

DESCRIPTION

TITRE : PROCEDE DE FABRICATION D'UNE STRUCTURE COMPOSITE
COMPRENANT UNE COUCHE MINCE EN SIC MONOCRISTALLIN SUR UN
SUBSTRAT SUPPORT EN SIC CRISTALLIN

DOMAINE DE L'INVENTION

La présente invention concerne le domaine des matériaux semi-conducteurs pour composants microélectroniques. Elle concerne en particulier un procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en carbure de silicium monocristallin sur un substrat support en carbure de silicium cristallin, et notamment poly-cristallin.

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

L'intérêt pour le carbure de silicium (SiC) a considérablement augmenté au cours des dernières années, car ce matériau semi-conducteur peut accroître la capacité de traitement de l'énergie. Le SiC est de plus en plus largement utilisé pour la fabrication de dispositifs de puissance innovants, pour répondre aux besoins de domaines montants de l'électronique, comme notamment les véhicules électriques.

Les dispositifs de puissance et les systèmes intégrés d'alimentation basés sur du carbure de silicium monocristallin peuvent gérer une densité de puissance beaucoup plus élevée par rapport à leurs homologues traditionnels en silicium, et ce avec des dimensions de zone active inférieures. Pour limiter encore les dimensions des dispositifs de puissance sur SiC, il est avantageux de fabriquer des composants verticaux plutôt que latéraux. Pour cela, une conduction électrique verticale, entre une électrode disposée en face avant de la structure SiC et une

électrode disposée en face arrière, doit être autorisée par ladite structure.

Les substrats en SiC monocristallin 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 minces, pour élaborer des structures composites comprenant typiquement une couche mince en SiC monocristallin sur un substrat support plus bas coût. Une solution de transfert de couche mince bien connu est le procédé Smart Cut™, basé sur une implantation d'ions légers et sur un assemblage par collage direct. Un tel procédé permet par exemple de fabriquer une structure composite comprenant une couche mince en SiC monocristallin (c-SiC), prélevée d'un substrat donneur en c-SiC, en contact direct avec un substrat support en SiC poly-cristallin (p-SiC), et autorisant une conduction électrique verticale. Il reste néanmoins difficile de réaliser un collage direct par adhésion moléculaire de bonne qualité entre deux substrats c-SiC et p-SiC, car la gestion de la rugosité et de l'état de surface desdits substrats est complexe.

Différentes méthodes dérivées de ce procédé sont également connues de l'état de la technique. Par exemple, F. Mu et al (ECS Transactions, 86 (5) 3-21, 2018) mettent en œuvre un collage direct, après activation des surfaces à assembler par bombardement d'argon (SAB pour « Surface Activation bonding ») : un tel traitement préalable au collage génère une très forte densité de liaisons pendantes, lesquelles favorisent la formation de liaisons covalentes à l'interface d'assemblage, et donc une forte énergie de collage. Cette méthode présente néanmoins l'inconvénient de générer une couche amorphe, à la surface du substrat donneur en SiC monocristallin, qui impacte

défavorablement la conduction électrique verticale entre la couche mince en c-SiC et le substrat support en p-SiC.

Des solutions ont été proposées pour résoudre ce problème, en particulier dans le document EP3168862, mettant en œuvre une implantation d'espèces dopantes dans ladite couche amorphe, pour restaurer ses propriétés électriques. L'inconvénient principal de cette approche est sa complexité et donc son coût.

On connaît par ailleurs le document US8436363, qui décrit un procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en c-SiC disposée sur un substrat support métallique dont le coefficient de dilatation thermique est apparié avec celui de la couche mince. Ce procédé de fabrication comprend les étapes suivantes :

- la formation d'un plan fragile enterré dans un substrat donneur de c-SiC, délimitant une couche mince entre ledit plan fragile enterré et une surface avant du substrat donneur,
- le dépôt d'une couche métallique, par exemple en tungstène ou en molybdène, sur la surface avant du substrat donneur pour former le substrat support d'une épaisseur suffisante pour remplir le rôle de raidisseur,
- la séparation le long du plan fragile enterré, pour former d'une part, la structure composite comprenant le substrat support métallique et la couche mince en c-SiC, et d'autre part, le reste du substrat donneur en c-SiC.

Un tel procédé de fabrication n'est cependant pas compatible lorsque le matériau formant le substrat support est du p-SiC requérant un dépôt à des températures supérieures à 1200°C (températures habituelles pour la fabrication de p-SiC). En effet, à ces températures élevées, la cinétique de croissance des cavités présentes dans le plan fragile enterré est plus rapide que la cinétique de croissance de la couche en p-SiC et

l'épaisseur requise pour un effet raidisseur n'est pas atteinte avant l'apparition du phénomène de cloquage, lié à la déformation de la couche à l'aplomb des cavités.

