

STRUCTURE SEMI-CONDUCTRICE COMPRENANT UNE INTERFACE DE COLLAGE ELECTRIQUEMENT CONDUCTRICE, ET PROCEDE DE FABRICATION ASSOCIE

DOMAINE DE L'INVENTION

La présente invention concerne le domaine des matériaux semi-conducteurs pour composants microélectroniques. Elle concerne en particulier une structure comprenant une couche semi-conductrice monocristalline et un substrat support semi-conducteur, assemblés au niveau d'une interface de collage électriquement conductrice. L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une telle structure.

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

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 et sur un assemblage par collage direct au niveau d'une interface de collage. 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.

Dans le domaine de l'électronique de puissance par exemple, il peut être en outre avantageux d'établir une conduction électrique entre la couche utile et la 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 monocristallin et un substrat support en carbure de silicium de moindre qualité (monocristallin ou poly-cristallin), l'interface de collage doit présenter une résistivité aussi faible que possible, préférentiellement inférieure à 1 mohm.cm^2 , voire inférieure à $0,1 \text{ mohm.cm}^2$.

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 peut néanmoins être difficile d'obtenir une bonne qualité d'interface via un tel collage.

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, 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 est proposé en particulier dans le document EP3168862.

D'autres solutions de l'état de la technique proposent de réaliser un collage conducteur à partir de couches métalliques déposées sur les surfaces à assembler.

Par exemple, la publication de Letertre (« Silicon carbide and related materials », Material Science Forum - vol 389-393, avril 2002) ou le document US7208392, décrivent le dépôt d'une couche de tungstène et d'une couche de silicium, pour former une couche

intermédiaire conductrice à base de siliciure de tungstène (WSi₂). Un inconvénient de cette approche peut venir de la formation de trous (« voids ») dans cette couche intermédiaire, du fait de la contraction du siliciure par rapport aux matériaux initialement déposés : cela peut notamment affecter la qualité de la couche semi-conductrice superficielle et de la structure semi-conductrice dans son ensemble, au point de la rendre inutilisable pour les applications visées. De plus, il apparaît difficile d'abaisser la résistivité de l'interface de collage au niveau requis par certaines applications nécessitant une très bonne conduction électrique verticale.

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 une structure comprenant une couche utile semi-conductrice monocristalline et un substrat support semi-conducteur, assemblés au niveau d'une interface de collage électriquement conductrice. L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une telle structure.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

L'invention concerne une structure semi-conductrice comprenant une couche utile en matériau semi-conducteur monocristallin, s'étendant selon un plan principal, un substrat support en matériau semi-conducteur, et une zone d'interface entre la couche utile et le substrat support, s'étendant parallèlement au plan principal. La structure est remarquable en ce que la zone d'interface comporte des nodules :

- conducteurs électriques, comprenant un matériau métallique formant un contact ohmique avec la couche utile et avec le substrat support,
- présentant une épaisseur, selon un axe normal au plan principal, inférieure ou égale à 30nm,
- disjoints ou accolés, les nodules disjoints étant séparés les uns des autres par des régions de contact direct entre la couche utile et le substrat support.

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

- la couche utile et le substrat support sont formés du même matériau semi-conducteur et présentent un type identique de dopage ;
- le matériau semi-conducteur de la couche utile est choisi parmi le carbure de silicium, le silicium, le nitrure de gallium et le germanium ;
- le matériau semi-conducteur du substrat support est choisi parmi le carbure de silicium, le silicium, le nitrure de gallium et le germanium, et présente une structure monocristalline, poly-cristalline ou amorphe ;
- 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 ;
- le taux de recouvrement des nodules dans un plan médian de la zone d'interface est compris entre 1% et 70% ;
- les nodules présentent une résistivité inférieure à 0,1 mohm.cm², préférentiellement inférieure ou égale à 0,01 mohm.cm², de manière à obtenir une résistivité de la zone d'interface inférieure à 0,1 mohm.cm², préférentiellement inférieure ou égale à 0,01 mohm.cm² ;

- les nodules présentent une épaisseur inférieure ou égale à 20nm, voire inférieure ou égale à 10nm.

