

Description

Titre de l'invention : Procédé de fabrication d'une structure composite incluant une étape de gradation

DOMAINE DE L'INVENTION

- [0001] La présente invention concerne le domaine des matériaux semi-conducteurs, notamment les structures composites comprenant une couche mince (issue d'un substrat donneur en carbure de silicium monocristallin) reportée sur un substrat support en carbure de silicium polycristallin. Elle porte en particulier sur un procédé de fabrication d'une telle structure composite, incluant une étape de gradation basée sur la cartographie de contrôle du substrat donneur et sur la cartographie de contrôle de la couche mince de la structure composite.
- [0002] ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION
- [0003] Le carbure de silicium est un matériau particulièrement intéressant pour la fabrication de dispositifs de puissance, radiofréquences ou encore des dispositifs opérant à très hautes températures.
- [0004] La qualité des substrats en carbure de silicium monocristallin (c-SiC) a fortement progressé au cours des dix dernières années et s'accompagne d'une connaissance et d'une détection de plus en plus fine des différents types de défauts cristallins susceptibles d'être présents dans ce matériau. La norme JEITA (« Japan Electronics and Information Technology Industries Association ») comprend d'ailleurs quatre documents relatifs à la zoologie de défauts sur/dans une couche réalisée par homoépitaxie sur un substrat 4H-SiC (EDR 4712/100) et à des procédures non-destructives d'inspection optique de ces défauts (EDR 4712/200, /300, /400). Il est en particulier indiqué une procédure pour évaluer et référencer les défauts en combinant une inspection optique et une image par photoluminescence.
- [0005] Des équipements disponibles dans le commerce, tels que notamment le SICA88 de la société Lasertec, permettent de combiner les techniques de microscopie confocale à prisme de Nomarski en lumière visible et par photoluminescence (comme décrit par [1] T.Kimoto et al., « Fundamentals of Silicon Carbide Technology Growth Characterization Devices and Applications », p.126, ou [2] D. Baierhofer et al, Materials Science in Semiconductor processing 140 (2022) 106414) et sont couramment utilisés pour inspecter les substrats en c-SiC avant ou après épitaxie.
- [0006] A titre d'exemple, [3] Das et al (« Statistical analysis of killer and non-killer defects in SiC and the impact of device performance », Material Science Forum, ISSN 1662-9752, Vol.1004, pp 458-463 (2020) Trans Tech Publications Ltd) propose une analyse statistique des défauts « tueurs » pour des dispositifs élaborés sur une couche

homoépitaxiée en c-SiC, et montre des images optiques et par photoluminescence de défauts typiques du c-SiC.

- [0007] Bien qu'en fort développement, les substrats en c-SiC de haute qualité restent chers et difficiles à approvisionner en grande taille. Il est donc avantageux de recourir à des solutions de transfert de couches, pour élaborer des structures composites comprenant une couche mince en SiC monocristallin (issue du substrat donneur en c-SiC de haute qualité) sur un substrat support plus bas coût, par exemple en SiC polycristallin (p-SiC), qui peut présenter en outre des avantages en termes de conductivité électrique. Une solution de transfert de couche mince bien connue est le procédé Smart CutTM, basé sur une implantation d'ions légers et sur un assemblage, par collage direct, entre un substrat donneur en c-SiC et un substrat support, au niveau d'une interface de collage. L'implantation crée un plan fragile enterré le long duquel va s'opérer une séparation, menant au transfert d'une couche mince en c-SiC sur le substrat support, pour former la structure composite, et permettant la récupération et le recyclage du reste du substrat donneur pour effectuer potentiellement un ou plusieurs autres transferts de couches. Une épitaxie peut ensuite être effectuée sur la couche mince de la structure composite, suivie de l'élaboration des dispositifs électroniques.
- [0008] Pour que la mise en œuvre d'un procédé de transfert de couche soit économiquement viable, il est important de savoir contrôler la qualité des substrats donneurs, de manière à éviter de procéder au report d'une couche qui mènerait inévitablement à un déclassement de la structure composite, ou qui donnerait lieu à une couche épitaxiale hors spécification, en termes de défauts « tueurs ». La zoologie de défauts du c-SiC est relativement bien connue, et des études nombreuses (dont quelques-unes sont référencées ci-dessus) tendent à définir le type et la taille des défauts, présents dans une couche épitaxiée en c-SiC, qui seraient tueurs pour les composants ; néanmoins, la demanderesse a observé que les critères de classification des défauts d'un substrat donneur ne sont pas nécessairement les mêmes lorsqu'une épitaxie est effectuée sur ledit substrat et lorsque un transfert de couche mince est effectué à partir dudit substrat.
- [0009] Il est donc important de détecter, mais surtout de classifier avec précision les défauts cristallins (dits défauts primaires) présents sur les substrats donneurs, pour déclasser ceux, parmi ces substrats donneurs, qui ne permettront pas la fabrication d'une couche mince de qualité requise.
- [0010] Par ailleurs, la détection et la reconnaissance de défauts (dits défauts secondaires) sur et/ou dans la couche mince (issue d'un substrat donneur) d'une structure composite dont le substrat support est en SiC polycristallin (p-SiC) sont complexes car les grains de p-SiC sont visibles sous ladite couche mince, en particulier avec les équipements combinant microscopie confocale à prisme de Nomarski en lumière visible et imagerie par photoluminescence. Pour autant, un contrôle fiable et efficace (ne nécessitant pas

trop de temps d'inspection par structure) de la qualité de la couche mince est requis, pour éviter de poursuivre les étapes d'épitaxie si des défauts secondaires de la couche mince sont susceptibles de générer une densité de défauts tueurs hors spécification dans la couche homoépitaxiée.

[0011] Dans la perspective d'une utilisation grandissante des techniques de transfert de couches dans la chaîne de fabrication des dispositifs électroniques sur c-SiC, il y a donc un fort besoin de définir des étapes de contrôle permettant une inspection fiable et rapide, tant des substrats donneurs, en début de chaîne, que des structures composites, en milieu de chaîne, de manière à attribuer un grade, aussitôt que possible dans la chaîne globale de fabrication, aux substrats donneurs ou structures composites et permettre l'atteinte des spécifications et rendements attendus pour les dispositifs.

[0012] OBJET DE L'INVENTION

[0013] La présente invention adresse le problème énoncé. L'invention porte sur un procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en carbure de silicium monocristallin reportée sur un substrat support en carbure de silicium polycristallin. Le procédé de fabrication comprend une étape de gradation originale, fiable et rapide de la structure composite, combinant un contrôle initial du substrat donneur et un contrôle final de ladite structure.

