d'interface, dans une structure semi-conductrice SiC/SiC, comportant des régions de contact direct entre la couche utile et le substrat support, et des agglomérats comprenant un matériau semi-conducteur différent de celui ou ceux de la couche utile et du substrat support, et présentant une épaisseur inférieure ou égale à 250 nm. Le matériau semi-conducteur est choisi pour son affinité particulière avec l'oxygène. Ainsi, les agglomérats sont aptes à piéger efficacement l'oxygène éventuellement présent à l'interface de collage ; les régions de contact direct entre la couche utile et le substrat support, dépourvues de résidus d'oxyde natif notamment, autorisent une conduction électrique et/ou un contact semi-conducteur/semi-conducteur vertical efficace et de bonne qualité. Considérant une couche utile et un substrat support en c-SiC de résistivité 20 mohm.cm, et un matériau semi-conducteur en silicium, il est possible d'obtenir une résistivité de la zone d'interface inférieure ou égale à 0,1 mohm.cm^2, par exemple 0,032 mohm.cm^2 (après un recuit de la structure à 1370°C) ou 0,0076 mohm.cm^2 (après un recuit à très haute température, à savoir 1900°C).

OBJET DE L'INVENTION

[0009] La présente invention propose une solution alternative particulièrement favorable à l'obtention de très faibles résistivités d'interface dans des structures composites dont la couche utile est en c-SiC et le substrat support en p-SiC, et dont les niveaux de dopage ne sont pas nécessairement extrêmement élevés. L'invention concerne une structure composite comprenant une région intermédiaire incluant une zone d'interface entre une face assemblée de la couche utile et une face assemblée du substrat support, et comprenant des inclusions en carbure de silicium monocristallin en contact direct avec la couche utile et s'étendant entre des grains du substrat support. Ces inclusions sont particulièrement favorables à la conduction électrique verticale. L'invention concerne également un procédé de fabrication de ladite structure composite.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

[0010] La présente invention concerne une structure composite présentant une face avant et une face arrière s'étendant parallèlement à un plan principal, et comprenant :

[0011] - une couche utile en carbure de silicium monocristallin, dont une face libre constitue la face avant, et présentant une première concentration en dopants de type N,

[0012] - un substrat support en carbure de silicium polycristallin, dont une face libre constitue la face arrière, et présentant une deuxième concentration en dopants de type N, la deuxième concentration étant supérieure à la première concentration,

[0013] - une région intermédiaire s'étendant selon le plan principal et incluant une zone d'interface entre une face assemblée de la couche utile et une face assemblée du substrat support.

[0014] La structure composite est remarquable en ce que la région intermédiaire comprend des inclusions en carbure de silicium monocristallin en contact direct avec la couche utile et s'étendant, dans une direction normale au plan principal, entre des grains du substrat support, lesdites inclusions présentant une troisième concentration en dopants de type N comprise entre la première et la deuxième concentration.

[0015] Selon des caractéristiques avantageuses de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison réalisable :

- le substrat support, au moins du côté de sa face assemblée, comporte des grains de carbure de silicium présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm, lesdits grains recouvrant dans le plan principal, une surface supérieure ou égale à 20% de la face assemblée ;
- les grains de carbure de silicium présentant une taille inférieure à 500 nm recouvrent, dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 50%, voire à 80% de la face assemblée du substrat support ;
- au moins 20% des grains de carbure de silicium, du côté de la face assemblée du substrat support, présentent une désorientation, entre eux ou avec l'orientation [111], supérieure ou égale à 30° ;
- la région intermédiaire comprend des nodules de silicium, disposés dans la zone d'interface ou sous les inclusions entre des grains du substrat support ;
- la première concentration est comprise entre 1.10^{18} /cm^3 et 5.10^{18} /cm^3 ;
- la deuxième concentration est comprise entre 1.10^{20} /cm^3 et 5.10^{20} /cm^3, préférentiellement entre 1.10^{20} /cm^3 et 2.10^{20} /cm^3 ;
- les inclusions présentent une épaisseur, selon un axe normal au plan principal, comprise entre 20 nm et 70 nm, et une largeur, dans le plan principal, comprise entre 100 nm et 700 nm ;
- la région intermédiaire présente une densité d'inclusions, dans le plan principal, comprise entre 0,1 /μm^2 et 1 /μm^2.

[0016] L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une structure composite telle que ci-dessus, comprenant les étapes suivantes :

[0017] a) la fourniture d'un substrat donneur en carbure de silicium monocristallin présentant une première concentration en dopants de type N, et comprenant un plan fragile enterré induit par une implantation ionique d'espèces légères ;

[0018] b) la fourniture du substrat support polycristallin ;

[0019] c) le dépôt d'un film en silicium sur une face à assembler du substrat donneur et/ou sur la face à assembler du substrat support ;

[0020] d) l'assemblage du substrat donneur et du substrat support au niveau de leurs faces à assembler, de manière à obtenir un ensemble collé comprenant une couche intercalaire en silicium, issue du (ou des) film(s) déposés à l'étape c), entre le substrat donneur et le substrat support, ladite couche intercalaire présentant une épaisseur comprise entre 8 nm et 30 nm ;

[0021] e) la séparation le long du plan fragile enterré pour former une structure transférée comprenant la couche utile, transférée du substrat donneur, disposée sur la couche intercalaire, elle-même disposée sur le substrat support ;

[0022] f) l'application d'un traitement thermique à la structure transférée, à une température de palier comprise entre 1500°C et 2000°C, pour former la structure composite.