L'invention concerne également un composant de puissance élaboré sur et/ou dans la couche utile d'une structure semi-conductrice telle que ci-dessus, et comprenant au moins un contact électrique sur et/ou dans le substrat support, au niveau d'une face arrière de la structure semi-conductrice.

Enfin, l'invention concerne un procédé de fabrication d'une structure telle que ci-dessus, comprenant les étapes suivantes :

- a) la fourniture d'une couche utile en matériau semi-conducteur monocristallin présentant une face libre à assembler,
- b) la fourniture d'un substrat support en matériau semi-conducteur présentant une face libre à assembler,
- c) le dépôt d'un film en un matériau métallique apte à former un contact ohmique avec la couche utile et avec le substrat support et 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, sous atmosphère contrôlée non oxydante,
- 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, sous atmosphère contrôlée non oxydante, la structure intermédiaire incluant un film encapsulé issu du ou des film(s) déposés lors de l'étape c),
- e) le recuit de la structure intermédiaire à une température supérieure ou égale à une température critique, de manière à provoquer la segmentation du film encapsulé sous forme de nodules conducteurs électriques formant un contact ohmique avec la couche utile et avec le substrat support, et à former la zone d'interface.

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

- la couche utile et le substrat support sont formés du même matériau semi-conducteur et présentent un type identique de dopage ;
- l'étape a) comprend une implantation d'espèces légères dans un substrat donneur, pour former un plan fragile enterré qui délimite, avec une face avant du substrat donneur, la couche utile ;
- l'étape a) comprend la formation du substrat donneur par épitaxie d'une couche donneuse sur un substrat initial, l'implantation étant réalisée ultérieurement, dans la couche donneuse ;
- 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 ;
- le procédé de fabrication comprend, préalablement à l'étape c) de dépôt, une étape c') de désoxydation de la face libre à assembler de la couche utile et/ou de la face libre à assembler du substrat support ;
- le dépôt de l'étape c) et l'assemblage direct de l'étape d) sont opérés dans un même équipement ;
- l'épaisseur du film déposé à l'étape c) est inférieure ou égale à 10 nm, voire inférieure ou égale à 5 nm, voire inférieure ou égale à 2nm ;
- les étapes c) et d) sont opérées sous vide ;
- l'étape c) de dépôt est réalisée à température ambiante, par une technique de pulvérisation ;

- le matériau semi-conducteur de la couche utile est choisi parmi le carbure de silicium, le silicium, le nitrure de gallium et le germanium ;
- le matériau semi-conducteur du substrat support est choisi parmi le carbure de silicium, le silicium, le nitrure de gallium et le germanium, et présente une structure monocristalline, poly-cristalline ou amorphe ;
- le matériau métallique du film est choisi parmi le tungstène, le titane, le nickel, l'aluminium, le molybdène, le niobium, le tantale, le cobalt, le cuivre ;
- la température critique est comprise entre 500°C et 1800°C, selon la nature du matériau métallique du film encapsulé et du (ou des) matériau(x) semi-conducteur(s) de la couche utile et du substrat support.

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 :

- La figure 1 présente une structure conforme à l'invention ;
- Les figures 2a à 2e présentent des étapes d'un procédé de fabrication conforme à l'invention ;
- Les figures 3a à 3d présentent des variantes d'étapes d'un procédé de fabrication conforme à l'invention ;
- La figure 4 présente une courbe de courant en fonction de la tension appliquée, mesurée à partir de deux électrodes élaborées sur une structure conforme à l'invention, le chemin de courant traversant la zone d'interface de ladite

structure ; la figure 4 présente également une courbe courant/tension pour un substrat massif et pour une structure collée non conforme à l'invention, à titre de comparaison.

- La figure 5 présente un graphe reliant la résistivité des nodules dans la zone d'interface d'une structure conforme à l'invention, et le taux de recouvrement desdits nodules, pour l'obtention de différents niveaux de résistivité de la zone d'interface.
- La figure 6 présente un graphe de courant en fonction de la tension, illustrant l'évolution de la résistivité de la zone d'interface en fonction de l'épaisseur du film en matériau métallique déposé avant la formation de la structure intermédiaire.