Quelle que soit la technique de transfert de couche utilisée, se pose en outre le problème de fournir une structure composite comprenant une couche mince en c-SiC de très haute qualité, et en particulier dépourvue de défauts étendus (ou en présentant une très faible densité), susceptibles d'affecter les performances et la fiabilité des dispositifs de puissance destinés à être élaborés sur ladite couche mince.

OBJET DE L'INVENTION

La présente invention concerne une solution alternative à celles de l'état de la technique, et vise à remédier à tout ou partie des inconvénients précités. Elle concerne en particulier un procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en c-SiC de haute qualité disposée sur un substrat support en SiC cristallin.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

L'invention concerne un procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support en carbure de silicium. Le procédé comprend :

a) une étape de fourniture d'un substrat initial en carbure de silicium monocristallin,

b) une étape de croissance par épitaxie d'une couche donneuse en carbure de silicium monocristallin sur le substrat initial, pour former un substrat donneur, la couche donneuse

présentant une densité de défauts cristallins inférieure à celle du substrat initial,

c) une étape d'implantation ionique d'espèces légères dans la couche donneuse, pour former un plan fragile enterré délimitant la couche mince entre ledit plan fragile enterré et une surface libre de ladite couche donneuse,

d) une étape de formation d'un substrat support en carbure de silicium sur la surface libre de la couche donneuse, comprenant un dépôt à une température comprise entre 400°C et 1100°C, et définissant une interface non-isolante entre la couche donneuse et le substrat support,

e) une étape de séparation le long du plan fragile enterré, pour former d'une part la structure composite et d'autre part le reste du substrat donneur,

f) une étape de traitement(s) mécanique(s) et/ou chimique(s) de la structure composite, pour lisser la surface libre de la couche mince et pour corriger l'uniformité d'épaisseur de la structure composite.

Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- le dépôt de l'étape d) est effectué à une température comprise entre 600°C et 900°C, voire préférentiellement entre 700°C et 800°C, et est basé sur une technique de dépôt chimique en phase vapeur ou une technique de frittage ou une technique de dépôt en phase liquide d'une solution de poudre de céramique ;
- le dépôt de l'étape d) est un dépôt chimique en phase vapeur assisté par injection liquide directe ;
- le dépôt de l'étape d) est un dépôt chimique en phase vapeur à basse pression ou assisté plasma ;
- le dépôt de l'étape d) est effectué à une vitesse supérieure à 10 microns/heure, voire préférentiellement supérieure à 50 microns/heure ;

- à l'issue du dépôt de l'étape d), le substrat support présente une épaisseur supérieure ou égale à 50 microns, voire une épaisseur supérieure ou égale à 100 microns ;
- l'étape a) comprend la formation, sur le substrat initial, d'une couche monocristalline de conversion, pour convertir des défauts de type dislocation du plan basal du substrat initial en défauts de type dislocations coin traversantes ;
- l'étape b) de croissance par épitaxie est effectuée à une température supérieure à 1200°C, préférentiellement comprise entre 1500°C et 1650°C ;
- les espèces légères implantées lors de l'étape c) sont choisies parmi l'hydrogène et/ou l'hélium ;
- l'étape e) de séparation est opérée à une température supérieure ou égale à la température du dépôt de l'étape d) ;
- l'étape e) de séparation est opérée par application d'une contrainte mécanique à un empilement comprenant le substrat support solidaire du substrat donneur ;
- l'étape f) comprend un polissage mécano-chimique simultané d'une face avant et d'une face arrière de la structure composite ;
- le procédé comprend une étape de traitement thermique à une température comprise entre 1000°C et 1800°C, avant ou après l'étape f) ;
- le procédé comprend une deuxième étape g) de croissance par épitaxie d'une couche additionnelle de carbure de silicium monocristallin sur la couche mince de la structure composite ;
- le procédé comprend une étape de reconditionnement du reste du substrat donneur en vue d'une réutilisation en tant que substrat initial ou en tant que substrat donneur ;
- le reste du substrat donneur est réutilisé au moins deux fois en tant que nouveau substrat donneur.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

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

[Fig. 1] La figure 1 présente une structure composite élaborée selon un procédé de fabrication conforme à l'invention ;

[Fig. 2a]

[Fig. 2b]

[Fig. 2c]

[Fig. 2d]

[Fig. 2e]

[Fig. 2f]

[Fig. 2g] Les figures 2a à 2g présentent des étapes d'un procédé de fabrication conforme à l'invention ;

[Fig. 3a]

[Fig. 3b] Les figures 3a et 3b présentent des étapes d'un procédé de fabrication conforme à l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

Dans la partie descriptive, les mêmes références sur les figures pourront être utilisées pour des éléments de même type. Les 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 ; et

les épaisseurs relatives des couches entre elles ne sont pas nécessairement respectées sur les figures.