[0023] Selon des caractéristiques avantageuses de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison réalisable :

- le substrat support comporte, au moins du côté d'une face à assembler, des grains de carbure de silicium présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm, lesdits grains recouvrant, dans le plan principal, une surface supérieure ou égale à 20% de la face à assembler ;
- au moins 20% des grains de carbure de silicium, du côté de la face assemblée du substrat support, présentent une désorientation, entre eux ou avec l'orientation [111], supérieure ou égale à 30° ;
- la température de palier est maintenue pendant une durée comprise entre 30min et 4h ;
- le traitement de l'étape f) présente une rampe de montée en température inférieure ou égale à 20°C/min, voire inférieure ou égale à 10°C/min ;
- la deuxième concentration est de l'ordre de 1.10^{20} /cm^3, la première concentration est de l'ordre de 3.10^{18} /cm^3, et les grains de carbure de silicium présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm recouvrent, dans le plan principal, une surface supérieure ou égale à 50%, voire à 60% de la face à assembler du substrat support ;
- la deuxième concentration est de l'ordre de 1.10^{20} /cm^3, la première concentration est de l'ordre de 1.10^{18} /cm^3, et les grains de carbure de silicium présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm recouvrent, dans le plan

principal, une surface supérieure ou égale à 80% de la face à assembler du substrat support.

Brève description des dessins

[0024] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquelles :

[0025] [Fig.1] La [Fig.1] présente une structure composite conforme à l'invention ;

[0026] [Fig.2] La [Fig.2] illustre la région intermédiaire d'une structure composite conforme à l'invention, à gauche sur la figure de manière schématique, à droite avec une image en microscopie électronique en transmission ;

[0027] [Fig.3a]

[0028] [Fig.3b]

[0029] [Fig.3c]

[0030] [Fig.3d]

[0031] [Fig.3e]

[0032] [Fig.3f] Les figures 3a à 3f présentent des étapes d'un procédé de fabrication d'une structure composite, conforme à la présente invention ;

[0033] [Fig.4] La [Fig.4] présente la région intermédiaire d'une structure composite conforme à l'invention, à gauche sur la figure de manière schématique, à droite avec une image en microscopie électronique en transmission ;

[0034] [Fig.5] La [Fig.5] présente la région intermédiaire d'une structure composite conforme à l'invention, avec une image en microscopie électronique en transmission ;

[0035] [Fig.6] La [Fig.6] présente des courbes théoriques (simulations numériques) reliant la résistivité de la région intermédiaire d'une structure composite en fonction du pourcentage de surface du substrat support dans laquelle les grains de p-SiC ont une taille inférieure ou égale à 500 nm, pour différentes concentrations en dopage de la couche utile ($N_{monoSiC}$) et du substrat support ($N_{polySiC}$).

[0036] Certaines figures sont des représentations schématiques qui, dans un objectif de lisibilité, ne sont pas à l'échelle. En particulier, les épaisseurs des couches selon l'axe z ne sont pas à l'échelle par rapport aux dimensions latérales selon les axes x et y.

[0037] Les mêmes références sur les figures ou dans la description pourront être utilisées pour des éléments de même nature.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0038] L'invention concerne une structure composite 100 et un procédé de fabrication associé. La structure composite 100 présente une face avant 100a et une face arrière 100b s'étendant parallèlement à un plan principal (x,y). Elle comprend une couche utile 10 en carbure de silicium monocristallin, de préférence de polytype 4H, dont une face libre constitue la face avant 100a, et un substrat support 20 en carbure

de silicium polycristallin 3C, dont une face libre constitue la face arrière 100b ([Fig.1]). La structure composite 100 comprend également une région intermédiaire 30 s'étendant selon le plan principal (x,y) et incluant une zone d'interface entre une face assemblée de la couche utile 10 et une face assemblée du substrat support 20. La région intermédiaire 30 comprend des inclusions 31 en carbure de silicium monocristallin en contact direct avec la couche utile 10 et s'étendant, dans une direction (z) normale au plan principal (x,y), entre des grains 21i,21j du substrat support 20 ([Fig.2]).

[0039] Pour faciliter la compréhension des propriétés particulières de la structure composite 100, liées en particulier à cette région intermédiaire 30, nous décrirons, en premier lieu, le procédé de fabrication de ladite structure 100.

[0040] Le procédé selon l'invention comporte une étape a) de fourniture d'un substrat donneur 1 en carbure de silicium monocristallin (par exemple de polytype 4H) présentant une concentration en dopants de type N donnée (dite première concentration). Typiquement, la première concentration est comprise entre 1.10^{18}/cm^3 et 5.10^{18}/cm^3, correspondant à une plage de résistivité comprise entre 20 et 30 mohm.cm.