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 respectées sur les figures.

L'invention concerne une structure semi-conductrice 100 comprenant une couche utile 10 en matériau semi-conducteur monocristallin, un substrat support 30 en matériau semi-conducteur, et une zone d'interface 20 entre la couche utile 10 et le substrat support 30 (figure 1). Comme la couche utile 10,

la zone d'interface 20 s'étend parallèlement au plan principal (x,y) .

Avantageusement, 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 100mm et 450mm, et d'épaisseur totale typiquement comprise entre 300 microns et 1000 microns. 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) .

De nombreux types de structure semi-conductrice 100 permettant une conduction électrique verticale entre la couche utile 10 et le substrat support 30 peuvent présenter un intérêt pour des applications microélectroniques : la nature des matériaux composant la couche utile 10 et le substrat support 30 peut donc être très variée.

A titre d'exemple, le matériau semi-conducteur de la couche utile 10 peut être choisi parmi le carbure de silicium, le silicium, le nitrure de gallium et le germanium. En général, l'élaboration de composants sur la couche utile 10 nécessite une haute qualité cristalline de ladite couche 10 : elle est donc choisie monocristalline, avec un grade de qualité, un type et un niveau de dopage adapté à l'application visée.

Toujours à titre d'exemple, le matériau semi-conducteur du substrat support 30 peut être choisi parmi le carbure de silicium, le silicium, le nitrure de gallium et le germanium. Il présente préférentiellement un niveau de qualité moindre, essentiellement pour des raisons économiques, et une structure monocristalline, poly-cristalline ou amorphe. Son type et son niveau de dopage sont choisis pour répondre à l'application visée.

La zone d'interface 20 de la structure semi-conductrice 100 selon l'invention est remarquable en ce qu'elle comporte des nodules conducteurs électriques 21. Chacun de ces nodules 21 comprend un matériau métallique apte à former un contact ohmique avec la couche utile 10 et avec le substrat support 30. 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. Comme cela est connu de l'homme du métier, tous ces matériaux ne sont pas aptes à former un contact ohmique avec tous les matériaux semi-conducteurs énoncés comme susceptibles de former la couche utile 10 et/ou le substrat support 30. Le matériau métallique des nodules 21 sera donc choisi en fonction de la nature de la couche utile 10 et du substrat support 30. Quelques exemples particuliers seront décrits plus loin.

Les nodules 21 de la zone d'interface 20 présentent en outre une épaisseur, selon un axe z normal au plan principal (x,y), faible voire très faible : typiquement inférieure ou égale à 30nm, inférieure ou égale à 20nm, inférieure ou égale à 10nm, voire inférieure ou égale à 5nm.

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 des régions 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 les matériaux semi-conducteurs de la couche utile 10 et du substrat support 30. Ces régions 22 seront nommées par la suite régions de contact direct 22.

Il peut éventuellement exister, dans certains cas de structure semi-conductrice 100, des cavités d'épaisseur nanométrique dans ces régions de contact 22, mais lesdites cavités occupent moins

de 20%, voire moins de 10%, voire encore moins de 5% de la surface selon le plan principal (x,y) occupée par les régions de contact 22. Leur épaisseur est par ailleurs inférieure à celle des nodules 21.

La structure semi-conductrice 100 selon l'invention garantit une excellente conductivité électrique entre la couche utile 10 et le substrat support 30, via sa zone d'interface 20. En particulier, les nodules 21, répartis dans la zone d'interface 20 dans un plan médian P sensiblement parallèle au plan principal (x,y), établissent un contact ohmique avec la couche utile 10 et avec le substrat support 30, et sont au moins en partie formés par un matériau métallique très bon conducteur électrique. Ils autorisent ainsi une conduction électrique verticale efficace. Entre les nodules 21 disjoints, les régions de contact direct 22 peuvent éventuellement autoriser une conduction électrique mais moins efficacement que les nodules 21. Par contre, ces régions de contact direct 22 assurent la continuité mécanique de la zone d'interface 20 et procurent une excellente tenue mécanique entre la couche utile 10 et le substrat support 30. 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'impacte pas négativement la qualité et la tenue mécanique de la couche utile 10.