La présente invention concerne un procédé de fabrication d'une structure composite 1 comprenant une couche mince 10 en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support 20 en carbure de silicium (figure 1). Le substrat support 20 est cristallin, et avantageusement poly-cristallin (« p-SiC » sera utilisé par la suite par parler de SiC poly-cristallin).

Le procédé comprend en premier lieu une étape a) de fourniture d'un substrat initial 11 en carbure de silicium monocristallin (figure 2a). Dans la suite de la description, « c-SiC » sera utilisé pour parler de carbure de silicium monocristallin.

Le substrat initial 11 se présente préférentiellement sous la forme d'une plaquette de diamètre 100mm ou 150mm voire 200mm et d'épaisseur comprise typiquement entre 300 et 800 microns. Il présente une face avant 11a et une face arrière 11b. La rugosité de surface de la face avant 11a est avantageusement choisie inférieure à 1 nm Ra, rugosité moyenne (« average roughness » selon la terminologie anglo-saxonne) mesurée par microscopie à force atomique (AFM) sur un scan de 20 microns x 20 microns.

Le procédé comprend ensuite une étape b) de croissance par épitaxie d'une couche donneuse 110 en carbure de silicium monocristallin sur le substrat initial 11, pour former un substrat donneur 111 (figure 2b). L'étape de croissance par épitaxie est réalisée de sorte que la couche donneuse 110 présente une densité de défauts cristallins inférieure à celle du substrat initial 11.

Typiquement, le substrat initial 11 en c-SiC est de polytype 4H ou 6H, présentant une désorientation ("offcut")

inférieure à 4.0° par rapport à l'axe cristallographique $\langle 11-20 \rangle \pm 0.5^\circ$, et une densité de dislocations traversantes (« Micropipes ») inférieure ou égale à $5/\text{cm}^2$, voire inférieure à $1/\text{cm}^2$. Dopé de type N (azote), il présente une résistivité préférentiellement comprise entre 0.015 ohm.cm et 0.030 ohm.cm . On pourra choisir un substrat initial 11 présentant une faible densité de défauts de type dislocation du plan basal ou BPD (pour « basal plane dislocation » selon la terminologie anglo-saxonne), typiquement inférieure ou égale à $3000/\text{cm}^2$. Des substrats de c-SiC présentant des densités de BPD de l'ordre de $1500/\text{cm}^2$ sont raisonnablement disponibles, ce qui facilite leur approvisionnement.

Il est souhaitable que la couche donneuse 110, à partir de laquelle la couche mince 10 en c-SiC de la structure composite 1 sera formée à l'issue du procédé de la présente invention, présente une qualité cristalline supérieure à celle du substrat initial 11, pour répondre aux spécifications requises des composants verticaux destinés à être élaborés sur ladite couche mince 10. En effet, différents types de défauts étendus sont présents dans une couche ou un substrat en c-SiC. Ces défauts étendus peuvent affecter les performances et la fiabilité des composants. En particulier, les défauts de type BPD sont tueurs pour des composants bipolaires : en effet, un défaut d'empilement de type Shockley ou SSF (pour « Shockley stacking fault ») est étendu à partir de la dislocation lorsque l'énergie de recombinaison d'une paire électron-trou est disponible. L'expansion d'un défaut d'empilement SSF à l'intérieur de la région active du composant entraîne une augmentation de la résistance à l'état passant du composant.

La couche donneuse 110 en c-SiC est donc élaborée de manière à présenter une densité de défauts de type BPD inférieure ou égale à $1/\text{cm}^2$.

Pour cela, l'étape b) de croissance par épitaxie est effectuée à une température supérieure à 1200°C, préférentiellement comprise entre 1500°C et 1650°C. Les précurseurs utilisés sont le monosilane (SiH_4), le propane (C_3H_8) ou l'éthylène (C_2H_4) ; le gaz porteur pourra être de l'hydrogène avec ou sans argon.

Le faible taux de défauts BPD dans la couche donneuse 110 est obtenu en privilégiant la conversion des défauts BPD présents dans le substrat initial 11 en dislocations coins traversantes ou TED (pour « Threading Edge Dislocations »).

Selon un mode de réalisation particulier, l'étape a) comprend la formation d'une couche monocristalline de conversion 13, préférentiellement en c-SiC, pour maximiser la conversion des défauts de type BPD du substrat initial 11 en défauts de type TED (figure 3a). Pour cela, il est avantageux de choisir un angle de découpe faible proche de 4° pour le substrat initial 11 en c-SiC, d'augmenter la gravure in situ réalisée avant la croissance épitaxiale, de viser de fortes vitesses de croissance (typiquement supérieures à 5µm/h) et enfin de choisir des conditions de croissance de la couche monocristalline de conversion 13, avec un ratio C/Si au niveau des flux de précurseurs proche de 1.

