

Description

Titre de l'invention : STRUCTURE SEMI-CONDUCTRICE A BASE DE CARBURE DE SILICIUM POUR APPLICATIONS DE PUISSANCE ET PROCEDE DE FABRICATION ASSOCIE DOMAINE DE L'INVENTION

- [0001] La présente invention vise le domaine de la microélectronique et tout particulièrement de l'électronique de puissance. Elle concerne en particulier une structure comprenant une couche semi-conductrice monocristalline de haute qualité en carbure de silicium et un substrat support en carbure de silicium polycristallin, assemblés au niveau d'une zone d'interface électriquement conductrice. L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une telle structure.
- [0002] ARRIÈRE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION
- [0003] Il est habituel de former une structure semi-conductrice par report d'une couche utile semi-conductrice, de faible épaisseur et de haute qualité cristalline, sur un substrat support semi-conducteur de plus faible qualité cristalline. 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 et sur un assemblage par collage direct au niveau d'une interface de collage entre ledit substrat donneur et un substrat support ; une séparation s'opère le long d'un plan fragile enterré défini par l'implantation, menant au transfert d'une couche utile issue du substrat donneur, sur le substrat support. En plus des avantages économiques liés à la rationalisation du matériau de haute qualité de la couche utile, la structure semi-conductrice peut également procurer des propriétés avantageuses, par exemple liées à la conductivité thermique, électrique ou la compatibilité mécanique du substrat support.
- [0004] Dans le domaine de l'électronique de puissance par exemple, il est avantageux d'établir une conduction électrique entre la couche utile et le substrat support, de manière à former des composants verticaux. Par exemple, dans le cas d'une structure comprenant une couche utile en carbure de silicium (SiC) monocristallin et un substrat support en carbure de silicium (SiC) de moindre qualité (monocristallin ou polycristallin), l'interface de collage doit présenter une résistivité électrique aussi faible que possible, inférieure à $0,1 \text{ mohm.cm}^2$, voire préférentiellement inférieure à $0,01 \text{ mohm.cm}^2$.
- [0005] Certaines solutions de l'état de la technique proposent de réaliser un collage direct semi-conducteur sur semi-conducteur, entre la couche utile et le substrat support, pour établir une conduction électrique verticale. Il est néanmoins difficile d'obtenir une bonne qualité d'interface via un tel collage.

- [0006] F. Mu et al (ECS Transactions, 86 (5) 3-21, 2018) met 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, au niveau des surfaces assemblées, qui impacte défavorablement la conduction électrique verticale entre la couche mince et le substrat support. Pour pallier ce problème, un fort dopage desdites surfaces, par implantation peu profonde, est proposé en particulier dans le document EP3168862. Outre le fait que les doses d'implantation à faible profondeur ne peuvent pas indéfiniment augmenter, de fortes introductions d'atomes dopants ont tendance à endommager la qualité cristalline de la couche utile et/ou à diminuer l'énergie de collage de la structure.
- [0007] D'autres solutions de l'état de la technique proposent de réaliser un collage conducteur en partant de différentes natures de couches déposées sur les surfaces à assembler, pour éviter une implantation massive de dopants avant assemblage.
- [0008] 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 (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.cm², 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 zone d'interface.
- [0009] 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 de résistivité 20 mohm.cm, un substrat support 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 $0,1 \text{ mohm.cm}^2$, par exemple $0,032 \text{ mohm.cm}^2$ (après un recuit de la structure à 1370°C) ou $0,0076 \text{ mohm.cm}^2$ (après un recuit à très haute température, à savoir 1900°C).

[0010] OBJET DE L'INVENTION

[0011] La présente invention propose une solution répondant aux besoins évoqués de très faible résistivité (inférieure ou égale à $0,01 \text{ mohm.cm}^2$) de la zone d'interface d'une structure semi-conductrice à base de carbure de silicium, et simplifiant l'élaboration de la structure. Elle concerne une structure semi-conductrice et un procédé de fabrication d'une telle structure.

[0012] BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

[0013] La présente invention concerne une structure semi-conductrice à base de carbure de silicium comprenant :

[0014] - une couche utile en carbure de silicium monocristallin présentant une première concentration en dopants uniforme sur son épaisseur,

[0015] - un substrat support en carbure de silicium polycristallin présentant une deuxième concentration en dopants uniforme sur son épaisseur, la deuxième concentration étant liée à la première concentration par la relation suivante :

[0016] $C_2 > N_2 \times \exp(-C_1/N_1)$ avec

[0017] C_1 la première concentration, C_2 la deuxième concentration, $N_1 = 2,85.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $N_2 = 5,40.10^{20} \text{ cm}^{-3}$,

[0018] - une zone d'interface, entre le substrat support et la couche utile, comprenant des nodules et des régions de contact direct entre la couche utile et le substrat support, les nodules comprenant un matériau métallique ou semi-conducteur distinct du carbure de silicium, la zone d'interface présentant une résistivité moyenne inférieure ou égale à $0,01 \text{ mohm.cm}^2$.

[0019] Le profil de concentration en dopants selon une épaisseur de la structure semi-conductrice :

[0020] - se présente sous forme de marche, et

[0021] - est dépourvu de pic de dopage dans la zone d'interface, ou

[0022] - présente un pic de dopage dans la zone d'interface, dont l'extremum correspond à une troisième concentration en dopants égale à la deuxième concentration en dopants à plus ou moins 10%.