[0041] Le substrat donneur 1 comporte une face avant 1a destinée à être assemblée, et une face arrière 1b ([Fig.3a]). Il comprend un plan fragile enterré 11 induit par une implantation ionique d'espèces légères (en référence au procédé Smart Cut). Ces espèces sont par exemple l'hydrogène, l'hélium ou une combinaison de ces deux espèces. Le plan fragile enterré délimite, avec la face avant 1a du substrat donneur 1, la couche utile 10 à transférer.

[0042] Le procédé comprend une étape b) de fourniture d'un substrat support 20 en carbure de silicium polycristallin (de polytype 3C). Le substrat support 20 comporte une face avant 20a destinée à être assemblée et une face arrière 20b ([Fig.3b]). Il présente une concentration en dopants de type N (dite deuxième concentration), supérieure à la première concentration. Typiquement, la deuxième concentration est comprise entre 1.10^{20}/cm^3 et 5.10^{20}/cm^3. Pour simplifier l'approvisionnement du substrat support 20, la deuxième concentration en dopants peut préférentiellement être limitée à la gamme 1.10^{20}/cm^3 et 2.10^{20}/cm^3.

[0043] Le dopant de type N, dans le substrat donneur 1 ou dans le substrat support 20, peut notamment être l'azote.

[0044] Habituellement, dans le domaine de la microélectronique, le substrat support 20 et le substrat donneur 1 se présentent sous la forme de plaquettes circulaires de diamètre typiquement compris entre 100 mm et 200 mm (voire plus). Les faces (circulaires) avant 1a,20a et arrière 1b,20b des substrats 1,20 s'étendent parallèlement au plan

principal (x,y). Les épaisseurs des substrats donneur 1 et support 20 sont typiquement comprises entre 200 μm et 800 μm.

[0045] Avantageusement, le substrat support 20 présente la particularité de comporter, au moins du côté de sa face à assembler 20a, des grains de carbure de silicium 21i,21j présentant une taille inférieure ou égale à 2 μm, inférieure ou égale à 1μm, voire inférieure ou égale à 500 nm, lesdits grains recouvrant dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 20% de la face à assembler 20a. La taille d'un grain 21i,21j, délimité par les joints de grain 22, correspond à la plus grande dimension dudit grain 21i,21j, dans le plan principal (x,y). Pour mesurer les dimensions des grains 21i,21j ou distances entre joints de grain 22, il est possible de se baser sur des images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) classique ou impliquant une diffraction électronique (EBSD pour « Electron Back Scattered Diffraction »). Il est également envisageable d'utiliser des cristallographies par rayons X.

[0046] De manière avantageuse, les grains 21i,21j de p-SiC présentant une taille inférieure ou égale à 2 μm, inférieure ou égale à 1 μm, voire inférieure ou égale à 500 nm, recouvrent, dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 30%, à 40%, à 50%, à 60%, à 70%, voire supérieure ou égale à 80% de la face avant à assembler 20a du substrat support 20. Il est entendu que le reste de la surface est occupé par des grains de plus grande taille.

[0047] Le procédé de fabrication comprend ensuite une étape c) de dépôt d'un film 3' en silicium (amorphe ou polycristallin) sur la face à assembler 1a du substrat donneur 1, sur la face à assembler 20a du substrat support 20 ou sur les deux faces 1a,20a ([Fig.3c]). Avantageusement, ce dépôt est opéré par pulvérisation à faible température, et implique un vide poussé, typiquement entre $3x10^{-6}$ Pa et $8x10^{-6}$ Pa, avant l'injection du gaz de pulvérisation (Ar), puis une atmosphère autour de 10^{-1} Pa et 10^{-2} Pa au cours du dépôt. L'épaisseur du film 3' déposé peut varier entre quelques nm et quelques dizaines de nm.

[0048] L'étape d) suivante correspond à l'assemblage, par collage direct, du substrat donneur 1 et du substrat support 20 au niveau de leurs faces à assembler 1a,20a, de manière à obtenir un ensemble collé 50 comprenant une couche intercalaire 3 en silicium, issue du (ou des) film(s) 3' déposés à l'étape c), entre le substrat donneur 1 et le substrat support 20 ([Fig.3d]). Cette couche intercalaire 3 présente avantageusement une épaisseur comprise entre 8 nm et 30 nm.

[0049] L'assemblage est effectué par collage par adhésion moléculaire, consistant en la mise en contact des faces à assembler 1a,20a, sans ajout de matière adhésive. Il pourra s'agir d'un collage direct entre la couche utile 10 et le film en silicium 3', lorsque ce dernier a été uniquement déposé sur le substrat support 20, ou d'un collage direct entre

le substrat support 20 et le film 3', lorsque ce dernier a été uniquement déposé sur le substrat donneur 1, ou encore d'un collage direct entre deux films 3' en silicium, lorsqu'ils ont été déposés sur le substrat donneur 1 et sur le substrat support 20. L'assemblage direct est préférentiellement opéré sous un vide poussé, de l'ordre de 10^{-6} Pa ou moins.

[0050] Avantageusement, le dépôt de l'étape c) et l'assemblage direct de l'étape d) sont enchainés sans rupture du vide, in-situ ou dans un équipement multi-chambres. On citera, à titre d'exemple, l'équipement de collage par diffusion atomique (« Atomic Diffusion Bonding ») BV7000 de la société Canon, dans lequel il est possible de réaliser successivement le dépôt du film 3' et le collage direct, en maintenant une atmosphère contrôlée.