L'étape b) consiste ensuite à réaliser la croissance épitaxiale de la couche donneuse 110 sur ladite couche de conversion 13 (figure 3b). Selon ce mode particulier de réalisation, il est également possible d'obtenir une couche donneuse 110 en c-SiC présentant une densité de défauts de type BPD inférieure ou égale à 1/cm² voire inférieure à 0,1/cm². De plus, la probabilité de dégradation bipolaire (probabilité qu'un trou arrive sous le point de conversion BPD/TED) à l'issue du procédé selon la présente invention est négligeable (< 0.1%), la couche monocristalline de conversion 13 n'étant pas destinée à être transférée dans la structure composite 1. L'état de l'art

visant à réduire les dégradations bipolaires consiste à intégrer entre la couche de conversion et la couche active, une couche de recombinaison (dopée azote au-delà 10^{18} at/cm³). Cette couche peut, au prix d'une épaisseur de 10µm et d'une concentration supérieure à 5×10^{18} /cm³, réduire la probabilité de présence des trous à 0,1% par rapport à la structure de base ne comportant pas cette couche de recombinaison. Dans la présente invention, la couche monocristalline de conversion 13 n'étant pas transférée, la probabilité qu'un trou atteigne le point de nucléation de la dégradation bipolaire (point de conversion BPD - TED ou tout point de BPD) est a minima inférieure à 0,1% voire proche de 0%.

Notons que des séquences conventionnelles de nettoyage ou de gravure du substrat initial 11, visant à éliminer tout ou partie de contaminants particuliers, métalliques, organiques, ou une couche d'oxyde natif potentiellement présents sur sa face avant 11a, pourront être réalisées préalablement à l'étape b) de croissance par épitaxie.

Le procédé de fabrication selon l'invention comprend, en outre, une étape c) d'implantation ionique d'espèces légères dans la couche donneuse 110, jusqu'à une profondeur déterminée représentative de l'épaisseur de couche mince 10 souhaitée et dans tous les cas n'atteignant pas substrat initial 11 (et/ou la couche de conversion 13, lorsque celle-ci est présente). Cette implantation génère un plan fragile enterré 12 dans la couche donneuse 110 qui délimite la couche mince 10 entre ledit plan fragile enterré 12 et une surface libre 11a de ladite couche donneuse 110 (figure 2c).

Les espèces légères implantées sont préférentiellement de l'hydrogène, de l'hélium ou une co-implantation de ces deux espèces. Comme cela est bien connu en référence au procédé Smart CutTM, ces espèces légères vont former, autour de la profondeur

déterminée, des microcavités distribuées dans une fine couche parallèle à la surface libre 11a de la couche donneuse 110, soit parallèle au plan (x,y) sur les figures. On appelle cette fine couche le plan fragile enterré 12, par souci de simplification.

L'énergie d'implantation des espèces légères est choisie de manière à atteindre la profondeur déterminée dans la couche donneuse 110.

Typiquement, des ions hydrogène seront implantés à une énergie comprise entre 10 keV et 250 keV, et à une dose comprise entre $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ et $1 \times 10^{17}/\text{cm}^2$, pour délimiter une couche mince 10 présentant une épaisseur de l'ordre de 100 à 1500 nm.

Notons qu'une couche de protection pourra être déposée sur la face libre de la couche donneuse 110, préalablement à l'étape d'implantation ionique. Cette couche de protection peut être composée par un matériau tel que l'oxyde de silicium ou le nitrure de silicium par exemple.

Le procédé selon l'invention comprend ensuite une étape d) de formation d'un substrat support 20 en carbure de silicium cristallin sur la surface libre de la couche donneuse 110 (figure 2d). Cette étape d) comprend un dépôt à une température comprise entre 400°C et 1100°C. De façon avantageuse, le dépôt de l'étape d) est effectué à une température comprise entre 600°C et 900°C, voire préférentiellement entre 700°C et 800°C.

De plus, l'étape d) définit une interface non-isolante entre la couche donneuse 110 et le substrat support 20. En d'autres termes, l'étape d) est réalisée de sorte que l'interface entre la couche donneuse 110 et le substrat support 20 soit électriquement conductrice : on visera une résistance spécifique de l'interface typiquement inférieure à 1 mohm.cm², voire inférieure à 0,1 mohm.cm². Avantageusement, pour assurer la conductivité électrique de l'interface, un retrait de l'oxyde natif présent sur la face libre de la couche donneuse 110 est

réalisé par désoxydation HF (acide fluorhydrique), par voie humide ou sèche. Alternativement, un surdopage des premiers nanomètres déposés du substrat support 20 pourra favoriser la conductivité électrique de l'interface entre couche donneuse 110 et substrat support 20.

De manière également avantageuse, préalablement à la désoxydation et/ou à la formation du substrat support 20, des séquences de nettoyage sont appliquées au substrat donneur 111 pour éliminer tout ou partie de contaminants particuliers, métalliques ou organiques potentiellement présents sur ses faces libres.