En se plaçant dans un plan médian P de la zone d'interface 20, le taux de recouvrement des nodules 21 est typiquement compris entre 1% et 70%, préférentiellement entre 10% et 60%.

Préférentiellement, les nodules 21 présentent une résistivité inférieure à 0,1 mohm.cm², voire inférieure ou égale à 0,01 mohm.cm². On parle ici d'une résistivité en ohm.cm² pour les

nodules 21 (ou plus généralement pour la zone d'interface 20) du fait de leur très faible épaisseur.

Dans la résistivité des nodules 21, on intègre la résistivité du matériau métallique formant les nodules 21, la résistance spécifique du contact entre les nodules 21 et la couche utile 10, et la résistance spécifique du contact entre les nodules 21 et le substrat support 30. Ce sont ces résistances de contact qui dominent la résistance verticale globale. Par conséquent, il convient de parler de résistivité surfacique en ohm.cm^2 . Les résistances spécifiques de contact pourront être différentes, selon la nature et/ou le dopage des matériaux respectifs de la couche utile 10 et du substrat support 30. A titre d'exemple, la résistance spécifique de contact d'un nodule en nickel (Ni) avec du carbure de silicium (SiC) présentant un niveau de dopage de type N (dopant azote ou phosphore) de $4\text{E}15/\text{cm}^3$, sera de l'ordre de $3\text{m}\Omega.\text{cm}^2$, alors que pour un niveau de dopage N de $1\text{E}19/\text{cm}^3$, elle sera d'environ $0.003\text{m}\Omega.\text{cm}^2$.

Le graphe de la figure 5 présente l'évolution de la résistivité de la zone d'interface 20, en fonction de la résistivité des nodules 21 et de leur taux de recouvrement dans le plan médian P. Comme énoncé précédemment, la résistivité visée de la zone d'interface 20, pour des applications de puissance, est inférieure ou égale à 1 mohm.cm^2 , voire inférieure ou égale à $0,1\text{ mohm.cm}^2$.

Selon un mode de réalisation avantageux, la couche utile 10 et le substrat support 30 sont formés du même matériau semi-conducteur et présentent un type identique de dopage, pour permettre une conduction électrique verticale efficace entre les composants qui seront élaborés dans et/ou sur la couche utile 10 et les composants et/ou l'électrode qui seront élaborés en face arrière 30b du substrat support 30 de la structure 100.

Selon un premier exemple, une structure semi-conductrice 100 conforme à la présente invention comporte une couche utile 10 en carbure de silicium monocristallin de haute qualité ; par haute qualité, on entend typiquement un SiC avec moins de 1 micro-trou par cm^2 (« micropipe », MP), moins de 500 dislocations vis par cm^2 (« threading screw dislocation », TSD), moins de 5000 dislocations coin par cm^2 (« threading edge dislocation », TED), moins de 1000 dislocations de plan basal par cm^2 (« basal plane dislocation », BPD) et moins de 1 faute d'empilement /cm (« stacking fault », SF). Le SiC de la couche utile 10 présente un dopage de type N à $8 \times 10^{18}/\text{cm}^3$. La structure semi-conductrice 100 comporte également un substrat support 30 en carbure de silicium monocristallin de faible qualité ou poly-cristallin, présentant un dopage de type N avec une résistivité de l'ordre de 20 $\text{m}\Omega.\text{cm}$. Les nodules 21 sont en tungstène (W) ; ils présentent une épaisseur de l'ordre de 5nm, et un taux de recouvrement compris entre 15% et 25%. La résistivité de la zone d'interface 20 d'une telle structure 100 est de l'ordre de 0,05 mohm.cm^2 , soit inférieure ou égale à 0.1 mohm.cm^2 .

Selon un deuxième exemple, une structure semi-conductrice 100 conforme à la présente invention comporte une couche utile 10 en carbure de silicium monocristallin de haute qualité, présentant un dopage de type P à $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, et un substrat support 30 en silicium monocristallin de faible qualité ou poly-cristallin, présentant un dopage de type P à $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$. Les nodules 21 de zone d'interface 20 sont en titane (Ti) ; ils présentent une épaisseur de l'ordre de 6nm, et un taux de recouvrement compris entre 30% et 40%. La résistivité de la zone d'interface 20 d'une telle structure 100 est inférieure à 1 mohm.cm^2 .