[0051] Le procédé comprend ensuite une étape e) impliquant une séparation le long du plan fragile enterré 11 pour former une structure transférée 100' comprenant la couche utile 10, transférée du substrat donneur 1, disposée sur la couche intercalaire 3, elle-même disposée sur le substrat support 20. Une telle séparation peut s'effectuer au cours d'un traitement thermique, typiquement autour de 900°C-1000°C, capable de faire croître des cavités et microfissures, induites par les espèces implantées, dans le plan fragile enterré 11. La séparation peut également être opérée par application d'une contrainte mécanique, ou encore par la combinaison de sollicitations thermiques et mécaniques, comme cela est bien connu en référence au procédé Smart Cut.

[0052] Des séquences de nettoyage, de lissage, de polissage ou de gravure de la face séparée 10a de la couche utile 10 et/ou de la face séparée 1'a du reste 1' du substrat donneur pourront être opérées de manière à restaurer une bonne qualité de surface, notamment en termes de rugosité, défectivité et autres contaminations.

[0053] Enfin, le procédé comprend une étape f) correspondant à l'application d'un traitement thermique à la structure transférée 100', à une température de palier comprise entre 1500°C et 2000°C, avantageusement entre 1750°C et 2000°C, pour former la structure composite 100 ([Fig.3f], à gauche). Cette gamme de température induit la fusion du silicium de la couche intercalaire 3. La couche intercalaire 3 va se segmenter sous forme de gouttes pour optimiser son énergie de surface et le silicium liquide 3'' d'au moins certaines de ces gouttes va diffuser dans les joints de grains 22. Il va alors être capable d'interagir avec les grains 21i,21j en SiC du substrat support et d'en dissoudre une certaine quantité. Le carbone dissous, dont le coefficient de diffusion dans le silicium liquide est de $1{,}7.10^{-8}$ m^2/s, est ensuite transporté de la zone de dissolution jusqu'à l'interface entre le silicium liquide et la couche utile 10 monocristalline. En se recombinant avec le silicium, le carbone va permettre une croissance de SiC monocristallin à partir de la couche utile 10, cette dernière agissant

comme un germe ([Fig.3f], à droite). Cela s'apparente à une croissance dans un procédé TSSG (« top seeded solution growth »), qui consiste à placer du silicium liquide dans un creuset en graphite puis de positionner un germe de SiC monocristallin de haute qualité à la surface de silicium liquide ; le carbone présent sur les parois du creuset va se dissoudre au contact du silicium liquide et diffuser dans ce dernier par gradient de température jusqu'au germe de SiC. Il s'ensuit une croissance de SiC monocristallin à partir de ce germe. Dans la présente invention, ce processus de croissance s'opère à une échelle très locale et au niveau de la zone d'interface entre la couche utile 10 et le substrat support 20 : le creuset de graphite est remplacé par les grains 21i,21j du substrat support en p-SiC, le germe par la couche utile 10 en c-SiC et la source de silicium vient de la couche intercalaire 3.

[0054] La structure composite 100 qui résulte de cette étape f) présente donc une région intermédiaire 30, qui s'étend selon le plan principal (x,y) et qui comprend des inclusions 31 en carbure de silicium monocristallin en contact direct avec la couche utile 10 et s'étendant, dans une direction (z) normale au plan principal (x,y), entre des grains 21i,21j du substrat support 20. Le mode de croissance de ces inclusions 31 favorise la diffusion des dopants, présents dans les grains 21i,21j, dans lesdites inclusions 31. Ainsi, ces dernières présentent une troisième concentration en dopants de type N comprise entre la première et la deuxième concentration, ce qui est très favorable à l'établissement d'une bonne conduction électrique entre la couche utile 10 et le substrat support 20. A titre d'exemple, pour une première concentration en dopants de 5.10^{18} /cm^3 et une deuxième concentration en dopants de 5.10^{20} /cm^3, la troisième concentration en dopants est attendue comprise entre 1.10^{20} et $1{,}5.10^{20}$ /cm^3.

[0055] Les inclusions 31 présentent typiquement une épaisseur, selon un axe (z) normal au plan principal (x,y), comprise entre 20 nm et 70 nm, et une largeur, dans le plan principal (x,y), comprise entre 100 nm et 700 nm. La taille des inclusions 31 est notamment fonction de l'épaisseur de la couche intercalaire 3 en silicium.

[0056] La région intermédiaire 30 présente une densité d'inclusions 31, dans le plan principal (x,y), typiquement comprise entre 0,1 /μm^2 et 1 /μm^2. Cette densité est d'autant plus grande que des grains 21i,21j de petite taille (inférieure ou égale à 2 μm, inférieure ou égale à 1 μm, voire inférieure ou égale à 500 nm) recouvrent une surface importante de la face assemblée 20a du substrat support 20. Selon l'invention, ces petits grains recouvrent plus de 20% de la surface de ladite face assemblée 20a, plus de 30%, plus de 40%, plus de 50%, plus de 60%, plus de 70%, voire 80% et plus.