Le dépôt de l'étape d) peut être réalisé par différentes techniques.

Selon une première option, la mise en forme du substrat support 20 peut être effectuée par une technique de frittage. Selon celle-ci, une poudre de SiC est compactée à haute température sous forte pression. Il est ainsi possible d'obtenir des couches de céramiques solides. Dans le cadre de cette invention, le frittage s'effectue directement sur le substrat donneur 111 implanté, afin d'obtenir dès la fin du frittage un substrat support 20 épais et adhérent à la couche donneuse 110. Il est essentiel que le matériau fritté (substrat support 20) atteigne une cohésion suffisante pour permettre l'étape e) suivante de séparation, décrite plus loin. Il faut donc abaisser la température de frittage de la poudre de SiC en-dessous de cette température de séparation. Pour cela, on utilise soit des additifs classiques tels que le Bore, le carbone ou l'AlN, ou on utilise des nano-poudres de SiC.

Selon une deuxième option, la mise en forme du substrat support 20 peut être effectuée par une technique de dépôt en phase liquide d'une solution de poudre de céramique. Dans ce cas, un matériau polymère précéramique (PDC, pour « polymer

derived ceramics ») est mélangé à une poudre de céramique (du SiC par exemple). On obtient une solution visqueuse qui peut être déposée sous forme de couche par étalement, revêtement par centrifugation (« spin-coating ») ou moulage. Un recuit à basse température (~200°C) conduit à la polymérisation et à la réticulation du matériau et provoque la solidification de la couche déposée. La mise en forme du substrat support 20 est donc effective à basse température. Ensuite, des recuits à plus hautes températures (> 600°C) permettent la pyrolyse du polymère. Le matériau obtenu est alors une céramique pure. Dans le cadre de cette invention, on cherchera à obtenir un matériau de type SiC ou SiCN. Les charges céramiques sont du SiC en poudre et le PDC des molécules de la famille des polycarbosilanes ou polyorganosilicones (pour obtenir du SiC) et des polyorganosilazane (pour obtenir du SiCN).

Selon une troisième option, le dépôt de l'étape d) peut être réalisé par une technique de dépôt chimique en phase vapeur (CVD, pour « Chemical vapor deposition »).

Par exemple, le dépôt peut être effectué par une technique de CVD thermique comme un dépôt à pression atmosphérique (APCVD pour « atmospheric pressure CVD) ou à basse pression (LPCVD pour « low pressure CVD »). Les précurseurs peuvent être choisis parmi le méthylsilane, le diméthyldichlorosilane ou encore le dichlorosilane + i-butane.

Le dépôt peut être une technique de CVD assistée par plasma (PECVD pour « plasma enhanced CVD »), avec par exemple du tétrachlorure de silicium et du méthane comme précurseurs. Préférentiellement, la fréquence de la source utilisée pour générer la décharge électrique créant le plasma est de l'ordre de 3,3MHz, et plus généralement comprise entre 10kHz et 100GHz.

Le dépôt de l'étape d) peut en outre être basé sur une technique de dépôt chimique en phase vapeur assisté par injection liquide directe (DLI-CVD, pour « Direct Liquid Injection -

CVD »). Une telle technique procure de bons rendements entre les matières (précurseurs) apportés et les épaisseurs de dépôt atteintes, sans nécessité d'utiliser des précurseurs chlorés, ce qui limite les coûts et les contraintes environnementales. Le dépôt DLI-CVD met en œuvre un précurseur disilanebutane ou un précurseur polysilyléthylène, ledit précurseur étant pur ou dilué. Une telle technique est décrite dans la thèse de Guillaume Boisselier (2013, « Dépôt chimique en phase vapeur de carbures de chrome, de silicium et d'hafnium assisté par injection liquide pulsée »), pour des applications de dépôt de revêtements céramiques sur des pièces, pour les protéger lors de traitements à très hautes températures, par exemple des pièces métalliques en acier ou alliages.

La demanderesse a développé une étape d) de dépôt basée sur la technique de DLI-CVD pour une application tout à fait différente, à savoir la formation d'un substrat support 20 en SiC sur une couche donneuse 110 en c-SiC, pour fabriquer un substrat composite destiné au domaine microélectronique. Les paramètres du dépôt (par exemple, pression de 6,7kPa, température entre 700°C et 850°C) sont déterminés pour que le substrat support 20 présente une bonne conductivité électrique, soit entre 0,015 et 0,03 ohm.cm, une haute conductivité thermique, soit supérieure ou égale à 200 W.m⁻¹.K⁻¹ et un coefficient de dilatation thermique similaire à celui de la couche mince 10, soit typiquement entre 3,8^{E-6} /K et 4,2^{E-6} /K à température ambiante.