[0014] BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

[0015] L'invention concerne un procédé de fabrication d'une structure composite comprenant une couche mince en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support en carbure de silicium polycristallin, le procédé comprenant les étapes suivantes :

[0016] **1)** la fourniture d'au moins un substrat donneur en carbure de silicium monocristallin, ayant une face avant et une face arrière, la face avant présentant potentiellement des défauts, dits défauts primaires ;

[0017] **2)** le contrôle de la qualité du – au moins un – substrat donneur par une technique d'imagerie par photoluminescence de manière à extraire une cartographie de la face avant, dite première cartographie, répertoriant les défauts primaires identifiés comme étant de type micro-trou, de type complexe de fautes d'empilement en étoile ou de type défaut ponctuel ;

[0018] **3)** le transfert d'une couche mince, issue d'une couche superficielle du – au moins un – substrat donneur, sur un substrat support en carbure de silicium polycristallin, pour obtenir une structure composite et un substrat donneur résiduel ;

[0019] **4)** l'inspection d'une surface libre de la couche mince de la structure composite par une technique d'inspection de défauts par diffusion d'un faisceau laser ultra-violet, de manière à extraire une cartographie de la surface libre, dite deuxième cartographie, répertoriant des défauts, dits défauts secondaires ;

- [0020] 5) la gradation de la structure composite, incluant une comparaison de la première cartographie et de la deuxième cartographie.
- [0021] Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison techniquement réalisable :
- l'étape 2) comprend les sous-étapes suivantes :
 - i) l'inspection d'une face avant du substrat donneur pour détecter les défauts primaires, du fait de variations locales d'intensité d'un signal de photoluminescence émis par la face avant suite à une excitation par un faisceau incident, et pour former, pour chaque défaut primaire, une image par photoluminescence,
 - ii) l'attribution à chaque défaut primaire détecté d'un type labellisé de défaut avec un certain niveau de similarité, grâce à un algorithme de reconnaissance d'images, entraîné sur différents types de défauts susceptibles d'être présents sur la face avant d'un substrat donneur en carbure de silicium monocristallin, tels que des micro-trous, des complexes de fautes d'empilement en étoile et des défauts ponctuels notamment liés à des inclusions, un niveau de contraste étant associé à l'image par photoluminescence de chaque défaut primaire détecté,
 - iii) la classification de chaque défaut primaire par application des conditions suivantes :
 - si le type labellisé de défaut est micro-trou et si le niveau de similarité est supérieur à un premier niveau, le défaut primaire est classé comme défaut critique de type micro-trou,
 - si le type labellisé de défaut est complexe de fautes d'empilement en étoile et si le niveau de similarité est supérieur à un deuxième niveau, le défaut primaire est classé comme défaut critique de type complexe de fautes d'empilement en étoile,
 - si le type labellisé de défaut est défaut ponctuel, si le niveau de similarité est supérieur à un troisième niveau, et si le niveau de contraste est supérieur à un seuil prédéterminé, le défaut primaire est classé comme défaut critique de type défaut ponctuel,
 - dans les autres cas, le défaut primaire est classé comme défaut non critique.
 - l'étape d'inspection i) est réalisée avec un faisceau incident de longueur d'onde 313nm et le signal de photoluminescence émis est collecté dans une plage de longueurs d'onde allant de 700nm à 1000nm ;
 - le seuil prédéterminé est établi empiriquement pour un type de substrat donneur, sur la base d'une étude de corrélation entre la valeur de contraste de défauts primaires détectés sur une face avant d'un substrat donneur test et

la présence de défauts secondaires sur une couche mince, issue du substrat donneur test, reportée sur un substrat support ;

- un substrat donneur présentant une densité de défauts primaires, classés comme défauts critiques quel que soit le type, supérieure à 1 défaut/cm², voire préférentiellement supérieure à 0,25 défaut/cm², est déclassé à l'issue de l'étape 2) et n'est pas utilisé pour l'étape 3) ;
- l'étape 5) comprend une réconciliation entre les défauts primaires classés comme défauts critiques et les défauts secondaires, chaque défaut primaire classé comme défaut critique et non associé à un défaut secondaire étant ajouté aux défauts de la deuxième cartographie pour être pris en compte dans une décision de gradation ;
- la décision de gradation correspond à un déclassement de la structure composite si cette dernière comporte :
 - une densité de défauts secondaires associés à des défauts primaires critiques et de défauts primaires classés comme défauts critiques ajoutés à la deuxième cartographie, supérieure à 0,25 défauts/cm², et/ou
 - une densité de défauts secondaires uniquement détectés sur la deuxième cartographie, non associés à des défauts primaires critiques, supérieure à 0,2 défauts/cm² ;
- l'étape 5) comprend une réconciliation entre les défauts primaires classés comme défauts critiques et les défauts secondaires, et l'étape 5) comprend un contrôle complémentaire par une technique couplant microscopie optique en lumière visible et imagerie par photoluminescence, permettant de vérifier si des défauts sont présents dans la couche mince, aux emplacements desdits défauts primaires classés comme défauts critiques ;
- l'étape 3) comprend les sous-étapes suivantes :
 - 3a)** l'implantation d'espèces légères dans un substrat donneur, pour former un plan fragile enterré délimitant, avec une face avant du substrat donneur, la couche superficielle à transférer ;
 - 3b)** l'assemblage d'un substrat support en carbure de silicium polycristallin avec le substrat donneur implanté à l'étape 3a) ;
 - 3c)** la séparation le long du plan fragile enterré pour former une structure composite intermédiaire comprenant la couche superficielle après transfert et le substrat support, d'une part, et le reste du substrat donneur, dit substrat donneur résiduel, d'autre part ;

- 3d)** l'application de traitements thermique(s), mécanique(s) et/ou chimique(s) à une surface libre de la couche superficielle, pour former la structure composite munie de la couche mince en carbure de silicium monocristallin ;
- dans la structure composite, la couche mince comprend une face enterrée disposée en vis-à-vis du substrat support, correspondant à la face avant du substrat donneur, et une autre face, opposée à la face avant, correspondant à une surface libre de ladite couche ; et un retournement miroir est appliqué à la première cartographie ou à la deuxième cartographie pour les comparer ;
 - l'étape 3) comprend les sous-étapes suivantes :
- [0022] 3i) l'implantation d'espèces légères dans un substrat donneur, pour former un plan fragile enterré délimitant, avec une face avant du substrat donneur, la couche superficielle à transférer ;
- [0023] 3ii) l'assemblage d'un substrat temporaire avec le substrat donneur implanté à l'étape 3i), via une première interface de collage,
- [0024] 3iii) la séparation le long du plan fragile enterré pour former un ensemble intermédiaire comprenant la couche superficielle après transfert et le substrat temporaire, d'une part, et le reste du substrat donneur, dit substrat donneur résiduel, d'autre part,
- [0025] 3iv) l'application de traitements thermique(s), mécanique(s) et/ou chimique(s) à une surface libre de la couche superficielle, pour former une structure temporaire munie de la couche mince en carbure de silicium monocristallin disposée sur le substrat temporaire,
- [0026] 3v) l'assemblage d'un substrat support en carbure de silicium polycristallin avec la couche mince de la structure temporaire, via une deuxième interface de collage ;
- [0027] 3vi) le démontage le long de la première interface de collage pour séparer le substrat temporaire de la structure composite munie de la couche mince en carbure de silicium monocristallin ;
- le procédé de fabrication comprend une étape 6) de recyclage du substrat donneur résiduel pour en faire un substrat donneur recyclé, et dans lequel :
 - le substrat donneur recyclé est introduit directement à l'étape 3) en tant que substrat donneur, et
 - à l'étape 4) suivante, la gradation de la structure composite résultante utilise la première cartographie établie pour le substrat donneur initial dont est issu le substrat donneur recyclé.
- [0028] L'invention concerne également un procédé comprenant les étapes suivantes :
- [0029] **1)** la fourniture d'au moins un substrat donneur en carbure de silicium monocristallin, ayant une face avant et une face arrière, la face avant présentant