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

- la résistivité du substrat support est inférieure ou égale à 10 mohm.cm , à 5 mohm.cm , voire à 3 mohm.cm , voire encore à 2 mohm.cm ;
- la zone d'interface présente une épaisseur inférieure ou égale à 200 nm ;

- le matériau métallique des nodules est choisi parmi le tungstène, le titane, le nickel, l'aluminium, le molybdène, le niobium, le tantale, le cobalt et le cuivre, ou le matériau semi-conducteur des nodules est choisi parmi le silicium, le germanium, le carbone, des composés III-V tels que le nitrure de gallium ou autres composés formés à partir de ces matériaux.
- [0024] L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une structure semi-conductrice à base de carbure de silicium comprenant les étapes suivantes :
- [0025] a) la fourniture d'une couche utile en carbure de silicium monocristallin présentant une face libre à assembler et une première concentration en dopants uniforme sur son épaisseur,
- [0026] b) la fourniture d'un substrat support en carbure de silicium polycristallin présentant une face libre à assembler, une deuxième concentration en dopants uniforme sur son épaisseur, la deuxième concentration étant liée à la première concentration par la relation suivante :
- [0027] $C_2 > N_2 \times \exp(-C_1/N_1)$ avec
- [0028] C_1 la première concentration, C_2 la deuxième concentration, $N_1 = 2,85.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $N_2 = 5,40.10^{20} \text{ cm}^{-3}$,
- [0029] c) le dépôt d'un film en un matériau métallique ou semi-conducteur distinct du carbure de silicium présentant une épaisseur inférieure ou égale à 20 nm, sur la face libre à assembler de la couche utile et/ou sur la face libre à assembler du substrat support,
- [0030] d) la formation d'une structure intermédiaire, comprenant un assemblage direct des faces libres à assembler respectivement de la couche utile et du substrat support, la structure intermédiaire incluant un film encapsulé issu du ou des film(s) déposés lors de l'étape c),
- [0031] e) le recuit de la structure intermédiaire à une température comprise entre 1200°C et 2000°C, pour former la structure semi-conductrice comprenant une zone d'interface qui inclut des nodules issus de la segmentation du film encapsulé et des régions de contact direct entre la couche mince et le substrat support.
- [0032] La zone d'interface présente une résistivité moyenne inférieure ou égale à 0,01 mohm.cm² ; le profil de concentration en dopants selon une épaisseur de la structure semi-conductrice se présente sous forme de marche, et est dépourvu de pic de dopage dans la zone d'interface ou présente un pic de dopage dans la zone d'interface, dont l'extremum correspond à une troisième concentration en dopants égale à la deuxième concentration en dopants à plus ou moins 10%.
- [0033] Selon des caractéristiques avantageuses de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison réalisable :

- l'étape a) comprend une implantation d'espèces légères dans un substrat donneur en carbure de silicium monocristallin, pour former un plan fragile enterré qui délimite, avec une face avant du substrat donneur, la couche utile ;
- l'étape d) comprend, après l'assemblage direct donnant lieu à un ensemble collé comprenant le substrat donneur et le substrat support, une séparation au niveau du plan fragile enterré, pour former d'une part la structure intermédiaire comprenant la couche utile, le film encapsulé et le substrat support, et d'autre part, le reste du substrat donneur ;
- avant l'étape c), la face libre à assembler de la couche mince présente une surface monocristalline, dépourvue de zones amorphisées ou détériorées par un dopage ou une activation par bombardement, et la face libre à assembler du substrat support présente une surface polycristalline, dépourvue de zones amorphisées ou modifiées par un dopage ou une activation par bombardement ;
- le procédé comprend une étape de croissance épitaxiale d'une couche supplémentaire en carbure de silicium monocristallin sur la couche utile de la structure semi-conductrice.

Brève description des dessins

- [0034] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquelles :
- [0035] [Fig.1] La [Fig.1] présente une structure semi-conductrice conforme à la présente invention ;
- [0036] [Fig.2a]
- [0037] [Fig.2b]
- [0038] [Fig.2c]
- [0039] [Fig.2d]
- [0040] [Fig.2e] Les figures 2a à 2e présentent des étapes d'un procédé de fabrication conforme à la présente invention ;
- [0041] [Fig.3a]
- [0042] [Fig.3b]
- [0043] [Fig.3c]
- [0044] [Fig.3d] Les figures 3a à 3d présentent des étapes d'un procédé de fabrication conforme à la présente invention ;
- [0045] [Fig.4] La [Fig.4] présente un profil de concentration en dopants (A) selon l'épaisseur d'une structure semi-conductrice conforme à la présente invention, parmi d'autres profils de concentration en dopants (B, C, D) de structures de l'état de la technique

- [0046] [Fig.5] La [Fig.5] présente une courbe traduisant la relation liant la deuxième concentration C_2 à la première concentration C_1 , de manière à obtenir une résistivité moyenne de la zone d'interface (notée ρ_{int} sur la figure), inférieure ou égale à 0,01 mohm.cm² ; la première concentration C_1 et la deuxième concentration C_2 étant respectivement la concentration en dopants de la couche utile en carbure de silicium monocristallin et la concentration en dopants du substrat support dans une structure semi-conductrice conforme à l'invention.
- [0047] 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. Les mêmes références sur les figures pourront être utilisées pour des éléments de même nature.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