Pour obtenir ces propriétés, le substrat support 20 peut par exemple présenter les caractéristiques structurelles suivantes : structure poly-cristalline, grains de type 3C SiC, orientés 111, de taille moyenne 1 à 10µm, dopage de type N pour une résistivité finale inférieure ou égale à 0,03 ohm.cm.

Avantageusement, le dépôt par CVD, quelle que soit la technique employée, est effectué à une vitesse supérieure à 10

microns/heure, voire supérieure à 50 microns/heure, voire encore supérieure à 100 microns/heure. En plus de la raison économique évidente, il est important d'atteindre rapidement une épaisseur significative de substrat support 20 de manière à assurer un effet raidisseur vis-à-vis du plan fragile enterré 12, dans lequel les cavités suivent une croissance activée thermiquement.

A l'issue de l'étape d), la couche support 20 présente une épaisseur supérieure ou égale à 50 microns, voire une épaisseur supérieure ou égale à 100 microns. L'empilement 211 résultant de l'étape d) comprend le substrat support 20 disposé sur la couche donneuse 110, elle-même disposée sur le substrat initial 11.

Le procédé selon la présente invention comprend ensuite une étape e) de séparation le long du plan fragile enterré 12, pour former d'une part la structure composite 1 et d'autre part le reste du substrat donneur 111' (figure 2e).

Selon un mode avantageux de mise en œuvre, l'étape e) de séparation est opérée en appliquant un traitement thermique à l'empilement 211, à une température de séparation supérieure ou égale à la température du dépôt de l'étape d). En effet, les microcavités présentes dans le plan fragile enterré 12 suivent une cinétique de croissance jusqu'à l'initiation d'une onde de fracture qui va se propager sur toute l'étendue du plan fragile enterré 12 et provoquer la séparation entre la structure composite 1, et le reste du substrat initial 111'. En pratique, la température pourra être comprise entre 950°C et 1200°C, en fonction des conditions d'implantation de l'étape c).

Selon un mode alternatif de mise en œuvre, l'étape e) de séparation est opérée par application d'une contrainte mécanique à l'empilement 211. La contrainte pourra par exemple être exercée par l'insertion d'un outil (ex : lame de rasoir) à proximité du

plan fragile enterré 12. A titre d'exemple, la contrainte de séparation pourra être de l'ordre de quelques GPa, préférentiellement supérieure à 2GPa.

Selon encore un autre mode de mise en œuvre, une étape e) de séparation le long du plan fragile enterré 12 s'opère pendant ou directement à la fin de l'étape d) de formation du substrat support 20, en particulier lorsque les températures de dépôt à cette étape sont dans la gamme 800°C - 1100°C.

Comme cela est connu en soi, à l'issue de l'étape e) de séparation, la face libre 10a de la couche mince 10 de la structure composite 1 présente une rugosité de surface comprise entre 5 et 100 nm RMS (par mesure au microscope à force atomique (AFM), sur des scans de 20 microns x 20 microns).

Le procédé selon l'invention comprend donc une étape f) de traitement(s) mécanique(s) et/ou chimique(s) de la structure composite 1, pour lisser la surface libre 10a de la couche mince 10 et pour corriger l'uniformité d'épaisseur de la structure composite 1 (figure 2f).

L'étape f) peut donc comprendre un polissage mécano-chimique (CMP) de la face libre 10a de la couche mince 10, typiquement avec un retrait de matière de l'ordre de 50 nm à 1000 nm, de manière à obtenir une rugosité finale inférieure à 0,5 nm Rms (sur un champ AFM de 20x20µm), voire inférieure à 0,3 nm. L'étape f) peut également comprendre un traitement chimique ou plasma (nettoyage ou gravure), par exemple un nettoyage de type SC1/SC2 (Standard Clean 1, Standard Clean 2) et/ou HF (acide fluorhydrique), ou un plasma N₂, Ar, CF₄, etc, pour améliorer encore la qualité de la face libre 10a de la couche mince 10.

De plus, l'étape f) peut comprendre un polissage mécano-chimique (CMP) et/ou un traitement chimique (gravure ou nettoyage) et/ou un traitement mécanique (rectification) de la face arrière 20b du substrat support 20 ; cela afin d'améliorer

l'uniformité d'épaisseur dudit substrat support 20 ainsi que sa rugosité en face arrière 20b. Une rugosité inférieure à 0,5 nm RMS (par mesure au microscope à force atomique (AFM), sur des champs de 20 microns x 20 microns) est souhaitée pour élaborer des composants verticaux, pour lesquels au moins une électrode métallique sera présente sur la face arrière 20b du substrat composite 1.

On pourra également réaliser lors de cette étape f) un polissage ou une rectification des bords de la structure composite 1 pour rendre compatible la forme de son contour circulaire et de la tombée de bord avec les exigences des procédés de fabrication microélectronique.