potentiellement des défauts, dits défauts primaires, qui sont traversants et existent également sur la face arrière ;

- [0030] 2) le contrôle de la qualité du – au moins un – substrat donneur par une technique d'imagerie par photoluminescence de manière à extraire une cartographie de la face arrière, dite première cartographie, répertoriant les défauts primaires identifiés comme étant de type micro-trou, de type complexe de fautes d'empilement en étoile ou de type défaut ponctuel ;
- [0031] 3) le transfert d'une couche mince, issue d'une couche superficielle du – au moins un – substrat donneur du côté de sa face avant, sur un substrat support en carbure de silicium polycristallin, pour obtenir une structure composite et un substrat donneur résiduel ;
- [0032] 4) l'inspection d'une surface libre de la couche mince de la structure composite par une technique d'inspection de défauts par diffusion d'un faisceau laser ultra-violet, de manière à extraire une cartographie de la surface libre, dite deuxième cartographie, répertoriant des défauts, dits défauts secondaires ;
- [0033] 5) la gradation de la structure composite, incluant une comparaison de la première cartographie et de la deuxième cartographie.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

- [0034] 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 :
- [0035] [Fig.1] La [Fig.1] présente un substrat donneur, une structure composite sans et avec couche épitaxiale ;
- [0036] [Fig.2a]
- [0037] [Fig.2b]
- [0038] [Fig.2c]
- [0039] [Fig.2d] La [Fig.2a], la [Fig.2b], la [Fig.2c] et la [Fig.2d] présentent des exemples d'une étude de corrélation, faite sur un équipement de type SICA88, entre des défauts primaires présents sur une face avant d'un substrat donneur et des défauts secondaires associés, présents sur la face libre d'une couche mince dans une structure composite ; les défauts primaires sont imagés par microscopie par photoluminescence ; ils donnent lieu à des défauts secondaires lorsqu'ils présentent une valeur de contraste supérieure à un seuil prédéterminé ; les défauts secondaires sont imagés par microscopie optique confocale à prisme de Nomarski ;
- [0040] [Fig.3a]
- [0041] [Fig.3b]
- [0042] [Fig.3c]
- [0043] [Fig.3d]

- [0044] [Fig.3e]
- [0045] [Fig.3f] Les figures 3a, 3b, 3c, 3d, 3e et 3f présentent des étapes d'un procédé de fabrication d'une structure composite conforme à la présente invention ;
- [0046] [Fig.4] La [Fig.4] présente une cartographie (première cartographie) répertoriant les défauts primaires d'un substrat donneur, à l'étape 2) du procédé conforme à l'invention ;
- [0047] [Fig.5a]
- [0048] [Fig.5b] La [Fig.5a] et la [Fig.5b] présentent deux exemples de cartographie (deuxième cartographie) répertoriant les défauts secondaires d'une structure composite (la couche mince étant issue du substrat donneur dont la première cartographie est également illustrée sur les figures), à l'étape 4) du procédé conforme à l'invention ;
- [0049] [Fig.6a]
- [0050] [Fig.6b]
- [0051] [Fig.6c]
- [0052] [Fig.6d]
- [0053] [Fig.6e]
- [0054] [Fig.6e']
- [0055] [Fig.6e''] Les figures 3a, 3b, 3c, 3d, 3e, 3e' et 3e'' présentent des étapes d'un mode de réalisation alternatif du procédé de fabrication d'une structure composite conforme à la présente invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

- [0056] L'invention concerne un procédé de fabrication d'une structure composite 100 comprenant une couche mince 10 en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support 20 en carbure de silicium polycristallin. Il sera bien sûr compris que, même si la description ne mentionne que la fabrication d'une structure composite 100 pour des raisons de lisibilité, le procédé s'applique à la fabrication d'une pluralité de structures composites 100.
- [0057] Dans la description à suivre, nous nommerons par convention « défauts primaires » les défauts présents sur et/ou dans un substrat donneur 1 dont est issue la couche mince 10, « défauts secondaires » les défauts présents sur et/ou dans la couche mince d'une structure composite 100, et « défauts tertiaires » les défauts présents sur et/ou dans la couche épitaxiale crue sur la couche mince 10.
- [0058] Dans un plan principal (x,y), le substrat donneur 1 et la structure composite 100 se présentent préférentiellement sous la forme de plaquettes circulaires (« wafer » selon la terminologie anglo-saxonne) de diamètre de 100mm, 150mm, 200mm, voire plus. Ils pourraient néanmoins se présenter sous toute autre forme permettant leur traitement ultérieur pour la fabrication de composants. L'épaisseur des substrat et structures

s'étend selon l'axe z sur la [Fig.1]. Ce sont les faces avant 1a, 10a, 150a du substrat 1 et de la structure 100 qui sont inspectés et susceptibles de comporter les défauts susmentionnés.