Selon un troisième exemple, une structure semi-conductrice 100 conforme à l'invention comporte une couche utile 10 en silicium

monocristallin de haute qualité, présentant un dopage de type N à $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, un substrat support 30 en silicium monocristallin de faible qualité ou poly-cristallin, présentant un dopage de type N à $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$. Les nodules 21 sont en aluminium (Al) ; ils présentent une épaisseur de l'ordre de 3nm, et un taux de recouvrement compris entre 5% et 15%. La résistivité de la zone d'interface 20 d'une telle structure 100 est inférieure à 1 mohm.cm².

Bien sûr, cette liste d'exemples n'est pas exhaustive et de nombreuses autres structures semi-conductrices 100 conformes à l'invention peuvent être élaborées, basées sur différentes combinaisons de matériaux pour la couche utile 10, les nodules 21 et le substrat support 30, en respectant les conditions énoncées précédemment pour la zone d'interface 20.

Des composants de puissance peuvent en particulier être élaborés sur et/ou dans la couche utile 10 d'une structure semi-conductrice 100 selon l'invention. 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.

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une structure semi-conductrice 100 telle que précédemment décrite.

Le procédé de fabrication comprend en premier lieu une étape a) de fourniture de la couche utile 10 en matériau semi-conducteur monocristallin (figure 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.

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.

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, pour former un plan fragile enterré 11 qui délimite, avec une face avant 10a du substrat donneur 1, la couche utile 10 (figure 3a).

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 (figure 3b). Cette variante permet de former une couche donneuse 1' présentant les caractéristiques structurelles 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'.

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.

Le procédé de fabrication selon l'invention comprend ensuite une étape b) de fourniture d'un substrat support 30 en matériau semi-conducteur (figure 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.

Comme évoqué précédemment dans la description de la structure semi-conductrice 100, la couche utile 10 pourra être formée d'un ou plusieurs matériaux choisis parmi le carbure de silicium, le silicium, le nitrure de gallium et le germanium ; et le substrat support 30 pourra être formé d'un ou plusieurs matériaux choisis parmi le carbure de silicium, le silicium, le nitrure de gallium et le germanium, préférentiellement de moindre qualité, monocristallin, poly-cristallin ou même amorphe.

Selon un mode de réalisation particulier, la couche utile 10 et le substrat support 30 sont formés du même matériau semi-conducteur et présentent un type de dopage (N ou P) identique.

Le procédé de fabrication comprend ensuite une étape c) de dépôt d'un film 2 en un matériau métallique 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 figure 2c sur les deux faces libres à assembler 10a, 30a. Le matériau métallique est choisi pour son aptitude à former un contact ohmique avec la couche utile 10 et avec le substrat support 30. Il pourra être choisi parmi la liste de matériaux non limitative suivante : tungstène, titane, nickel, aluminium, molybdène, niobium, tantale, cobalt, cuivre, en fonction de la nature de la couche utile 10 et du substrat support 30.

Le film 2 présente une épaisseur inférieure ou égale à 20 nm, préférentiellement inférieure ou égale à 10nm, voire inférieure ou égale à 5nm. Par exemple, le film 2 déposé pourra présenter une épaisseur de l'ordre de 0,5nm, 1nm, 2nm, 3nm, 4nm, 5nm, 8nm, 10nm ou 15nm.

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 déposé sur l'une et l'autre faces libres 10a,30a est préférentiellement inférieure ou égale à 20nm, voire inférieure ou égale à 10nm. L'épaisseur totale de film 2 déposé est impérativement maintenue faible, de manière à autoriser une segmentation du film sous forme de nodules 21, à une étape ultérieure du procédé.

Le dépôt du film 2 est opéré sous atmosphère contrôlée non oxydante. Il est important que le film 2 métallique 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.

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...).