- [0048] L'invention concerne une structure semi-conductrice 100 comprenant une couche utile 10 en carbure de silicium monocristallin, typiquement de polytype 4H, un substrat support 30 en carbure de silicium polycristallin, typiquement de polytype 3C, et une zone d'interface 20 entre la couche utile 10 et le substrat support 30 ([Fig.1]). Comme la couche utile 10, la zone d'interface 20 s'étend parallèlement au plan principal (x,y).
- [0049] Avantagusement, et comme cela est habituellement le cas dans le domaine de la microélectronique, la structure semi-conductrice 100 se présente sous la forme d'une plaquette circulaire de diamètre compris entre 100 mm et 450 mm. On comprend que, dans ce cas, le substrat support 30 et la couche utile 10 présentent également une telle forme circulaire. Les faces (circulaires) avant 100a et arrière 100b de la plaquette s'étendent parallèlement au plan principal (x,y).
- [0050] La structure semi-conductrice 100 présente une épaisseur totale typiquement comprise entre 300 microns et 1000 microns. L'épaisseur du substrat support 30 forme la majeure partie de cette épaisseur totale, la couche utile 10 présentant une épaisseur typiquement inférieure à quelques microns, voire inférieure à 1 μm .
- [0051] Selon l'invention, le substrat support 30 présente une concentration en dopants (appelée deuxième concentration C_2 par la suite), uniforme sur son épaisseur. Par uniforme, on entend une concentration en dopants constante sur l'épaisseur à +/- 10% près. Pour un dopage de type N, des atomes d'azote, de phosphore ou d'arsenic seront présents dans la matrice polycristalline du substrat support 30, alors que ce seront des atomes de bore ou d'aluminium pour un dopage de type P.
- [0052] Avantagusement, la résistivité du substrat support 30 est inférieure ou égale à 10 mohm.cm (soit une concentration en dopants typiquement supérieure ou égale à $1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$), à 5 mohm.cm (soit une concentration en dopants typiquement supérieure

ou égale à $2.10^{20} \text{ cm}^{-3}$), voire à 3 mohm.cm, voire encore à 2 mohm.cm (soit une concentration en dopants supérieure ou égale à $4.10^{20} \text{ cm}^{-3}$).

- [0053] La couche utile 10 présente également une concentration en dopants (dite première concentration C_1) uniforme sur son épaisseur (à +/- 10% près). Le type de dopage de la couche utile 10 est habituellement le même que celui du substrat support 30.
- [0054] En outre, la deuxième concentration C_2 est liée à la première concentration C_1 par la relation suivante : $C_2 > N_2 \times \exp(-C_1/N_1)$ avec $N_1 = 2,85.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $N_2 = 5,40.10^{20} \text{ cm}^{-3}$, comme illustré sur la [Fig.5]. Notons que cette courbe est définie pour une couche utile 10 monocristalline en 4H-SiC, dopée de type N et un substrat support 30 polycristallin en 3C-SiC, dopé de type N.
- [0055] Le domaine des première C_1 et C_2 deuxième concentrations selon l'invention se situe donc au-dessus de la courbe de la [Fig.5], ladite courbe traduisant une résistivité moyenne ρ_{int} de la zone d'interface 20 égale à $0,01 \text{ mohm.cm}^2$, et inférieure à cette valeur lorsqu'on se déplace au-dessus de la courbe.
- [0056] Une large gamme de résistivité peut ainsi être utilisée pour la couche utile 10, dans la structure semi-conductrice 100 conforme à l'invention : une résistivité par exemple comprise entre quelques ohms et 10 mohm.cm (soit typiquement une première concentration C_1 en dopants comprise entre quelques $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$) pourra être mise en œuvre. En choisissant la deuxième concentration C_2 du substrat support 30 dans le domaine défini (au-dessus de la courbe ρ_{int}), une excellente conduction électrique entre la couche utile 10 et la substrat support 30 sera obtenue via la zone d'interface 20.
- [0057] La zone d'interface 20 comprend des nodules 21 et des régions de contact direct 22 entre la couche utile 10 et le substrat support 30. Les nodules 21 sont composés d'un matériau métallique ou semi-conducteur distinct du carbure de silicium. Sans que cela soit limitatif, le matériau métallique des nodules 21 pourra être choisi parmi le tungstène, le titane, le nickel, l'aluminium, le molybdène, le niobium, le tantale, le cobalt et le cuivre ; le matériau semi-conducteur des nodules 21 pourra être choisi parmi le silicium, le germanium, le carbone, les composés III-V tels que le nitrure de gallium, ou autres composés formés à partir de ces matériaux (SiGe, SiGeC, etc).
- [0058] La zone d'interface 20 présente une épaisseur, selon un axe z normal au plan principal (x,y), typiquement inférieure ou égale à 200 nm, voire inférieure ou égale à 100 nm. Son épaisseur maximale est en particulier définie par l'épaisseur maximale des nodules 21. Les nodules 21, répartis dans la zone d'interface 20, sont disjoints ou accolés ; les nodules disjoints sont majoritairement séparés les uns des autres par les régions de contact direct 22 dans lesquelles la couche utile 10 est directement en contact avec le substrat support 30, autrement dit, dans lesquelles il y a une liaison

directe entre le carbure de silicium monocristallin de la couche utile 10 et le carbure de silicium polycristallin du substrat support 30.