- [0059] Le procédé de fabrication comprend une **première étape 1)** de fourniture d'un substrat donneur 1 en carbure de silicium monocristallin. Le SiC monocristallin peut être de polytype 4H, 6H ou 3C. Le substrat donneur 1 se présente préférentiellement sous la forme d'une plaquette de diamètre identique à ou très proche de celui du substrat support 20 avec lequel il sera ultérieurement assemblé, et d'épaisseur comprise typiquement entre 300 μm et 800 μm . Il présente une face avant 1a et une face arrière 1b ([Fig.3a]). La rugosité de surface de la face avant 1a est avantageusement choisie inférieure à 1nm RMS, voire inférieure à 0,5nm RMS, mesurée par microscopie à force atomique (AFM) sur un scan de 20 μm x 20 μm . Le type de dopage et la résistivité du substrat donneur 1 sont définis en fonction de l'application et des dispositifs visés. Préférentiellement, la face avant 1a est une face « carbone » [000-1], pour procurer, après le transfert, une couche mince 10 avec une face avant 10a de type « silicium » [0001] dans la structure composite 100.
- [0060] Même s'il est énoncé à l'étape 1) la fourniture d'un substrat donneur 1, il peut bien sûr être fourni à cette étape une pluralité de substrats donneurs 1, dans un cadre industriel.
- [0061] La **deuxième étape 2)** du procédé comprend le contrôle de la qualité du – au moins un – substrat donneur 1 par une technique d'imagerie par photoluminescence de manière à extraire une cartographie de la face avant 1a, dite première cartographie, répertoriant les défauts primaires identifiés comme étant de type micro-trou, de type complexe de fautes d'empilement en étoile et de type défaut ponctuel (par exemple, défaut lié à une inclusion d'espèce). En effet, la demanderesse a identifié que ces types de défauts pouvaient constituer des défauts critiques qui génèrent des défauts secondaires problématiques dans la couche mince 10 de la structure composite 100.
- [0062] Les défauts primaires d'un substrat donneur 1 sont rendus visibles en imagerie par photoluminescence du fait de variations locales d'intensité d'un signal de photoluminescence (PL) émis par la face avant 1a, à la suite d'une excitation par un faisceau incident. Les variations locales d'intensité du signal PL traduisent des propriétés modifiées du matériau (contraintes, rugosité, planéité...), correspondant au défaut primaire. Ce dernier peut apparaître sur l'image PL générée, sous forme de tache(s) blanche(s) ou noire(s) selon ses caractéristiques.
- [0063] Cette étape de contrôle peut être opérée sur un équipement connu, par exemple SICA88 (société Lasertec) ou « Photoluminescence scanner » (société Intego) ou encore « MiPlato SiC » (société EtaMax). Ces équipements utilisent classiquement la combinaison d'une image en microscopie optique en lumière visible et de l'image en

photoluminescence du même défaut pour attribuer des critères dimensionnels (taille, surface) et d'intensité (contraste) à partir des signaux du microscope optique et de photoluminescence mesuré ; ils peuvent également attribuer un critère de typologie (classes prédéfinies de défauts) à chacun des défauts primaires, sur la base, par exemple, d'un algorithme d'apprentissage. Les classes prédéfinies correspondent typiquement à des défauts de type micro-trou (« micro-pipe »), complexe de fautes d'empilement en étoile, défaut ponctuel (notamment liés à des inclusions), rayure, particule, etc.

[0064] De manière avantageuse, l'étape 2) comprend les trois sous-étapes décrite ci-après :

i. L'inspection de la face avant 1a du substrat donneur 1 :

[0065] Cette étape vise à détecter les défauts primaires, du fait de variations locales d'intensité d'un signal de photoluminescence émis par la face avant 1a suite à une excitation par un faisceau incident, et à former, pour chaque défaut primaire, une image par photoluminescence. Dans un équipement SICA88, qui sera privilégié dans la suite de cette description, le faisceau incident d'excitation présente une longueur d'onde de 313nm et le signal de photoluminescence émis est collecté dans une plage de longueurs d'onde allant de 700nm à 1000nm.

i. L'attribution à chaque défaut primaire détecté d'un type labellisé de défaut :

[0066] Un algorithme de reconnaissance d'images, basé par exemple sur un modèle de type SSD (« Single Shot Detector » selon la terminologie anglosaxonne, en français : détecteur à prise unique) pour la détection d'objets, est alimenté et entraîné sur différents types de défauts susceptibles d'être présents sur la face avant 1a d'un substrat donneur 1 en carbure de silicium monocristallin, tels que des micro-trous, des complexes de fautes d'empilement en étoile et des défauts ponctuels notamment liés à des inclusions (types de défaut labellisés). L'équipement peut ainsi attribuer à chaque défaut primaire détecté un type labellisé de défaut, avec un certain niveau de similarité. Un niveau de contraste est en outre associé à l'image par photoluminescence de chaque défaut primaire détecté.

i. La classification de chaque défaut primaire par application des conditions suivantes :

- si le type labellisé de défaut est micro-trou et si le niveau de similarité est supérieur à un premier niveau, le défaut primaire est classé comme défaut critique de type micro-trou,
- si le type labellisé de défaut est complexe de fautes d'empilement en étoile et si le niveau de similarité est supérieur à un deuxième niveau, le défaut primaire est classé comme défaut critique de type complexe de fautes d'empilement en étoile,
- si le type labellisé de défaut est défaut ponctuel, si le niveau de similarité est supérieur à un troisième niveau, et si le niveau de contraste est supérieur à un

seuil prédéterminé, le défaut primaire est classé comme défaut critique de type défaut ponctuel,

– dans les autres cas, le défaut primaire est classé comme défaut non critique.

[0067] Les premier, deuxième et troisième niveaux de similarité peuvent être différents entre eux, car dépendant de la typologie du défaut et du nombre de défauts de chaque type utilisé pour entraîner l'algorithme de reconnaissance d'images.

[0068] Le seuil prédéterminé de contraste peut être établi empiriquement pour un type de substrat donneur 1 donné (fournisseur, structure cristalline, rugosité de la face avant, technique de fabrication...), sur la base d'une étude de corrélation entre la valeur de contraste de défauts primaires détectés sur une face avant 1a d'un (ou préférentiellement de plusieurs) substrat(s) donneur(s) test(s) et la présence de défauts secondaires sur une (ou préférentiellement une pluralité de) couche(s) mince(s) 10, issue(s) du (ou des) substrat(s) donneur(s) test(s), reportée sur un substrat support 20.

[0069] Le tableau de la [Fig.2a] montre la corrélation qui peut être observée entre un défaut primaire critique ([Fig.2a] (a)) sur un substrat donneur 1 et un défaut secondaire ([Fig.2a] (b)) induit dans la couche mince 10 issue de ce substrat 1.

[0070] Les tableaux des figures 2b, 2c et 2d montrent que tous les défauts primaires détectés sur un substrat donneur 1 ne donnent pas lieu à des défauts secondaires dans la couche mince 10 reportée, et qu'il est donc requis de définir des critères pour classer correctement ces défauts primaires en défauts critiques ou non critiques. En plus du niveau de similarité appliqué à chaque défaut primaire associé à un type labellisé de défaut, le niveau de contraste de l'image en photoluminescence est un critère important, en particulier pour juger de la criticité des défauts ponctuels, car ces défauts peuvent présenter une large gamme de contrastes, de faible à fort. C'est la raison pour laquelle un seuil prédéterminé de contraste est utilisé, pour séparer les défauts critiques des défauts non critiques. Dans l'exemple de la [Fig.2b], le seuil de contraste prédéterminé est défini à 600 u.a. Ce seuil dépend bien évidemment des paramètres de la recette, des caractéristiques du substrat support 1 (rugosité, dopage, contrainte résiduelle, méthode d'élaboration, etc) et une valeur universelle ne peut en aucun cas être proposée.