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, ce qui facilite la formation d'un contact ohmique avec le matériau métallique, à une étape ultérieure du procédé. La désoxydation peut être faite par traitement chimique humide (retrait par attaque HF par exemple) ou sec (gravure sèche ou recuit sous atmosphère réductrice).

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 de collage 15 (figure 2d).

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.

L'assemblage direct est préférentiellement opéré sous une atmosphère contrôlée et en particulier sous un vide poussé, de l'ordre de 10^{-6} Pa ou moins.

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 un dépôt métallique et un collage direct, en maintenant une atmosphère contrôlée.

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 de collage 15 (figure 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'' (figure 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 Cut.

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.

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.

Le procédé de fabrication selon l'invention comprend ensuite une étape e) de recuit de la structure intermédiaire 150 à une

température supérieure ou égale à une température critique, de manière à provoquer la segmentation du film encapsulé 2' sous forme de nodules 21 conducteurs électriques et former la zone d'interface 20 (figure 2e). L'étape e) aboutit à la formation de la structure semi-conductrice 100.

On appelle ici température critique la température à partir de laquelle le contact entre le métal du film encapsulé 2' et le semi-conducteur de la couche utile 10 et du substrat support 30 devient ohmique, d'une part : par exemple, entre 400°C et 650°C pour le couple Al/Si, entre 950°C et 1100°C pour le couple Ni/SiC, etc. La température critique doit d'autre part être suffisante pour permettre le collage des régions de contact direct 22, entre les nodules 21.

Elle est typiquement comprise entre 500°C et 1800°C, selon la nature du matériau métallique et du (ou des) matériau(x) semi-conducteur(s) de la structure semi-conductrice 100.

Au-delà de cette température critique, 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 établissant un contact ohmique avec les surfaces semi-conductrices, 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.

Par ailleurs, parce que le film encapsulé 2' est extrêmement fin, des matériaux métalliques connus pour être stables à basse ou moyenne température seulement, peuvent être utilisés dans des structure semi-conductrices 100 conformes à l'invention susceptibles de subir des traitements à hautes (900°C-1100°C), voire très hautes (1200°C-1800°C) températures : en effet, du fait de leur agglomération sous forme de nodules 21 de faibles

dimensions et de très faible épaisseur, ils ne provoquent pas de détérioration de la structure 100 et en particulier de la couche utile 10. On citera par exemple le cas de nodules 21 en nickel ou en titane dans une structure 100 comprenant une couche utile 10 et un substrat support 30 en SiC et destinée à subir une épitaxie à une température comprise entre 1600°C et 1800°C.

Le procédé de fabrication tel que décrit permet donc d'obtenir une structure semi-conductrice 100 procurant une conduction électrique verticale entre la couche utile 10 et le substrat support 30, via une zone d'interface 20. Les très fins nodules 21 sont en grande partie constitués de métal et présentent donc une très faible résistivité. Par ailleurs, la présence de régions de contact direct 22 entre les nodules 21 disjoints évite tout problème de tenue mécanique ou plus généralement de fiabilité de la couche utile 10 et/ou des composants qui seront élaborés sur ou dans celle-ci. Enfin, parce que l'invention est basée sur un assemblage via un film 2 métallique, l'augmentation de la résistivité d'interface, liée au collage direct de matériaux semi-conducteurs dont la nature cristallographique est différente, n'est pas problématique pour la conduction électrique verticale dans la structure 100, les nodules 21 garantissant ladite conduction.

Exemple de mise en œuvre :

Le substrat donneur 1 est en SiC 4H, monocristallin de haute qualité et présente un diamètre de 150mm. Le substrat donneur 1 est dopé N, avec une résistivité de l'ordre de 20mohm.cm. Il est implanté à travers sa face avant 1a, face de type « C », avec des ions hydrogène à une dose de $5 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ et une énergie de 95keV. 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.

Le substrat support 30 est en SiC 4H monocristallin de moindre qualité, de même diamètre que le substrat donneur 1. Il est dopé N, avec une résistivité de l'ordre de 20mohm.cm.

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).

Les substrats 1,30 sont introduits dans une première chambre de dépôt, intégrée à un équipement de collage direct. Un film 2 de tungstène d'une épaisseur de 0,5nm 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 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.