[0057] Les orientations cristallographiques des grains 21i,21j de la face assemblée 20a du substrat support 20 peuvent aussi influencer la formation, la taille et la densité des inclusions 31. La densité d'inclusions 31 est également liée à l'épaisseur de la couche

intercalaire 3 en silicium, une plus grande quantité de silicium étant apte à augmenter ladite densité dans la région intermédiaire 30.

[0058] Il est à noter qu'une désorientation significative des grains entre eux ou par rapport à l'orientation [111] est favorable à l'interaction entre les gouttes de silicium et les joints de grains 22, car cette désorientation s'accompagne de joints de grains 22 peu stables et il est alors énergétiquement favorable pour le silicium de dissoudre des atomes de carbone au niveau desdits joints de grains 22. Une désorientation supérieure à 10°, 20°, voire 30° apparaît particulièrement avantageuse. L'orientation des grains peut être observée par microscopie électronique en transmission (TEM) ou par diffraction électronique (EBSD pour « Electron Back Scattered Diffraction »).

[0059] Une telle désorientation est attendue entre les grains 21i,21j recouvrant au moins 20%, 30%, 40% voire plus de 50% de la surface de la face assemblée 20a du substrat support 20 ; cet objectif pourra être évalué par mesures statistiques sur ladite face 20a.

[0060] Les inclusions 31 en c-SiC entre les grains p-SiC (3C) présentent une géométrie particulière. Par exemple, dans le cas d'une couche utile 10 en c-SiC de polytype 4H, il a été observé que la base d'inclusions 31 est perpendiculaire à la direction [0004] du c-SiC de la couche utile 10, parallèle aux plans {0004}. Ainsi, la base d'au moins certaines inclusions 31 n'est pas parallèle au plan principal (x,y), mais désorientée de 4° par rapport à celui-ci. Ceci est dû au fait que les plans {0004} du monocristal de SiC-4H sont désorientés de 4° par rapport à la face assemblée 1a de la couche utile 10 (et donc par rapport au plan principal) avant l'étape e). La croissance du SiC sous forme d'inclusions 31 se faisant par épitaxie à partir de la couche utile 10, les plans cristallins gardent la même orientation. La croissance se termine donc sur des plans {0004}, à 4° du plan principal (x,y).

[0061] L'orientation des flancs de l'inclusion 31 c-SiC semble dépendre de la stabilité des facettes entre le monocristal hexagonal et le polycristal cubique. L'inclinaison des flancs dépend aussi des orientations respectives des grains 21i,21j en contact avec ladite inclusion 31. En général, les flancs des inclusions 31 ont une inclinaison comprise entre 110° et 135° par rapport à la base.

[0062] Le traitement thermique de l'étape f) joue un rôle important dans la formation de ces inclusions 31 en c-SiC. Ainsi, au-delà d'une température de palier comprise entre 1500°C et 2000°C, la durée de ce palier et les rampes de montée et de descente en température peuvent également jouer un rôle.

[0063] La température de palier est préférentiellement de 1600°C, 1700°C, 1750°C, 1800°C, 1850°C, 1900°C, ou encore 1950°C. La durée du palier est définie de manière à permettre la diffusion du carbone dans le silicium liquide des gouttes aux joints de grains 22, et la croissance des inclusions 31 à partir de la couche utile 10. Ce sont ces inclusions 31 qui favorisent la conduction électrique verticale ; ainsi leur taille et leur

densité sont à développer au mieux. Préférentiellement, la température de palier est maintenue pendant une durée de 30min, 1h, 2h, 3h, 4h voire supérieure.

[0064] La montée en température (jusqu'au palier) est avantageusement choisie inférieure ou égale à 20°C/min, inférieure ou égale à 10°C/min, voire inférieure ou égale à 5°C/min, car cela favorise le fluage du silicium de la couche intercalaire 3, vers les joints de grains 22. Les mêmes plages de rampes peuvent être appliquées à la descente en température. En outre, ces plages de rampes diminuent le risque de formation de défauts de type « bulles » à l'interface d'assemblage.

[0065] La région intermédiaire 30 peut également comprendre des nodules de silicium 33,32, disposés dans la zone d'interface, ou sous les inclusions 31 entre des grains 21i,21j du substrat support 20 ([Fig.4]). En effet, certaines gouttes de silicium, issues de la segmentation de la couche intercalaire 3 lors du traitement thermique de l'étape f), peuvent se trouver en vis-à-vis d'un grain 21i,21j et non d'un joint de grain 22 : dans ce cas, elles forment, suite à leur solidification pendant la rampe de descente en température du traitement thermique, des nodules en silicium 33 disposés entre la couche utile 10 et le substrat support 20, dans la structure composite 100. Un tel nodule 33 peut présenter une épaisseur, selon un axe (z) normal au plan principal (x,y), comprise entre 50 nm et 200 nm, et une largeur, dans le plan principal (x,y), comprise entre 200 nm et 400 nm.

[0066] Il est également observé que le silicium liquide 3'' ayant diffusé entre des grains 21i,21j, le long de joints de grains 22, peut former un nodule 32 s'il n'est pas totalement consommé dans la croissance d'une inclusion 31 : dans ce cas, on retrouve un nodule de silicium 32 disposé sous une inclusion 31 et entre des grains 21i,21j du substrat support 20, dans la structure composite 100 à l'issue de l'étape e). Ce type de nodule 32 peut présenter des dimensions, dans le plan principal (x,y), de l'ordre de 200 nm à 400 nm, et une épaisseur typique, selon l'axe (z), de quelques nm à quelques μm. L'interface entre l'inclusion en c-SiC 31 et le nodule de silicium 32 sous-jacent est désorientée de 4° par rapport au plan principal (x,y).