Selon un mode de réalisation avantageux, l'étape f) de traitement mécano-chimique comprend un polissage (CMP) simultané d'une face avant 10a et d'une face arrière 20b de la structure composite 1, pour lisser et améliorer l'uniformité d'épaisseur de ladite structure 1. Les paramètres de polissage pourront être différents entre la face avant et la face arrière, le lissage d'une surface de c-SiC et d'une surface de p-SiC requérant habituellement des consommables différents. On privilégie en particulier la composante mécanique du polissage pour la face arrière 20b lorsque le substrat support 20 est en p-SiC, pour limiter l'attaque préférentielle des joints de grains par la composante chimique du polissage. Au titre d'exemple, les paramètres de polissage, comme la vitesse de rotation (tête de polissage et plateau), la pression, la concentration et les propriétés physiques des abrasifs (i.e. diamètre de nanoparticules de diamant entre une dizaine de nm et 1µm), peuvent être modifiés pour accentuer la composante mécanique.

Toujours selon un mode de réalisation avantageux, une étape f') de traitement thermique à une température comprise entre 1000°C et 1800°C, pendant environ une heure et jusqu'à

quelques heures, est opérée avant ou après l'étape f). L'objectif de cette étape est de stabiliser la structure composite 1, en faisant, le cas échéant, évoluer la configuration cristalline du substrat support 20, de sorte que la structure 1 soit compatible avec des traitements thermiques ultérieurs à hautes températures, requis pour la fabrication de composants sur la couche mince 10.

Le procédé selon l'invention peut comprendre une deuxième étape g) de croissance par épitaxie d'une couche additionnelle 10' de carbure de silicium monocristallin sur la couche mince 10 de la structure composite 1 (figure 2g). Une telle étape est appliquée lorsqu'une épaisseur relativement importante de couche utile 100 est nécessaire pour la fabrication de composants, typiquement, de l'ordre de 5 à 50 microns. Les conditions d'épitaxie peuvent éventuellement être choisies similaires à celles de l'étape b), préférentiellement à plus basse température de manière à limiter les contraintes induites dans la couche utile 100 (correspondant à l'ensemble couche mince 10 et couche additionnelle 10') du fait de la structure composite 1.

Enfin, le procédé de fabrication peut comprendre une étape de reconditionnement du reste 111' du substrat donneur en vue d'une réutilisation en tant que substrat initial 1 ou en tant que substrat donneur 111. Une telle étape de reconditionnement est basée sur un ou plusieurs traitements de la face 110'a (figure 2e), par polissage mécano-chimique de surface ou de bords, et/ou par rectification mécanique, et/ou par gravure chimique sèche ou humide. Préférentiellement, l'épaisseur de la couche donneuse 110 formée à l'étape b) est définie de sorte que le reste 111' du substrat donneur 111 puisse

être réutilisé au moins deux fois en tant que substrat donneur 111. Préférentiellement, lorsque la couche de conversion 13 est présente, on prendra garde à conserver ladite couche intacte, c'est-à-dire à conserver toujours une part de couche donneuse 10 sur le reste 111' du substrat donneur. Ainsi, lorsque la part de couche donneuse 10 est insuffisante pour l'élaboration d'une structure composite 1, seule l'étape de croissance par épitaxie de couche donneuse 10 est nécessaire et non l'étape préalable de croissance de la couche de conversion 13.

Exemple 1 :

Selon un exemple non limitatif de mise en œuvre, la substrat initial 11 fourni à l'étape a) du procédé de fabrication est une plaquette de c-SiC, de polytype 4H, d'orientation 4.0° par rapport à l'axe $\langle 11-20 \rangle \pm 0.5^\circ$, de diamètre 150mm et d'épaisseur 350 μ m.

Une séquence classique de nettoyage de type RCA (Standard Clean 1 + Standard Clean 2), puis Caro (mélange d'acide sulfurique et d'eau oxygénée), puis HF (acide fluorhydrique), est opérée sur le substrat initial 11 préalablement à l'étape b) de croissance épitaxiale de la couche donneuse 110 en c-SiC.

La croissance est réalisée dans une chambre d'épitaxie, à une température de 1650°C, avec des précurseurs tels que le monosilane (SiH_4) et le propane (C_3H_8) ou l'éthylène (C_2H_4), générant la couche donneuse 110 en c-SiC de 30 microns d'épaisseur (vitesse de croissance : 10 microns/h). La couche donneuse présente une densité de défauts BPD de l'ordre de $1/\text{cm}^2$.

L'implantation d'ions hydrogène est opérée à une énergie de 150 keV et une dose de $6 \times 10^{16} \text{ H}^+/\text{cm}^2$, à travers la surface libre de la couche donneuse 110. Un plan fragile enterré 12 est ainsi créé à une profondeur d'environ 800 nm dans le substrat initial 11.