- [0059] En se plaçant dans un plan médian P de la zone d'interface 20, le taux de recouvrement des régions de contact direct 22 est typiquement compris entre 30% et 80%.
- [0060] Il peut éventuellement exister, dans certains cas de structure semi-conductrice 100, des cavités d'épaisseur nanométrique dans ces régions de contact direct 22, mais lesdites cavités occupent typiquement moins de 10%, voire moins de 5% de la surface selon le plan principal (x,y) occupée par les régions de contact direct 22. Leur épaisseur est par ailleurs inférieure à celle des nodules 21.
- [0061] Selon la présente invention, la zone d'interface 20 présente une résistivité moyenne inférieure ou égale à $0,01 \text{ mohm.cm}^2$. On parle ici d'une résistivité « surfacique » en ohm.cm^2 pour la zone d'interface 20 du fait de sa très faible épaisseur. On entend par résistivité moyenne, la résistivité de la zone d'interface 20 dans son ensemble, c'est-à-dire en intégrant ses différentes régions, à savoir les régions de contact direct 22, les nodules 21 et les cavités (si elles sont présentes). En effet, la résistivité de la zone d'interface 20 est obtenue à partir d'une mesure de I(V) (courant en fonction de la tension) faite au niveau de deux électrodes formées sur la structure 100, entre lesquelles le chemin de courant passe par la zone d'interface 20, du fait de la présence de tranchées 40 traversant ladite zone 20, entre lesdites électrodes. Il est bien entendu tenu compte des contributions résistives des autres couches et interfaces impliquées dans le chemin de courant.
- [0062] Comme cela ressort de la [Fig.4], un profil de concentration en dopants A, selon une épaisseur de la structure semi-conductrice 100, se présente sous forme de marche, entre la couche utile 10 et le substrat support 30. En d'autres termes, partant de la face libre de la couche utile 10, traversant la zone d'interface 20 et pénétrant dans le substrat support 30 jusqu'à une profondeur supérieure à $1 \mu\text{m}$ (parallèlement à l'axe z), le profil de concentration en dopants définit une marche nette entre la couche mince 10, moins dopée que le substrat support 30, et ce dernier dont le niveau de dopage est plus important (en particulier, de l'ordre $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour la première concentration C_1 et de l'ordre de $5.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ pour la deuxième concentration C_2 , dans l'exemple de la [Fig.4]). Il n'existe pas de profil de diffusion de dopants venant augmenter ou modifier le niveau de dopage uniforme de la couche mince 10 à proximité de la zone d'interface 20.
- [0063] De plus, la zone d'interface 20 présente un niveau moyen de dopage, identique à ou très proche de celui du substrat support 30. La zone d'interface 20 est dépourvue de pic de dopage associé à une introduction extrinsèque de dopants du côté de la couche utile

10 ou du substrat support 30 (par exemple par implantation) ; ladite zone d'interface 20 présente une concentration en dopants identique à plus ou moins 10% à la deuxième concentration.

- [0064] Éventuellement, la zone d'interface 20 peut présenter un pic de dopage, mais dont l'extremum correspond à une concentration en dopants (dite troisième concentration) faiblement supérieure ou inférieure à la deuxième concentration : la troisième concentration en dopants est égale à la deuxième concentration C_2 en dopants à plus ou moins 10%. Ce pic de dopage est donc également très inférieur à un pic associé à une introduction extrinsèque de dopants comme cela est visible sur les profils B, C et D de la [Fig.4], issues de structures de l'état de la technique.
- [0065] La structure semi-conductrice 100 garantit ainsi une excellente conductivité électrique entre la couche utile 10 et le substrat support 30, via sa zone d'interface 20. En particulier, les régions de contact direct 22 bénéficient d'une forte concentration en dopants, similaire à celle du substrat support 30, du fait de la diffusion et du piégeage des dopants du substrat support 30 à l'interface entre couche utile 10 et substrat support 30. Les nodules 21 peuvent également participer à la conduction électrique verticale ; la présence d'une grande quantité de dopants à l'interface entre les nodules 21 et le substrat support 30 très fortement dopé est favorable à cette conduction électrique.
- [0066] La zone d'interface 20, avec une résistivité inférieure ou égale à 0,01 mohm.cm², peut être considérée comme « transparente » dans la structure semi-conductrice 100, n'apportant aucune augmentation parasite de résistance dans la conduction électrique verticale.
- [0067] Outre son excellente conduction électrique, la zone d'interface 20 assure une continuité physique entre la couche utile 10 et le substrat support 30, et procure une excellente tenue mécanique de la structure semi-conductrice 100. La qualité de la couche utile 10 n'est donc pas affectée par d'éventuels trous ou défauts d'interface ; notons que les cavités précitées, lorsqu'elles sont présentes, ont des dimensions et une densité qui n'impactent pas négativement la qualité et la tenue mécanique de la couche utile 10.
- [0068] Des composants de puissance peuvent être élaborés sur et/ou dans la couche utile 10 d'une structure semi-conductrice 100 selon l'invention. Il n'est pas requis d'amincir le substrat support 30 à des épaisseurs inférieures à 200 µm, voire inférieures à 150 µm, car le fort dopage du substrat support 30 assure une excellente conductivité électrique verticale. Il est habituellement nécessaire d'épaissir la couche utile 10, par exemple en formant une couche supplémentaire par épitaxie, pour élaborer les composants de puissance.

- [0069] Ces composants peuvent notamment comprendre au moins un contact électrique sur et/ou dans le substrat support 30, au niveau d'une face arrière 100b de la structure semi-conductrice 100. A titre d'exemples non limitatifs, ces composants de puissance pourront comprendre des transistors, des diodes, des thyristors ou des composants passifs (capacités, inductances...), etc.
- [0070] L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une structure semi-conductrice 100 telle que précédemment décrite.
- [0071] Le procédé de fabrication comprend en premier lieu une étape a) de fourniture de la couche utile 10 en carbure de silicium monocristallin ([Fig.2a]). A cette étape a), la couche utile 10 présente une face libre 10a destinée à être assemblée lors d'une étape ultérieure du procédé, également appelée face avant 10a ; elle présente également une face arrière 10b opposée à sa face avant 10a. La couche mince 10 présente une concentration en dopants (première concentration C_1) uniforme sur son épaisseur. Comme évoqué précédemment, une résistivité par exemple comprise entre quelques ohms et 10 mohm.cm (soit une première concentration C_1 en dopants comprise entre quelques $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$) pourra être mise en œuvre.
- [0072] Selon un mode de mise en œuvre avantageux, la couche utile 10 est issue du transfert d'une couche superficielle d'un substrat donneur 1, en particulier un transfert de couche basé sur le procédé Smart Cut™.
- [0073] L'étape a) peut ainsi comprendre une implantation d'espèces légères, par exemple hydrogène, hélium ou une combinaison de ces deux espèces, dans un substrat donneur 1 (typiquement 4H-SiC), pour former un plan fragile enterré 11 qui délimite, avec la face avant 10a du substrat donneur 1, la couche utile 10 ([Fig.3a]).
- [0074] Selon une variante de ce mode de mise en œuvre, l'étape a) comprend la formation du substrat donneur 1 par épitaxie d'une couche donneuse 1' sur un substrat initial, préalablement à l'implantation des espèces légères ([Fig.3b]). Cette variante permet de former une couche donneuse 1' présentant les caractéristiques structurales et électriques requises pour l'application visée. En particulier, une excellente qualité cristalline peut être obtenue par épitaxie, et un dopage in situ de la couche donneuse 1' peut être précisément contrôlé. L'implantation d'espèces légères pour former le plan fragile enterré 11 est ensuite réalisée dans la couche donneuse 1'.
- [0075] Alternativement, la couche utile 10 fournie à l'étape a) peut bien sûr être formée à partir d'autres techniques de transfert de couches minces connues.
- [0076] Le procédé de fabrication selon l'invention comprend ensuite une étape b) de fourniture d'un substrat support 30 en carbure de silicium polycristallin (typiquement 3C-SiC) ([Fig.2b]). Le substrat support 30 présente une face libre 30a destinée à être