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 1nm.

L'ensemble collé 200 est soumis à un traitement thermique pour provoquer la séparation au niveau du plan fragile enterré 11, à une température d'environ 900°C, pendant 30 minutes. On obtient alors la structure intermédiaire 150 incluant une couche utile 10 présentant une épaisseur de 500nm, 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.

Enfin, un recuit à 1700°C pendant 30min 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 est formée et les nodules 21 en tungstène, séparés par des régions de contact direct 20 entre couche utile 10 et substrat support 30, confèrent à la structure 100 une excellente conductivité électrique verticale, quasiment identique à celle d'un substrat SiC massif présentant une résistivité de 20mohm.cm. Cela est apparent sur le graphe de la figure 4 qui illustre les courbes de courant en fonction de la tension I(V) pour des composants simples comprenant deux électrodes métalliques de contact. Dans le cas de la structure 100 selon l'invention la mesure de I(V) est faite au niveau de deux électrodes entre lesquelles le chemin de courant traverse la zone d'interface 20. La zone d'interface 20 présente une résistivité inférieure ou égale à 0,1 mohm.cm².

Les nodules 21 dans cette structure 100 présentent une épaisseur de l'ordre de 5nm et un diamètre moyen de l'ordre de 20nm. Le taux de recouvrement des nodules 21, dans un plan médian de la zone d'interface 20 est de l'ordre de 20%.

Le graphe de la figure 4 montre, à titre de comparaison, sous la dénomination « collage non conforme à l'invention », la courbe I(V) d'une structure basée sur un collage direct SiC/SiC avec un fort dopage (implantation azote) des surfaces assemblées, les substrats SiC présentant la même résistivité que dans la structure 100 précitée. L'amélioration en termes de résistivité de la zone d'interface procurée par la présente invention est clairement apparente sur la figure 4.

Dans les mêmes conditions expérimentales que celles décrites précédemment, il a été observé que la résistivité de la zone d'interface 20 pouvait être encore diminuée avec une épaisseur de film encapsulé 2' de l'ordre de 2nm, voire 3nm. La figure 6 présente l'impact sur la courbe $I(V)$, d'épaisseurs allant de 0,4nm à 2nm du film encapsulé 2' : la courbe $I(V)$ pour un film encapsulé 2' d'épaisseur 2nm est très proche de celle obtenue avec un substrat SiC massif.

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.

REVENDEICATIONS

1. Structure semi-conductrice (100) comprenant une couche utile (10) en matériau semi-conducteur monocristallin, s'étendant selon un plan principal (x,y), un substrat support (30) en matériau semi-conducteur, et une zone d'interface (20) entre la couche utile (10) et le substrat support (30), s'étendant parallèlement au plan principal (x,y), la structure (100) étant caractérisée en ce que la zone d'interface (20) comporte des nodules (21) :
 - conducteurs électriques, comprenant un matériau métallique formant un contact ohmique avec la couche utile (10) et avec le substrat support (30),
 - présentant une épaisseur, selon un axe (z) normal au plan principal (x,y), inférieure ou égale à 30nm,
 - disjoints ou accolés, les nodules (21) disjoints étant séparés les uns des autres par des régions de contact direct (22) entre la couche utile (10) et le substrat support (30).
2. Structure semi-conductrice (100) selon la revendication précédente, dans laquelle la couche utile (10) et le substrat support (30) sont formés du même matériau semi-conducteur et présentent un type identique de dopage.
3. Structure semi-conductrice (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle le matériau semi-conducteur de la couche utile (10) est choisi parmi le carbure de silicium, le silicium, le nitrure de gallium et le germanium.
4. Structure semi-conductrice (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle le matériau semi-conducteur du substrat support (30) est choisi parmi le carbure de silicium, le silicium, le nitrure de gallium et

le germanium, et présente une structure monocristalline, poly-cristalline ou amorphe.