[0071] Pour les défauts de type micro-trou ou complexe de fautes d'empilement en étoile, le niveau de similarité est souvent suffisant car ces défauts ont une signature très spécifique et un contraste associé élevé. L'image par photoluminescence peut également être associée à l'image de ces défauts en microscopie optique, pour améliorer encore leur classification.

[0072] Rappelons que le contraste sur une image par photoluminescence peut être défini comme la différence normalisée entre une intensité du signal de photoluminescence au niveau du défaut primaire et une intensité environnante dans un champ inférieur

ou égal à la taille de champ du microscope. D'autres calculs de la valeur du contraste donneraient des résultats numériques et un seuil de contraste prédéterminé différents, mais avec une signification similaire.

- [0073] L'exemple d'une première cartographie est donné sur la [Fig.4] : elle répertorie les défauts primaires détectés sur un substrat donneur 1 et classés comme défauts critiques (notamment de type complexe de fautes d'empilement en étoile, micro-trou ou défaut ponctuel de type inclusion d'espèce) ; un autre défaut, classé comme non critique est illustré en haut à gauche de la [Fig.4].
- [0074] Selon un mode de réalisation avantageux, à l'étape 2) du procédé selon l'invention, un substrat donneur 1 présentant une densité de défauts primaires, classés comme défauts critiques quel que soit le type, supérieure à 1 défaut/cm², voire supérieure à 0,25 défaut/cm², est déclassé à l'issue de l'étape 2) et n'est pas utilisé pour l'étape 3) ultérieure.
- [0075] Le procédé de fabrication comprend ensuite une **troisième étape 3)** de transfert d'une couche mince 10, issue d'une couche superficielle 10' du substrat donneur 1, sur un substrat support 20 en carbure de silicium polycristallin, pour obtenir la structure composite 100 et un substrat donneur résiduel 1' dépourvu de la couche superficielle 10'. Dans la structure composite 100, la face avant 1a du substrat donneur 1 est ainsi disposée en vis-à-vis d'une face avant 20a du substrat support 20, et elle correspond à une face enterrée de la couche mince 10, qui n'est pas accessible pour une inspection de surface ; l'autre face 10a de la couche mince 10, opposée à la face enterrée (face avant 1a) est libre et sera inspectée à l'étape suivante.
- [0076] Avantagusement, la couche superficielle 10' est transférée par une technique de report de couche mince telle que Smart Cut. Une première sous-étape 3a) comprend l'implantation d'espèces légères dans un substrat donneur 1, pour former un plan fragile enterré 11 délimitant, avec une face avant 1a du substrat donneur 1, la couche superficielle à transférer 10' ([Fig.3b]). Les espèces légères sont préférentiellement de l'hydrogène et/ou de l'hélium, et sont implantées dans le substrat donneur 1, à une profondeur cohérente avec l'épaisseur de la couche mince 10 visée. Ces espèces légères vont former, autour de la profondeur déterminée, des microcavités distribuées dans une fine couche parallèle à la surface libre 1a du substrat donneur 1, soit parallèle au plan (x,y) sur les figures. On appelle cette fine couche le plan fragile enterré 11, par souci de simplification. L'énergie d'implantation des espèces légères est choisie de manière à atteindre la profondeur déterminée. Par exemple, des ions hydrogène seront implantés à une énergie comprise entre 10 keV et 250 keV, et à une dose comprise entre 5^E16/cm² et 1^E17/cm², pour délimiter une couche mince 10 présentant une épaisseur de l'ordre de 100nm à 1500nm. Notons qu'une couche de protection

pourra être déposée sur la face avant 1a du substrat donneur 1, préalablement à l'étape d'implantation ionique. Cette couche de protection peut être composée par un matériau tel que l'oxyde de silicium ou le nitrure de silicium par exemple. Elle peut être retirée préalablement à la sous-étape suivante 3b). Cette dernière correspond à l'assemblage d'un substrat support 20 en carbure de silicium polycristallin, du côté de sa face avant 20a, avec le substrat donneur 1 implanté, également du côté de sa face avant 1a ([Fig.3c]). Le substrat support 20 correspond au support mécanique de la future structure composite 100. Les dimensions latérales dans le plan principal (x,y) du substrat support 20 (son diamètre en particulier) sont les mêmes que celles de la structure composite 100. Le substrat support 20 présente une épaisseur typiquement comprise entre environ 50 μm et plusieurs centaines de micromètres, par exemple entre 50 μm et 650 μm , ou entre 100 μm et 450 μm , ou encore entre 200 μm et 350 μm .

[0077] L'assemblage est fait par collage direct, par adhésion moléculaire, le long d'une interface de collage 40. Optionnellement, une couche intermédiaire peut être formée sur la face avant 1a du substrat donneur 1, avant ou après l'introduction des espèces légères, et en tout état de cause, avant la phase d'assemblage. Cette couche intermédiaire peut être en un matériau diélectrique, semi-conducteur ou métallique (tel que par exemple oxyde de silicium, silicium, carbure de silicium, tungstène, titane, etc). De manière optionnelle, une couche intermédiaire peut également être déposée sur la face 20a à assembler du substrat support 20, préalablement à l'assemblage ; elle peut être choisie de même nature ou de nature différente de la couche intermédiaire évoquée pour le substrat donneur 1. Une couche intermédiaire peut éventuellement être déposée sur l'un et l'autre des deux substrats 1,20 à assembler. L'objectif de la (ou des) couche(s) intermédiaire(s) est essentiellement de favoriser l'énergie de collage (notamment dans la gamme de températures inférieures à 1100°C), du fait de la formation de liaisons covalentes à plus basses températures que dans le cas de deux surfaces SiC assemblées directement ; un autre avantage de cette(ces) couche(s) intermédiaire(s) peut être d'améliorer la conduction électrique verticale de l'interface de collage 40. La (ou les) couche(s) intermédiaire(s) est(sont) destinée(s) à être enterrée(s) dans l'ensemble collé 50 après assemblage, et à terme, dans la structure composite 100.

[0078] Le collage direct par adhésion moléculaire ne nécessite pas une matière adhésive, car des liaisons s'établissent à l'échelle atomique entre les surfaces assemblées. Plusieurs types de collage par adhésion moléculaire existent, qui diffèrent notamment par leurs conditions de température, de pression, d'atmosphère ou de traitements préalables à la mise en contact des surfaces. On peut citer le collage à température ambiante avec ou sans activation préalable par plasma des surfaces à assembler, le collage par diffusion atomique (« Atomic diffusion bonding » ou ADB selon la terminologie

anglo-saxonne), le collage avec activation de surface (« Surface-activated bonding » ou SAB), etc.