assemblée lors d'une étape ultérieure du procédé, également appelée face avant 30a ; il présente également une face arrière 30b.

- [0077] Selon l'invention, la concentration en dopants (deuxième concentration C_2) du substrat support 30 est uniforme sur son épaisseur et est liée à la première concentration C_1 par la relation suivante :
- [0078] $C_2 > N_2 \times \exp(-C_1/N_1)$ avec $N_1 = 2,85.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $N_2 = 5,40.10^{20} \text{ cm}^{-3}$, en particulier dans le cas d'un dopage de type N pour la couche utile 10 et pour le substrat support 30.
- [0079] Avantagusement, la résistivité du substrat support 30 est inférieure ou égale à 10 mohm.cm, voire à 5 mohm.cm, à 3 mohm.cm ou encore à 2 mohm.cm.
- [0080] Le procédé de fabrication comprend ensuite une étape c) de dépôt d'un film 2 en un matériau métallique ou semi-conducteur distinct du carbure de silicium, sur la face libre à assembler 10a de la couche utile 10 ou sur la face libre à assembler 30a du substrat support 30 ou encore, comme cela est illustré sur la [Fig.2c] sur les deux faces libres à assembler 10a,30a.
- [0081] Notons que la face libre 10a de la couche utile 10 présente une surface parfaitement monocristalline ; aucun dopage par implantation ni aucune activation par bombardement n'est venue détériorer ou amorphiser sa qualité cristalline. De même, la face libre 30a du substrat support 30 présente une surface polycristalline, non modifiée ou amorphisée par un quelconque dopage par implantation ou une activation par bombardement atomique.
- [0082] Le matériau métallique pourra être choisi parmi la liste de matériaux non limitative suivante : tungstène, titane, nickel, aluminium, molybdène, niobium, tantale, cobalt, cuivre ; le matériau semi-conducteur pourra être choisi parmi la liste non limitative suivante : silicium, germanium, carbone, composés III-V tels que le nitrure de gallium, ou autres composés formés à partir de ces matériaux (SiGe, SiGeC, etc.).
- [0083] Le film 2 présente une épaisseur inférieure ou égale à 20 nm, préférentiellement inférieure ou égale à 10 nm, voire inférieure ou égale à 5 nm. Par exemple, le film 2 déposé pourra présenter une épaisseur de l'ordre de 0,5 nm, 1 nm, 2 nm, 3 nm, 4 nm, 5 nm, 8 nm, 10 nm ou 15 nm.
- [0084] Notons que lorsque qu'un film 2 est déposé sur les deux faces libres 10a,30a, l'épaisseur totale déposée, c'est-à-dire la somme des épaisseurs de film 2 déposées sur l'une et l'autre faces libres 10a,30a est préférentiellement inférieure ou égale à 20 nm, voire inférieure ou égale à 10 nm. L'épaisseur totale de film 2 déposée est impérativement maintenue faible, de manière à autoriser une segmentation du film sous forme de nodules 21, à une étape ultérieure du procédé.

- [0085] Le dépôt du film 2 est opéré sous atmosphère contrôlée non oxydante. Il est important que le film 2 ne subisse pas d'oxydation ou ne soit pas dégradé par des pollutions issues de l'atmosphère environnante. Typiquement, le dépôt de l'étape c) est effectué sous un vide poussé, de l'ordre de 10^{-6} Pa ou moins.
- [0086] Selon la nature du film 2 déposé, l'étape c) est réalisée à température ambiante ou à faible température, avantageusement par une technique de dépôt par pulvérisation utilisant, pour bombarder la cible métallique, un élément neutre ou dont la présence résiduelle dans le métal déposé n'est pas gênante (Ar, Si, N...).
- [0087] Selon un mode de mise en œuvre particulier, le procédé de fabrication selon l'invention comprend, préalablement à l'étape c) de dépôt, une étape c') de désoxydation de la face libre à assembler 10a de la couche utile 10 et/ou de la face libre à assembler 30a du substrat support 30. Une telle étape permet de retirer le potentiel oxyde natif présent en surface de la couche utile 10 et/ou du substrat support 30. La désoxydation peut être faite par traitement chimique humide (retrait par attaque HF par exemple) ou sec (gravure sèche ou recuit sous atmosphère réductrice).
- [0088] Le procédé de fabrication comprend ensuite une étape d) de formation d'une structure intermédiaire 150, laquelle étape comprend un assemblage direct des faces libres à assembler 10a, 30a respectivement de la couche utile 10 et du substrat support 30, au niveau d'une interface d'assemblage 15 ([Fig.2d]).
- [0089] Cet assemblage direct est préférentiellement effectué par collage par adhésion moléculaire, consistant en la mise en contact des faces à assembler 10a,30a, sous atmosphère contrôlée non oxydante. Il pourra s'agir d'un collage direct entre la couche utile 10 et le film 2, lorsque ce dernier a été uniquement déposé sur le substrat support 30, ou d'un collage direct entre le substrat support 30 et le film 2, lorsque ce dernier a été uniquement déposé sur la couche utile 10, ou encore d'un collage direct entre deux films 2, lorsqu'ils ont été déposés sur la couche utile 10 et sur le substrat support 30.
- [0090] L'assemblage direct est préférentiellement opéré sous un vide poussé, de l'ordre de 10^{-6} Pa ou moins.
- [0091] 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 2 et le collage direct, en maintenant une atmosphère contrôlée.
- [0092] En référence au mode de mise en œuvre avantageux illustré sur les figures 3a à 3d, l'étape d) comprenant l'assemblage direct de la face libre à assembler 10a de la couche utile 10 sur la face libre à assembler 30a du substrat support 30, donne lieu