[0067] La région intermédiaire 30 inclut en outre une zone d'interface entre une face assemblée 1a de la couche utile 10 et une face assemblée 20a du substrat support 20, ladite zone d'interface étant due à la segmentation de la couche intercalaire 3 qui provoque l'apparition de zones de contact direct entre la couche utile 10 en c-SiC et le substrat support 20 en p-SiC. Ces zones de contact direct peuvent former des marches 34 comme cela est visible sur la [Fig.5]. Il est fait l'hypothèse que la solubilisation du p-SiC (3C) dans le silicium liquide 3'' lors de l'étape f) permet de reconstruire le c-SiC (4H) de la couche utile 10 sous forme de marches 34 (« step bunching ») dans une partie au moins des zones de contact direct entre couche mince 10 et substrat support 20. Il semble que les marches 34 se situent au niveau de zones de contact direct où les

grains 21i,21j du substrat support 20 présentent de faibles désorientations entre eux, alors que les inclusions 31 en c-SiC décrites précédemment se situent au niveau de grains 21i,21j très désorientés et/ou peu stables thermodynamiquement.

[0068] L'épaisseur totale de la région intermédiaire 30, selon un axe (z) normal au plan principal (x,y), est supérieure ou égale à l'épaisseur maximale des inclusions 31. La présence de nodules en silicium 32 sous tout ou partie des inclusions 31 peut bien sûr augmenter cette épaisseur totale.

[0069] Pour atteindre une bonne conduction électrique verticale, en d'autres termes, une résistivité de la région intermédiaire 30 aussi faible que possible, préférentiellement inférieure à 1 mohm.cm^2, voire inférieure à 0,1 mohm.cm^2, certains modes de réalisation préférentiels sont proposés, en fonction des niveaux de dopage de la couche utile 10 et du substrat support 20.

[0070] Selon un premier mode de réalisation, la première concentration (couche utile 10) en dopants de type N (azote) est de l'ordre de 5.10^{18} /cm^3, et la deuxième concentration (substrat support 20) en dopants de type N (azote) est de l'ordre de 1.10^{20} /cm^3. Pour obtenir la faible résistivité souhaitée, le substrat support 20 est choisi tel que les grains de carbure de silicium 21i,21j présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm recouvrent, dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 20% de sa face à assembler. Cela participe à l'obtention d'une densité d'inclusions 31 en c-SiC, favorables à la conduction électrique verticale, compatible avec l'objectif recherché. La troisième concentration en dopants (inclusions) est comprise entre la première et la deuxième concentration.

[0071] Selon un deuxième mode de réalisation, la première concentration en dopants de type N (couche utile) est de l'ordre de 3.10^{18} /cm^3, et la deuxième concentration en dopants de type N (substrat support) est de l'ordre de 1.10^{20} /cm^3. Pour obtenir la faible résistivité souhaitée, le substrat support est choisi tel que les grains de carbure de silicium présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm recouvrent, dans le plan principal, une surface supérieure ou égale à 50%, voire à 60% de sa face à assembler. Cela participe à l'obtention d'une densité d'inclusions 31 en c-SiC avec une troisième concentration en dopants comprise entre la première et la deuxième concentration, inclusions favorables à la conduction électrique verticale, compatible avec l'objectif recherché.

[0072] Selon un troisième mode de réalisation, la première concentration en dopants de type N (couche utile) est de l'ordre de 1.10^{18} /cm^3, et la deuxième concentration en dopants de type N (substrat support) est de l'ordre de 1.10^{20} /cm^3. Pour obtenir la faible résistivité souhaitée, le substrat support est choisi tel que les grains de carbure de silicium présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm recouvrent, dans le plan

principal, une surface supérieure ou égale à 80% de sa face à assembler. Ici encore, cela participe à l'obtention d'une densité d'inclusions 31 en c-SiC avec une troisième concentration en dopants comprise entre la première et la deuxième concentration, inclusions favorables à la conduction électrique verticale, compatible avec l'objectif recherché.

[0073] La [Fig.6] présente des courbes théoriques obtenues par simulations numériques du transport électronique verticalement dans la structure composite 100. Elles illustrent l'évolution de la résistivité de la région intermédiaire 30 en fonction du pourcentage de surface du substrat support 20 (du côté de sa face assemblée 20a) dans laquelle les grains 21i,21j ont une taille inférieure ou égale à 500 nm. Lorsque la deuxième concentration en dopants du substrat support 20 (notée $N_{polySiC}$ sur la [Fig.6]) est très élevée (typiquement 5.10^{20} /cm^3), il n'est pas critique que la substrat support 20 comporte un certain pourcentage de grains de petite taille (< 500 nm), une résistivité inférieure à 10^{-5} ohm.cm^2 peut être atteinte quel que soit le niveau de dopage de la couche utile 10 (entre 1.10^{18} /cm^3 et 5.10^{18} /cm^3). En revanche, lorsque la deuxième concentration en dopants est de l'ordre de 1.10^{20} /cm^3, l'obtention d'une résistivité inférieure à 10^{-5} ohm.cm^2 va être conditionnée à la présence de grains de petites tailles favorables à la formation d'inclusions 31 en c-SiC, lesquelles bénéficient d'une troisième concentration en dopants supérieure à la première concentration de la couche utile 10. Plus la première concentration est faible, plus le pourcentage de surface de la face assemblée 20a du substrat support 20 comportant des grains 21i,21j de taille inférieure ou égale à 500 nm devra être élevé.