Une séquence de nettoyage de type RCA + Caro est opérée sur le substrat donneur 111, de manière à éliminer les potentielles contaminations sur la face libre de la couche donneuse 110.

Un dépôt DLI-CVD est effectué sur la couche donneuse 110, à une température de 850°C, avec le précurseur disilanebutane (DSB), sous une pression de 6,7kPa, pendant 7 minutes, de manière à atteindre une épaisseur d'au moins 10 microns pour le substrat support 20. Dans ces conditions, le substrat support 20 est poly-cristallin.

Un recuit à 1000°C est ensuite appliqué à l'empilement 211 pendant 50 minutes, et la séparation s'opère au niveau du plan fragile enterré 12 au cours dudit recuit.

A l'issue de cette étape e) de séparation, la structure composite 1 formée de la couche mince 10 et du substrat support 20 est séparée du reste 111' du substrat donneur.

Un polissage double face est opéré pour restaurer la rugosité de surface de la couche mince 10 et de la face arrière du substrat support 20.

Exemple 2 :

Selon un exemple non limitatif de mise en œuvre, la substrat initial 11 fourni à l'étape a) du procédé de fabrication est une plaquette de c-SiC, de polytype 4H, d'orientation 4.0° par rapport à l'axe $\langle 11-20 \rangle \pm 0.5^\circ$, de diamètre 150mm et d'épaisseur 350µm.

Une séquence classique de nettoyage de type RCA (Standard Clean 1 + Standard Clean 2), puis Caro (mélange d'acide sulfurique et d'eau oxygénée), puis HF (acide fluorhydrique), est opérée sur le substrat initial 11 préalablement à l'étape b) de croissance épitaxiale de la couche donneuse 110 en c-SiC.

La formation de la couche de conversion 13 est réalisée dans une chambre d'épitaxie. Avant le démarrage de la croissance

épitaxiale de cette couche 13 sur le substrat initial 11, un recuit sous hydrogène est réalisé dans la chambre à une température de 1700°C, pendant une durée de 10 min à 20 min. La croissance épitaxiale de la couche de conversion 13 en c-SiC est ensuite réalisée à une température de 1650°C, avec des précurseurs tels que le monosilane (SiH_4) et le propane (C_3H_8) ou l'éthylène (C_2H_4), et une vitesse de croissance d'environ 6 microns/h, pour atteindre 1 micron d'épaisseur. Le ratio C/Si issu des précurseurs gazeux est maintenu autour d'une valeur proche de 1, typiquement entre 0,95 et 1,05.

Dans la même chambre d'épitaxie, la croissance de la couche donneuse 110 en c-SiC est réalisée à une température de 1650°C, avec les mêmes précurseurs mais en ajustant le ratio C/Si autour d'une valeur de 1,2 ou sensiblement supérieure. Le débit global des précurseurs est augmenté par rapport aux débits mis en œuvre pour la croissance de la couche de conversion 13, par exemple, les débits sont doublés. Une couche donneuse 10 de 30 microns d'épaisseur est obtenue au bout d'environ 180 min (vitesse de croissance : 10 microns/h). La couche donneuse 10 présente une densité de défauts BPD de l'ordre de, voire inférieure à $1/\text{cm}^2$.

L'implantation d'ions hydrogène est opérée à une énergie de 150 keV et une dose de $6 \times 10^{16} \text{ H}^+/\text{cm}^2$, à travers la surface libre de la couche donneuse 110. Un plan fragile enterré 12 est ainsi créé à une profondeur d'environ 800 nm dans le substrat initial 11.

Une séquence de nettoyage de type RCA + Caro est appliquée au substrat donneur 111, de manière à éliminer les potentielles contaminations sur la face libre de la couche donneuse 110.

Un dépôt PECVD est effectué sur la couche donneuse 110, à une température de 800°C, dans une atmosphère $\text{SiCl}_4 / \text{CH}_4 / \text{Ar}$, avec une fréquence pour la génération du plasma de 3,3 MHz ; la pression dans l'enceinte de dépôt est ajustée de manière à

atteindre une vitesse de dépôt de l'ordre de 300 microns/h pour le substrat support 20. La vitesse de dépôt ne doit pas être trop élevée pour limiter la rugosité après dépôt de la surface libre du substrat support 20. Dans ces conditions, le substrat support 20 est poly-cristallin.

Un recuit à 1100°C est ensuite appliqué à l'empilement 211 pendant 50 min, et la séparation s'opère au niveau du plan fragile enterré 12 au cours dudit recuit.

A l'issue de cette étape e) de séparation, la structure composite 1 formée de la couche mince 10 et du substrat support 20 est séparée du reste 111' du substrat donneur.

Un polissage double face est opéré pour restaurer la rugosité de surface de la couche mince 10 et de la face arrière 20b du substrat support 20.

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