- [0079] Rappelons que l'étape 3b) d'assemblage peut comprendre, préalablement à la mise en contact des faces 1a,20a à assembler, des séquences classiques de nettoyages par voie chimique (par exemple, nettoyage RCA), d'activation de surface (par exemple, par plasma oxygène ou azote) ou autres préparations de surface (telles que le nettoyage par brossage (« scrubbing »)), susceptibles de favoriser la qualité de l'interface de collage 40 (faible défektivité, forte énergie d'adhésion).
- [0080] La sous-étape 3c) suivante correspond à une séparation le long du plan fragile enterré 11 pour former une structure composite intermédiaire 100' comprenant la couche superficielle 10' après transfert et le substrat support 20, d'une part, et le reste du substrat donneur 1', d'autre part ([Fig.3d]). La séparation le long du plan fragile enterré 11 s'opère habituellement par l'application d'un traitement thermique à une température comprise entre 800°C et 1200°C. Un tel traitement thermique induit le développement des cavités et microfissures dans le plan fragile enterré 11, et leur mise sous pression par les espèces légères présentes sous forme gazeuse, jusqu'à la propagation d'une fracture le long dudit plan fragile 11. Alternativement ou conjointement, une sollicitation mécanique peut être appliquée à l'ensemble collé 50 et en particulier au niveau du plan fragile enterré 11, de manière à propager ou aider à propager mécaniquement la fracture menant à la séparation. A l'issue de cette séparation, on obtient d'une part la structure composite intermédiaire 100' et le reste 1' du substrat donneur. La surface libre 10'a de la couche superficielle 10' est habituellement rugueuse après séparation : par exemple, elle présente une rugosité comprise entre 5nm et 100nm RMS.
- [0081] La sous-étape suivante 3d) comprend l'application de traitements thermique(s), mécanique(s) et/ou chimique(s) à une surface libre 10'a de la couche superficielle 10', pour former la structure composite 100 munie de la couche mince 10 en carbure de silicium monocristallin présentant une rugosité de surface inférieure ou égale à 0,5nm RMS, voire inférieure ou égale à 0,1nm RMS (scan AFM 10x10 μ m² ou 20x20 μ m²) ([Fig.3e]). En particulier, cette sous-étape 3d) peut comprendre un traitement de lissage mécano-chimique de la surface libre 10'a de la couche superficielle 10'. Un enlèvement compris entre 50nm et 300nm permet de restaurer efficacement l'état de surface de ladite couche. Elle peut également comprendre au moins un traitement thermique à une température comprise entre 1200°C et 1800°C. Un tel traitement thermique est appliqué pour évacuer les espèces légères résiduelles de la couche superficielle 10' et pour favoriser le réarrangement de son réseau cristallin, formant ainsi la couche mince 10. Il permet en outre de renforcer l'interface de collage 40.

- [0082] A ce stade du procédé, la couche mince 10 de la structure composite 100 présente une épaisseur typiquement comprise entre quelques dizaines de nm et quelques centaines de nm, par exemple, entre 50nm et 800nm. Les types et les niveaux de dopage de la couche mince 10 et du substrat support 20 sont définis en fonction des applications et dispositifs visés.
- [0083] Revenant à la description générale du procédé de fabrication selon l'invention, l'étape 3) de transfert de la couche mince 10 sur le substrat support 20 est suivie par une **quatrième étape 4)** d'inspection de la surface libre 10a de ladite couche mince 10 par une technique d'inspection de défauts basée sur l'imagerie en champ sombre et en champ clair associée au balayage de la surface 10a avec un faisceau laser DUV (pour « deep UV », typiquement avec une longueur d'onde de l'ordre de 200-280nm) ; la faisceau laser est diffusé par les défauts proportionnellement à leur taille, ce qui permet la localisation desdits défauts sur la surface 10a et l'estimation de leur dimension. A titre d'exemple, un équipement tel que KLA SPA2 peut être utilisé. Le faisceau laser DUV pénètre très faiblement dans l'épaisseur de la couche mince 10, il n'est donc pas pollué par la présence des grains de p-SiC du substrat support 20. Cette technique permet de détecter les défauts secondaires présents à la surface de la couche mince 10 et de les associer à des défauts connus de la base de données de l'équipement tels que des trous, bulles, rayures, particules, autres défauts ponctuels ou agglomérés, etc.
- [0084] Cette étape d'inspection est largement utilisée dans l'industrie du semiconducteur (en particulier silicium), ce qui en fait une étape compatible avec les standards et exigences de cadence industrielle.
- [0085] Les défauts secondaires peuvent être induits par des défauts primaires (défauts cristallins présents sur le substrat donneur 1 ayant donné lieu à la couche mince 10), par des particules ou autres contaminations de surface qui n'auraient pas été totalement éliminées, avant l'assemblage du substrat donneur 1 et du substrat support 20, ou encore par un problème ponctuel à une étape du procédé de fabrication (rayures, particules déposées, écaillage...). Il peut donc s'agir de défauts d'origine cristalline, ou de défauts liés au transfert tels que des trous (absence locale de couche mince 10), des bulles (défaut à l'interface de collage 40, au niveau duquel la couche mince 10 n'est pas collée et forme une cloque), des particules, des rayures, etc.
- [0086] A l'issue de l'étape 4), une cartographie de la surface libre 10a, dite deuxième cartographie, peut être extraite, répertoriant les défauts secondaires identifiés. Un exemple d'une deuxième cartographie répertoriant les défauts secondaires détectés sur une structure composite 100 dont la couche mince 10 est issue du substrat donneur 1 (première cartographie) est donné sur la [Fig.5a]. Notons que pour comparer la première et la deuxième cartographie, il est requis d'appliquer un retournement « miroir » de la première cartographie, puisque la face avant la substrat donneur 1 est

assemblée sur le substrat support 20, et qu'elle subit donc un retournement. Dans cet exemple, plusieurs défauts primaires classés comme critiques (visibles sur la première cartographie) sont également visibles sur la deuxième cartographie. Un autre exemple est donné sur la [Fig.5b] : ici, plusieurs défauts primaires classés comme critiques et visibles sur la première cartographie, ne ressortent pas sur la deuxième cartographie.