[0074] L'invention concerne également une structure composite 100 présentant une face avant 100a et une face arrière 100b s'étendant parallèlement au plan principal (x,y) ([Fig.1]). Elle comprend une couche utile 10 présentant une première concentration en dopants de type N. Typiquement, la première concentration est comprise entre 1.10^{18} / cm^3 et 5.10^{18} /cm^3.

[0075] Elle comprend aussi un substrat support 20 présentant une deuxième concentration en dopants de type N, supérieure à la première concentration. Typiquement, la deuxième concentration est comprise entre 1.10^{20} /cm^3 et 5.10^{20} /cm^3, voire préférentiellement limitée à la gamme 1.10^{20} /cm^3 et 2.10^{20} /cm^3.

[0076] Avantageusement, le substrat support 20, au moins du côté de sa face assemblée 20a, comporte des grains de carbure de silicium 21i,21j présentant une taille inférieure ou égale à 2 μm, inférieure ou égale à 1 μm, voire inférieure ou égale à 500 nm, lesdits grains recouvrant dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 20% de la face assemblée 20a. Dans des modes de réalisation particuliers, les grains de carbure de silicium 21i,21j présentant une taille inférieure ou égale à 2 μm, inférieure

ou égale à 1 μm, voire inférieure à 500 nm recouvrent, dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, voire 80% de la face assemblée 20a du substrat support 20.

[0077] De manière avantageuse, les grains du substrat support 20, du côté de sa face assemblée 20a, sont significativement désorientés entre eux (c'est-à-dire entre deux grains adjacents) ou par rapport à l'orientation [111] : comme évoqué précédemment dans le procédé selon l'invention, cela est favorable à l'interaction entre les gouttes de silicium et les joints de grains 22 (à l'étape f), car la faible stabilité des joints de grains 22, liée à cette désorientation, rend énergétiquement favorable la dissolution des atomes de carbone par le silicium au niveau desdits joints de grains 22. Une désorientation supérieure à 10°, 20°, voire 30° apparaît particulièrement favorable. Une telle désorientation est attendue entre les grains 21i,21j recouvrant au moins 20%, 30%, 40% voire plus de 50% de la surface de la face assemblée 20a du substrat support 20.

[0078] La structure composite 100 comprend également une région intermédiaire 30 s'étendant selon le plan principal (x,y) et incluant une zone d'interface entre une face assemblée 1a de la couche utile 10 et une face assemblée 20a du substrat support 20.

[0079] La région intermédiaire 30 comprend des inclusions 31 en carbure de silicium monocristallin en contact direct avec la couche utile 10 et s'étendant, dans une direction (z) normale au plan principal (x,y), entre des grains 21i,21j du substrat support 20. Lesdites inclusions 31 présentent une troisième concentration en dopants de type N comprise entre la première et la deuxième concentration. La présence de ces inclusions 31 procure un atout important en termes de conduction électrique de la région intermédiaire 30 de la structure composite 100.

[0080] La région intermédiaire 30 peut présenter une densité d'inclusions 31, dans le plan principal (x,y), comprise entre 0,1 /μm^2 et 1 /μm^2.

[0081] Typiquement, les inclusions 31 présentent une épaisseur, selon un axe (z) normal au plan principal (x,y), comprise entre 20 nm et 70 nm, et une largeur, dans le plan principal (x,y), comprise entre 100 nm et 700 nm.

[0082] Comme évoqué précédemment dans la description du procédé de fabrication de la structure composite 100, la région intermédiaire 30 peut également comprendre des nodules de silicium 32,33 et des marches 34 au niveau de la zone d'interface entre la face assemblée de la couche utile 10 et celle du substrat support 20.

[0083] Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits et on peut y apporter des variantes de réalisation sans sortir du cadre de l'invention tel que défini par les revendications.

Revendications

[Revendication 1] **Structure composite** (100) présentant une face avant (100a) et une face arrière (100b) s'étendant parallèlement à un plan principal (x,y), et comprenant :
- une couche utile (10) en carbure de silicium monocristallin, dont une face libre constitue la face avant (100a), et présentant une première concentration en dopants de type N,
- un substrat support (20) en carbure de silicium polycristallin, dont une face libre constitue la face arrière (100b), et présentant une deuxième concentration en dopants de type N, la deuxième concentration étant supérieure à la première concentration,
- une région intermédiaire (30) s'étendant selon le plan principal (x,y) et incluant une zone d'interface entre une face assemblée (1a) de la couche utile (10) et une face assemblée (20a) du substrat support (20) ;
la structure composite (100) étant **caractérisée en ce que** la région intermédiaire (30) comprend des inclusions (31) en carbure de silicium monocristallin en contact direct avec la couche utile (10) et s'étendant, dans une direction (z) normale au plan principal (x,y), entre des grains (21i,21j) du substrat support (20), lesdites inclusions (31) présentant une troisième concentration en dopants de type N comprise entre la première et la deuxième concentration.