à un ensemble collé 200 incluant le substrat donneur 1, le substrat support 30, et l'interface d'assemblage 15 ([Fig.3c]). L'étape d) comprend en outre une séparation au niveau du plan fragile enterré 11, pour former d'une part la structure intermédiaire 150 comprenant la couche utile 10, le (ou les) film(s) 2 et le substrat support 30, et d'autre part, le reste du substrat donneur 1'' ([Fig.3d]). Une telle séparation peut s'effectuer au cours d'un traitement thermique 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 CutTM.

- [0093] Des séquences de nettoyage, de lissage, de polissage ou de gravure de la face séparée 10b de la couche utile 10 et/ou de la face séparée 1''a du reste du substrat donneur 1'' pourront être opérées de manière à restaurer une bonne qualité de surface, notamment en termes de rugosité, défektivité et autres contaminations.
- [0094] Quel que soit le mode de mise en œuvre du procédé, à l'issue de l'étape d), la structure intermédiaire 150 présente une face avant 10b du côté de la couche utile 10, une face arrière 30b du côté du substrat support 30, et un film encapsulé 2' entre la couche utile 10 et le substrat support 30. Notons que le film encapsulé 2' correspond au film 2 lorsque celui-ci n'a été déposé que sur l'une des faces libres à assembler 10a, 30a, ou correspond aux deux films 2 déposés respectivement sur la couche utile 10 et sur le substrat support 30.
- [0095] Le procédé de fabrication selon l'invention comprend ensuite une étape e) de recuit de la structure intermédiaire 150 à une température comprise entre à 1200°C et 2000°C, préférentiellement autour de 1700°C, de manière à provoquer la segmentation du film encapsulé 2' sous forme de nodules 21 et la diffusion des dopants du substrat support 30 (très fortement dopé) dans les régions de contact direct 22 et éventuellement dans les nodules 21. L'étape e) aboutit à la formation de la structure semi-conductrice 100 avec sa zone d'interface 20 entre le substrat support 30 et la couche utile 10, ladite zone d'interface 20 incluant lesdits nodules 21 et lesdites régions de contact direct 22 ([Fig.2e]).
- [0096] La température du recuit de l'étape e) est choisie de telle sorte que le système, incluant le film encapsulé 2' et les surfaces semi-conductrices de la couche utile 10 et du substrat support 30 en contact avec ledit film 2', va optimiser son énergie de surface en agglomérant le film encapsulé 2' sous forme de nodules 21 et en créant des régions de contact direct 22 entre les surfaces semi-conductrices respectivement de la couche utile 10 et du substrat support 30. Cette température est également définie pour permettre la fermeture d'une interface de collage dans les régions de contact direct 22, entre le carbure de silicium monocristallin de la couche utile 10 et le carbure de

silicium polycristallin du substrat support 30. De surcroît, la température de recuit est apte à faire diffuser les dopants du substrat support 30 dans les régions de contact direct 22 et potentiellement dans les nodules 21 (en particulier lorsque ceux-ci sont en matériau semiconducteur).

- [0097] Compte tenu du gradient abrupt de concentration en dopants entre la couche utile 10 et le substrat support 30 (qui découle de la relation liant les première C_1 et deuxième C_2 concentrations, illustrée sur la courbe de la [Fig.5]), les dopants diffusent très efficacement en direction de la couche utile 10 et un phénomène de ségrégation s'opère aux interfaces présentes dans la zone d'interface 20, à savoir l'interface entre le SiC monocristallin et le SiC polycristallin, au niveau de chaque région de contact direct 22, et l'interface entre le matériau des nodules 21 et le SiC polycristallin. La quantité de dopants capables de ségréger à ces interfaces est bien supérieure à la quantité de dopants susceptibles de diffuser dans la couche utile (liée à la solubilité du dopant dans le SiC monocristallin). Notamment, l'interface entre mono-SiC et poly-SiC dans les régions de contact direct 22 peut être considérée comme un joint de grain très étendu sur lequel se concentrent les dopants, préférentiellement au volume du SiC. Cette interface présentant une certaine rugosité (liée notamment à la présence des grains de poly-SiC), on voit une répartition des dopants sur une épaisseur pouvant aller jusqu'à 5 nm de part et d'autre de l'interface mono-SiC / poly-SiC.
- [0098] Le matériau composant les nodules 21 peut également présenter une solubilité des dopants supérieure à leur solubilité dans le SiC ; c'est par exemple le cas lorsque le matériau est le silicium, pour des températures supérieures à sa température de fusion.
- [0099] Un profil de concentration en dopants selon une épaisseur de la structure semi-conductrice 100 peut être mesuré par une technique connue, par exemple par SIMS (spectrométrie de masse des ions secondaires). Le point de mesure, dans le plan de la zone d'interface 20, est suffisamment étendu pour intégrer et moyenniser la mesure de profil sur les différents éléments constituant la zone d'interface 20 (à savoir, principalement les nodules 21 et les régions de contact direct 22).
- [0100] Le profil de concentration en dopants de la structure semi-conductrice 100 se présente sous la forme d'une marche abrupte, dont la transition coïncide avec la zone d'interface 20. Le caractère abrupt traduit le fait qu'il n'y a pas de diffusion de dopants significative depuis le substrat support 30 dans la couche utile 10, ce qui est très avantageux en termes de propriétés et stabilité de ladite couche 10. Le profil est en outre dépourvu de pic de dopage dans la zone d'interface 20 ou présente un pic de dopage dans la zone d'interface 20, dont l'extremum correspond à une troisième concentration en dopants, égale à la deuxième concentration en dopants à plus ou moins 10%.