- [0087] L'avantage de cette étape 4) d'inspection est qu'elle est rapide et permet donc un contrôle de 100% de structures composites dans une ligne de production. Cependant, elle est susceptible de ne pas repérer des défauts d'origine cristalline présents dans la couche mince, car certains de ces défauts n'induisent pas de diffusion du faisceau laser UV et demeurent invisibles à cette inspection.
- [0088] A contrario, une technique de contrôle couplant microscopie optique en lumière visible et imagerie par photoluminescence peut permettre de détecter ces défauts d'origine cristalline, mais l'inspection pourra être rendue difficile par la présence des grains de p-SiC sous-jacents et surtout requiert un temps bien plus long de traitement par structure, ce qui est impactant dans une ligne de production à grand volume.
- [0089] Ainsi, la demanderesse a défini une **cinquième étape 5)** de gradation de la structure composite 100 fiable et efficace, basée sur l'utilisation de la première cartographie du substrat donneur 1 (étape 2) dont est issue la couche mince 10 de la structure composite 100 en question, et de la deuxième cartographie de ladite structure 100 (étape 4). Cette gradation vise à séparer les structures entrant dans les spécifications visées et les structures déclassées.
- [0090] La deuxième cartographie est comparée à la première cartographie, en ayant bien sûr pris la précaution d'appliquer un retournement miroir à la première cartographie puisque le substrat donneur 1, collé sur le substrat support 20, a sa face avant 1a (face enterrée de la couche mince 10) retournée. C'est sur la base de cette comparaison qu'est décidée la gradation de la structure composite 100.
- [0091] Avantagusement, l'étape 5) comprend une réconciliation entre les défauts primaires classés comme défauts critiques de la première cartographie et les défauts secondaires de la deuxième cartographie. Une telle réconciliation est possible car les première et deuxième cartographies sont établies dans un même repère orthonormé, et chaque point de l'une ou l'autre des cartographies est repéré par un système de coordonnées cartésiennes ou polaires par exemple. Lorsqu'un défaut primaire classé comme défaut critique ne peut pas être associé à un défaut secondaire, car aucun défaut n'est détecté sur la deuxième cartographie, à l'emplacement dudit défaut primaire, un défaut supplémentaire est ajouté aux défauts de la deuxième cartographie, pour être pris en considération dans la décision de gradation. Les défauts primaires identifiés comme critiques (c'est-à-dire générateurs de défauts dans la couche mince transférée), sont ainsi considérés pour l'évaluation de la qualité des structures composites 100, sans

pour autant nécessiter une inspection, complexe et consommatrice de temps en final, sur les structures composites 100.

- [0092] Selon une variante, l'étape 5) comprend une réconciliation entre les défauts primaires classés comme défauts critiques et les défauts secondaires, et si un grand nombre de défauts primaires classés comme défauts critiques ne sont pas, chacun, associés à un défaut secondaire, l'étape 5) comprend un contrôle complémentaire de la structure composite 100 en question, par une technique couplant microscopie confocale en lumière visible et imagerie par photoluminescence, permettant de vérifier si des défauts sont effectivement présents dans la couche mince 10 aux emplacements desdits défauts primaires critiques.
- [0093] L'étape de gradation 5) du procédé de fabrication selon l'invention permet de décider de manière fiable et efficace le grade à attribuer aux structures composites 100, en bénéficiant d'un contrôle des substrats donneurs 1 précis et adapté au domaine du transfert de couches, en réalisant un contrôle de qualité rapide et standardisé en final sur toutes les structures composites 100, et en combinant l'enseignement de ces deux contrôles.
- [0094] En particulier, une structure composite 100 peut être déclassée si elle présente :
- une densité de défauts secondaires associés à des défauts primaires critiques et de défauts primaires classés comme défauts critiques ajoutés à la deuxième cartographie, supérieure à $0,25$ défauts/cm², et/ou
 - une densité de défauts secondaires uniquement détectés sur la deuxième cartographie (c'est-à-dire non associés à des défauts primaires critiques) supérieure à $0,2$ défauts/cm².
- [0095] Dans une étape ultérieure, une croissance par épitaxie de SiC peut être opérée sur la couche mince 10 des structures composites 100 ayant passé positivement l'étape 5) de gradation, afin d'augmenter l'épaisseur de cette dernière et former la couche épitaxiée 150 sur et dans laquelle les dispositifs seront élaborés ([Fig.3f]). L'étape de croissance épitaxiale pourra être faite selon les techniques connues de l'état de la technique.
- [0096] Le procédé de fabrication peut également comprendre une sixième étape 6) de recyclage du substrat donneur résiduel 1' pour en faire un substrat donneur recyclé. L'étape 6) peut comprendre des traitements mécaniques et/ou chimiques, similaires à ceux appliqués à la structure composite 100, mis en œuvre au niveau de la face avant 1'a du substrat donneur résiduel 1'.
- [0097] Le substrat donneur recyclé est ensuite directement introduit à l'étape 3) en tant que nouveau substrat donneur 1. A l'étape 5), la gradation de la structure composite 100 résultante utilise la première cartographie (étape 2) établie pour le substrat donneur 1 initial dont est issu le substrat donneur recyclé.

- [0098] La première cartographie traduisant la qualité du substrat donneur initial 1 est donc mise à profit pour grader chaque structure composite 100 issue de ce substrat 1, dans son état initial et après une pluralité de recyclages. Bien que ce contrôle soit consommateur de temps, il est industriellement viable car amorti sur un très grand nombre de structure composites 100 fabriquées à partir du substrat donneur 1.
- [0099] Le procédé de fabrication a été décrit avec une étape 3) de transfert de la couche mince 10 sur le substrat support 20, sans manipulation intermédiaire, que l'on peut nommer simple transfert.
- [0100] Selon un mode de réalisation alternatif, l'étape 3) peut consister en un double transfert, illustré sur les figures 6a à 6f, au cours duquel la couche mince 10 est d'abord transférée du substrat donneur 1 sur un substrat temporaire 30, via une première interface de collage 60 (figures 6a, 6b, 6c, 6d, 6e), puis transférée une seconde fois du substrat temporaire 30 sur le substrat support 20 (figures 6e', 6e''), via une deuxième interface de collage 40.
- [0101] L'étape 3) peut ainsi comprendre les sous-étapes suivantes :
- [0102] **3i)** l'implantation d'espèces légères dans un substrat donneur 1, pour former un plan fragile enterré 11 délimitant, avec une face avant 1a du substrat donneur 1, la couche superficielle 10' à transférer ;
- [0103] **3ii)** l'assemblage d'un substrat temporaire 30 avec le substrat donneur 1 implanté à l'étape 3i), via une première interface de collage 60,
- [0104] **3iii)** la séparation le long du plan fragile enterré 11 pour former un ensemble intermédiaire comprenant la couche superficielle 10' après transfert et le substrat temporaire 30, d'une part, et le reste 1' du substrat donneur, dit substrat donneur résiduel 1', d'autre part,
- [0105] **3iv)** l'application de traitements thermique(s), mécanique(s) et/ou chimique(s) à une surface libre 10'a de la couche superficielle 10', pour former une structure temporaire munie de la couche mince 10 en carbure de silicium monocristallin disposée sur le substrat temporaire 30,
- [0106] **3v)** l'assemblage d'un substrat support 20 en carbure de silicium polycristallin avec la couche mince 10 de la structure temporaire, via une deuxième interface de collage 40 ;
- [0107] **3vi)** le démontage le long de la première interface de collage 60 pour séparer le substrat temporaire 30 de la structure composite 100 munie de la couche mince 10 en carbure de silicium monocristallin.
- [0108] La première interface de collage 60 peut être basée sur un collage par adhésion moléculaire, de même que la deuxième interface 40. Le substrat temporaire 30 peut être choisi en tout matériau compatible avec un collage direct, notamment le silicium,

le carbure de silicium, etc. Le retrait du substrat temporaire 30 peut être opéré par démontage mécanique, par exemple.