5. 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.
6. Structure semi-conductrice (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle le taux de recouvrement des nodules (21) dans un plan médian (P) de la zone d'interface (20) est compris entre 1% et 70%.
7. Structure semi-conductrice (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle les nodules (21) présentent une résistivité inférieure à $0,1 \text{ mohm.cm}^2$, préférentiellement inférieure ou égale à $0,01 \text{ mohm.cm}^2$, de manière à obtenir une résistivité de la zone d'interface (20) inférieure à $0,1 \text{ mohm.cm}^2$, préférentiellement inférieure ou égale à $0,01 \text{ mohm.cm}^2$.
8. Structure semi-conductrice (100) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle les nodules (21) présentent une épaisseur inférieure ou égale à 20nm, voire inférieure ou égale à 10nm.
9. Composant de puissance élaboré sur et/ou dans la couche utile (10) d'une structure semi-conductrice (100) selon l'une des revendications précédentes, et comprenant au moins un contact électrique sur et/ou dans le substrat support (30), au niveau d'une face arrière de la structure semi-conductrice (100).

10. Procédé de fabrication d'une structure semi-conductrice (100) selon l'une des revendications 1 à 8, comprenant les étapes suivantes :
- a) la fourniture d'une couche utile (10) en matériau semi-conducteur monocristallin présentant une face libre (10a) à assembler,
 - b) la fourniture d'un substrat support (30) en matériau semi-conducteur présentant une face libre (30a) à assembler,
 - c) le dépôt d'un film (2) en un matériau métallique apte à former un contact ohmique avec la couche utile (10) et avec le substrat support (30) et présentant une épaisseur inférieure ou égale à 20 nm, sur la face libre (10a) à assembler de la couche utile (10) et/ou sur la face libre (30a) à assembler du substrat support (30), sous atmosphère contrôlée non oxydante,
 - 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), sous atmosphère contrôlée non oxydante, 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 supérieure ou égale à une température critique, de manière à provoquer la segmentation du film encapsulé (2') sous forme de nodules (21) conducteurs électriques formant un contact ohmique avec la couche utile (10) et avec le substrat support (30), et à former la zone d'interface (20).
11. Procédé de fabrication selon la revendication précédente, dans lequel la couche utile (10) et le substrat support (30) sont formés du même matériau semi-conducteur et présentent un type identique de dopage.

12. Procédé de fabrication selon l'une des deux revendications précédentes, dans lequel l'étape a) comprend une implantation d'espèces légères dans un substrat donneur (1), pour former un plan fragile enterré (11) qui délimite, avec une face avant (10a) du substrat donneur (1), la couche utile (10).
13. Procédé de fabrication selon la revendication précédente, dans lequel l'étape a) comprend la formation du substrat donneur (1) par épitaxie d'une couche donneuse (1') sur un substrat initial, l'implantation étant réalisée ultérieurement, dans la couche donneuse (1').
14. Procédé de fabrication selon l'une des deux revendications précédentes, 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'').
15. Procédé de fabrication selon l'une des cinq revendications précédentes, comprenant, préalablement à l'étape c) de dépôt, une étape c') de désoxydation de la face libre (10a) à assembler de la couche utile (10) et/ou de la face libre (30a) à assembler du substrat support (30).
16. Procédé de fabrication selon l'une des six revendications précédentes, dans lequel le dépôt de l'étape c) et l'assemblage direct de l'étape d) sont opérés dans un même équipement.

17. Procédé de fabrication selon l'une des sept revendications précédentes, dans lequel l'épaisseur du film déposé (2) à l'étape c) est inférieure ou égale à 10 nm, voire inférieure ou égale à 5 nm, voire inférieure ou égale à 2nm.
18. Procédé de fabrication selon l'une des huit revendications précédentes, dans lequel les étapes c) et d) sont opérées sous vide.
19. Procédé de fabrication selon l'une des neuf revendications précédentes, dans lequel l'étape c) de dépôt est réalisée à température ambiante, par une technique de pulvérisation.
20. Procédé de fabrication selon l'une des dix revendications précédentes, dans lequel la température critique est comprise entre 500°C et 1800°C, selon la nature du matériau métallique du film encapsulé (2) et du (ou des) matériau(x) semi-conducteur(s) de la couche utile (10) et du substrat support (30).