[Revendication 2] Structure composite (100) selon la revendication 1, dans laquelle le substrat support (20), au moins du côté de sa face assemblée (20a), comporte des grains (21i,21j) de carbure de silicium présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm, lesdits grains (21i,21j) recouvrant dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 20% de la face assemblée (20a).

[Revendication 3] Structure composite (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle les grains (21i,21j) de carbure de silicium présentant une taille inférieure à 500 nm recouvrent, dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 50%, voire à 80% de la face assemblée (20a) du substrat support (20).

[Revendication 4] Structure composite (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle au moins 20% des grains (21i,21j) de carbure de silicium, du côté de la face assemblée (20a) du substrat

support (20), présentent une désorientation, entre eux ou avec l'orientation [111], supérieure ou égale à 30°.

[Revendication 5] Structure composite (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la région intermédiaire (30) comprend des nodules de silicium (32,33), disposés dans la zone d'interface ou sous les inclusions (31) entre des grains (21i,21j) du substrat support (20).

[Revendication 6] Structure composite (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la première concentration est comprise entre 1.10^{18} /cm^3 et 5.10^{18}/cm^3.

[Revendication 7] Structure composite (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la deuxième concentration est comprise entre 1.10^{20} /cm^3 et 5.10^{20} /cm^3, préférentiellement entre 1.10^{20} /cm^3 et 2.10^{20} /cm^3.

[Revendication 8] Structure composite (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle les inclusions (31) présentent une épaisseur, selon un axe (z) normal au plan principal (x,y), comprise entre 20 nm et 70 nm, et une largeur, dans le plan principal (x,y), comprise entre 100 nm et 700 nm.

[Revendication 9] Structure composite (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la région intermédiaire (30) présente une densité d'inclusions (31), dans le plan principal (x,y), comprise entre 0,1 /μm^2 et 1 /μm^2.

[Revendication 10] **Procédé de fabrication d'une structure composite** (100) selon l'une des revendications 1 à 9, comprenant les étapes suivantes :
a) la fourniture d'un substrat donneur (1) en carbure de silicium monocristallin présentant une première concentration en dopants de type N, et comprenant un plan fragile enterré (11) induit par une implantation ionique d'espèces légères ;
b) la fourniture du substrat support (20) polycristallin ;
c) le dépôt d'un film (3') en silicium sur une face à assembler (1a) du substrat donneur (1) et/ou sur la face à assembler (20a) du substrat support (20) ;
d) l'assemblage du substrat donneur (1) et du substrat support (20) au niveau de leurs faces à assembler (1a,20a), de manière à obtenir un ensemble collé (50) comprenant une couche intercalaire (3) en silicium, issue du (ou des) film(s) (3') déposés à l'étape c), entre le substrat donneur (1) et le substrat support (20), ladite couche

intercalaire (3) présentant une épaisseur comprise entre 8 nm et 30 nm ;
e) la séparation le long du plan fragile enterré (11) pour former une structure transférée (100') comprenant la couche utile (10), transférée du substrat donneur (1), disposée sur la couche intercalaire (3), elle-même disposée sur le substrat support (20) ;
f) l'application d'un traitement thermique à la structure transférée (100'), à une température de palier comprise entre 1500°C et 2000°C, pour former la structure composite (100).

[Revendication 11] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon la revendication 10, dans lequel le substrat support (20) comporte, au moins du côté d'une face à assembler (20a), des grains (21i,21j) de carbure de silicium présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm, lesdits grains (21i,21j) recouvrant, dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 20% de la face à assembler (20a).

[Revendication 12] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 10 et 11, dans lequel au moins 20% des grains (21i,21j) de carbure de silicium, du côté de la face assemblée (20a) du substrat support (20), présentent une désorientation, entre eux ou avec l'orientation [111], supérieure ou égale à 30°.

[Revendication 13] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 10 à 12, dans lequel la température de palier est maintenue pendant une durée comprise entre 30min et 4h.

[Revendication 14] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 10 et 13, dans lequel le traitement de l'étape f) présente une rampe de montée en température inférieure ou égale à 20°C/min, voire inférieure ou égale à 10°C/min.

[Revendication 15] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 10 à 14, dans lequel :
- la deuxième concentration est de l'ordre de 1.10^{20} /cm^3,
- la première concentration est de l'ordre de 3.10^{18} /cm^3, et
- les grains (21i,21j) de carbure de silicium présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm recouvrent, dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 50%, voire à 60% de la face à assembler (20a) du substrat support (20).

[Revendication 16] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 10 à 14, dans lequel :

- la deuxième concentration est de l'ordre de 1.10^{20} /cm^3,
- la première concentration est de l'ordre de 1.10^{18} /cm^3, et
- les grains (21i,21j) de carbure de silicium présentant une taille inférieure ou égale à 500 nm recouvrent, dans le plan principal (x,y), une surface supérieure ou égale à 80% de la face à assembler (20a) du substrat support (20).