- [0101] Les régions de contact direct 22 se retrouvent dopées à un niveau similaire à celui du substrat support 30 et présentent une résistivité inférieure ou égale à $0,01 \text{ mohm.cm}^2$, conférant globalement à la zone d'interface une résistivité moyenne similaire.
- [0102] Le procédé de fabrication tel que décrit permet donc d'obtenir une structure semi-conductrice 100 procurant une excellente conduction électrique verticale entre la couche utile 10 et le substrat support 30, via une zone d'interface 20 principalement composées de nodules 21 et de régions de contact direct 22. La diffusion des dopants du substrat support 30 (du fait du fort gradient de concentrations de dopants entre la couche utile 10 et le substrat support 30) et leur ségrégation au niveau des différentes interfaces de la zone d'interface 20 confèrent à cette dernière une très faible résistivité.
- [0103] Exemple de mise en œuvre :
- [0104] Le substrat donneur 1 est en SiC 4H, monocristallin de haute qualité et présente un diamètre de 150 mm. Le substrat donneur 1 est dopé N, avec une résistivité de l'ordre de 20 mohm.cm (première concentration en dopants $C_1 : 4.10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Il est implanté à travers sa face avant 1a, face de type « C », avec des ions hydrogène à une dose de $5.10^{16} \text{ cm}^{-2}$ et une énergie de 95 keV. Autour de la profondeur d'implantation, un plan fragile enterré 11 est ainsi défini, délimitant avec la face avant 10a du substrat donneur 1, la couche utile 10.
- [0105] Le substrat support 30 est en SiC 3C polycristallin, de même diamètre que le substrat donneur 1. Il est dopé N, avec une résistivité de l'ordre de 3 mohm.cm (soit une deuxième concentration en dopants C_2 de $5.10^{20} \text{ cm}^{-3}$).
- [0106] Les deux substrats 1,30 subissent des séquences de nettoyage pour éliminer les particules et autres contaminations de surface. Les séquences sont préférentiellement choisies de sorte que les surfaces des substrats 1,30 ne subissent pas d'oxydation (absence d'oxyde natif).
- [0107] Les substrats 1,30 sont introduits dans une première chambre de dépôt, intégrée à un équipement de collage direct. Un film 2 de silicium d'une épaisseur de 10 nm est déposé sur chacune des faces avant 10a,30a (faces libres à assembler) des substrats 1,30, sous vide, à 10^{-6} Pa et température ambiante, par pulvérisation. Les substrats 1,30 sont ensuite introduits dans une seconde chambre de collage, pour être assemblés au niveau de leurs faces avant 10a,30a, en mettant en contact direct les films 2 déposés respectivement sur le substrat donneur 1 et sur le substrat support 30. L'atmosphère dans la chambre de collage est la même que celle dans la chambre de dépôt, ce qui évite toute oxydation ou passivation de la surface des films 2.
- [0108] Après assemblage, l'ensemble collé 200 comprend le substrat donneur 1 lié au substrat support 30 via une interface de collage 15, et le film encapsulé 2' formé des

deux films 2 déposés et enterré entre les deux substrats 1,30. Le film encapsulé 2' présente une épaisseur de l'ordre de 20 nm.

- [0109] L'ensemble collé 200 est soumis à un traitement thermique pour provoquer la séparation au niveau du plan fragile enterré 11, à une température comprise entre 800°C et 1000°C pendant quelques minutes à quelques heures. On obtient alors la structure intermédiaire 150 incluant une couche utile 10 présentant une épaisseur de 500 nm, disposée sur le film encapsulé 2', lui-même disposé sur le substrat support 30. Des séquences de nettoyage et de polissage sont appliquées de manière à restaurer le bon niveau de défektivité et de rugosité à la surface 10b de la couche utile 10.
- [0110] Enfin, un recuit à 1700°C pendant 30 min est appliqué à la structure intermédiaire 150, préalablement munie d'une couche de protection sur sa face avant 10b (également face libre 10b de la couche utile 10 dans la structure intermédiaire 150). A l'issue de ce recuit, on obtient la structure 100 selon l'invention : la zone d'interface 20 formée de nodules 21 en silicium et de régions de contact direct 22, entre couche utile 10 et substrat support 30, confère à la structure 100 une excellente conductivité électrique verticale (résistivité moyenne de la zone d'interface de l'ordre de 0,01 mohm.cm²) du fait de la ségrégation de dopants du substrat support 30 aux différentes interfaces de la zone d'interface 20.
- [0111] Les nodules 21 dans cette structure 100 présentent une épaisseur de l'ordre de 200 nm et un diamètre moyen de l'ordre de 100 nm à 1 µm. Le taux de recouvrement des régions de contact direct 22, dans un plan médian de la zone d'interface 20 est de l'ordre de 80%. Le profil de concentration en dopants selon l'épaisseur de la structure semi-conductrice 100 se présente sous forme d'une marche abrupte, sans modification significative du profil de concentration uniforme de la couche utile 10.
- [0112] 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 semi-conductrice (100) à base de carbure de silicium comprenant :
- une couche utile (10) en carbure de silicium monocristallin présentant une première concentration (C_1) en dopants uniforme sur son épaisseur,
 - un substrat support (30) en carbure de silicium polycristallin présentant une deuxième concentration (C_2) en dopants uniforme sur son épaisseur, la deuxième concentration (C_2) étant liée à la première concentration (C_1) par la relation suivante : $C_2 > N_2 \times \exp(-C_1/N_1)$ avec $N_1 = 2,85 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $N_2 = 5,40 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,
 - une zone d'interface (20), entre le substrat support (30) et la couche utile (10), comprenant des nodules (21) et des régions de contact direct (22) entre la couche utile (10) et le substrat support (30), les nodules (21) comprenant un matériau métallique ou semi-conducteur distinct du carbure de silicium, la zone d'interface (20) présentant une résistivité moyenne inférieure ou égale à $0,01 \text{ mohm.cm}^2$, un profil de concentration en dopants selon une épaisseur de la structure semi-conductrice (100) :
 - se présentant sous forme de marche, et
 - étant dépourvu de pic de dopage dans la zone d'interface (20), ou
 - présentant un pic de dopage dans la zone d'interface (20), dont l'extremum correspond à une troisième concentration en dopants égale à la deuxième concentration en dopants à plus ou moins 10%.
- [Revendication 2] Structure semi-conductrice (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la résistivité du substrat support est inférieure ou égale à 10 mohm.cm , à 5 mohm.cm , voire à 3 mohm.cm , voire encore à 2 mohm.cm .
- [Revendication 3] Structure semi-conductrice (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la zone d'interface présente une épaisseur inférieure ou égale à 200 nm .
- [Revendication 4] Structure semi-conductrice (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle :
 - le matériau métallique des nodules (21) est choisi parmi le tungstène, le titane, le nickel, l'aluminium, le molybdène, le niobium, le tantale, le cobalt et le cuivre, ou

- le matériau semi-conducteur des nodules (21) est choisi parmi le silicium, le germanium, le carbone, des composés III-V tels que le nitrure de gallium ou autres composés formés à partir de ces matériaux.

[Revendication 5]

Procédé de fabrication d'une structure semi-conductrice (100) à base de carbure de silicium comprenant les étapes suivantes :

- a) la fourniture d'une couche utile (10) en carbure de silicium monocristallin présentant une face libre à assembler et une première concentration en dopants (C_1) uniforme sur son épaisseur,
 - b) la fourniture d'un substrat support (30) en carbure de silicium polycristallin présentant une face libre à assembler, une deuxième concentration en dopants (C_2) uniforme sur son épaisseur, la deuxième concentration (C_2) étant liée à la première concentration (C_1) par la relation suivante : $C_2 > N_2 \times \exp(-C_1/N_1)$ avec $N_1 = 2,85 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $N_2 = 5,40 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,
 - c) le dépôt d'un film (2) en un matériau métallique ou semi-conducteur distinct du carbure de silicium présentant une épaisseur inférieure ou égale à 20 nm, sur la face libre à assembler de la couche utile (10) et/ou sur la face libre à assembler du substrat support (30),
 - d) la formation d'une structure intermédiaire (150), comprenant un assemblage direct des faces libres à assembler respectivement de la couche utile (10) et du substrat support (30), la structure intermédiaire (150) incluant un film encapsulé (2') issu du ou des film(s) (2) déposés lors de l'étape c),
 - e) le recuit de la structure intermédiaire (150) à une température comprise entre à 1200°C et 2000°C, pour former la structure semi-conductrice (100) comprenant une zone d'interface (20) qui inclut des nodules (21) issus de la segmentation du film encapsulé (2') et des régions de contact direct (22) entre la couche mince (10) et le substrat support (30),
- la zone d'interface (20) présentant une résistivité moyenne inférieure ou égale à 0,01 mohm.cm²,
- un profil de concentration en dopants selon une épaisseur de la structure semi-conductrice (100) se présentant sous forme de marche, et étant dépourvu de pic de dopage dans la zone d'interface (20) ou présentant un pic de dopage dans la zone d'interface (20), dont l'extremum correspond à une troisième concentration en dopants

- égale à la deuxième concentration en dopants (C_2) à plus ou moins 10%.
- [Revendication 6] Procédé de fabrication selon la revendication 5, dans lequel l'étape a) comprend une implantation d'espèces légères dans un substrat donneur (1) en carbure de silicium monocristallin, pour former un plan fragile enterré (11) qui délimite, avec une face avant du substrat donneur (1), la couche utile (10).
- [Revendication 7] Procédé de fabrication selon l'une des revendications 5 et 6, dans lequel l'étape d) comprend, après l'assemblage direct donnant lieu à un ensemble collé (200) comprenant le substrat donneur (1) et le substrat support (30), une séparation au niveau du plan fragile enterré (11), pour former d'une part la structure intermédiaire (150) comprenant la couche utile (10), le film encapsulé (2') et le substrat support (30), et d'autre part, le reste du substrat donneur (1').
- [Revendication 8] Procédé de fabrication selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel, avant l'étape c), la face libre à assembler de la couche mince (10) présente une surface monocristalline, dépourvue de zones amorphisées ou détériorées par un dopage ou une activation par bombardement, et la face libre à assembler du substrat support (30) présente une surface polycristalline, dépourvue de zones amorphisées ou modifiées par un dopage ou une activation par bombardement.
- [Revendication 9] Procédé de fabrication selon l'une des revendications 5 à 8, comprenant une étape de croissance épitaxiale d'une couche supplémentaire en carbure de silicium monocristallin sur la couche utile (10) de la structure semi-conductrice (100).