- [0109] La structure composite 100, obtenue dans ce mode de réalisation alternatif, comprend une couche mince 10 dont la surface libre 10b correspond à la face avant 1a du substrat donneur 1, compte tenu du double transfert.
- [0110] Ainsi, à l'étape 5) de gradation de la structure composite 100, la comparaison de la première cartographie et de la deuxième cartographie peut être effectuée sans retournement miroir.
- [0111] Selon un autre mode de réalisation particulier, faisant intervenir un simple transfert à l'étape 3), le procédé peut comprendre les étapes suivantes :
- [0112] **1)** la fourniture d'au moins un substrat donneur 1 en carbure de silicium monocristallin, ayant une face avant 1a et une face arrière 1b, la face avant 1a présentant potentiellement des défauts, dits défauts primaires, qui sont traversants et existent également sur la face arrière 1b ;
- [0113] **2)** le contrôle de la qualité du – au moins un – substrat donneur 1 par une technique d'imagerie par photoluminescence de manière à extraire une cartographie de la face arrière 1b, dite première cartographie, répertoriant les défauts primaires identifiés comme étant de type micro-trou, de type complexe de fautes d'empilement en étoile ou de type défaut ponctuel ;
- [0114] **3)** le transfert d'une couche mince 10, issue d'une couche superficielle 10' du – au moins un – substrat donneur 1 du côté de sa face avant 1a, sur un substrat support 20 en carbure de silicium polycristallin, pour obtenir une structure composite 100 et un substrat donneur résiduel 1' ;
- [0115] **4)** l'inspection d'une surface libre 10a de la couche mince 10 de la structure composite 100 par une technique d'inspection de défauts par diffusion d'un faisceau laser ultra-violet, de manière à extraire une cartographie de la surface libre 10a, dite deuxième cartographie, répertoriant des défauts, dits défauts secondaires ;
- [0116] **5)** la gradation de la structure composite 100, incluant une comparaison de la première cartographie et de la deuxième cartographie.
- [0117] Selon ce mode de réalisation particulier, le contrôle de la qualité du substrat donneur 1 est opéré sur sa face arrière 1b, considérant que les défauts primaires critiques sont majoritairement traversants et seront par conséquent détectables en face arrière 1b, comme en face avant 1a. A l'étape 5), la comparaison de la première cartographie et de la deuxième cartographie peut être effectuée sans retournement miroir.
- [0118] Notons que les détails génériques des étapes 1) à 5) énoncés dans cette description dans le cas d'un transfert simple peuvent s'appliquer à ce mode de réalisation particulier, ainsi qu'au mode de réalisation alternatif basé sur un double transfert.

[0119] 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

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de fabrication d'une structure composite (100)

comprenant une couche mince (10) en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support (20) en carbure de silicium polycristallin, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- 1)** la fourniture d'au moins un substrat donneur (1) en carbure de silicium monocristallin, ayant une face avant (1a) et une face arrière (1b), la face avant (1a) présentant potentiellement des défauts, dits défauts primaires ;
- 2)** le contrôle de la qualité du – au moins un – substrat donneur (1) par une technique d'imagerie par photoluminescence de manière à extraire une cartographie de la face avant (1a), dite première cartographie, répertoriant les défauts primaires identifiés comme étant de type micro-trou, de type complexe de fautes d'empilement en étoile ou de type défaut ponctuel ;
- 3)** le transfert d'une couche mince (10), issue d'une couche superficielle (10') du – au moins un – substrat donneur (1), sur un substrat support (20) en carbure de silicium polycristallin, pour obtenir une structure composite (100) et un substrat donneur résiduel (1') ;
- 4)** l'inspection d'une surface libre (10a, 10b) de la couche mince (10) de la structure composite (100) par une technique d'inspection de défauts par diffusion d'un faisceau laser ultra-violet, de manière à extraire une cartographie de la surface libre (10a, 10b), dite deuxième cartographie, répertoriant des défauts, dits défauts secondaires ;
- 5)** la gradation de la structure composite (100), incluant une comparaison de la première cartographie et de la deuxième cartographie.

[Revendication 2]

Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon la revendication 1, dans lequel l'étape 2) comprend les sous-étapes suivantes :

- i) l'inspection d'une face avant (1a) du substrat donneur (1) pour détecter les défauts primaires, du fait de variations locales d'intensité d'un signal de photoluminescence émis par la face avant (1a) suite à une excitation par un faisceau incident, et pour former, pour chaque défaut primaire, une image par photoluminescence,

ii) l'attribution à chaque défaut primaire détecté d'un type labellisé de défaut avec un certain niveau de similarité, grâce à un algorithme de reconnaissance d'images, entraîné sur différents types de défauts susceptibles d'être présents sur la face avant (1a) d'un substrat donneur (1) en carbure de silicium monocristallin, tels que des micro-trous, des complexes de fautes d'empilement en étoile et des défauts ponctuels notamment liés à des inclusions, un niveau de contraste étant associé à l'image par photoluminescence de chaque défaut primaire détecté,

iii) la classification de chaque défaut primaire par application des conditions suivantes :

- si le type labellisé de défaut est micro-trou et si le niveau de similarité est supérieur à un premier niveau, le défaut primaire est classé comme défaut critique de type micro-trou,
- si le type labellisé de défaut est complexe de fautes d'empilement en étoile et si le niveau de similarité est supérieur à un deuxième niveau, le défaut primaire est classé comme défaut critique de type complexe de fautes d'empilement en étoile,
- si le type labellisé de défaut est défaut ponctuel, si le niveau de similarité est supérieur à un troisième niveau, et si le niveau de contraste est supérieur à un seuil prédéterminé, le défaut primaire est classé comme défaut critique de type défaut ponctuel,
- dans les autres cas, le défaut primaire est classé comme défaut non critique.

- [Revendication 3] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon la revendication 2, dans lequel l'étape d'inspection i) est réalisée avec un faisceau incident de longueur d'onde 313nm et le signal de photoluminescence émis est collecté dans une plage de longueurs d'onde allant de 700nm à 1000nm.
- [Revendication 4] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 2 et 3, dans lequel le seuil prédéterminé est établi empiriquement pour un type de substrat donneur (1), sur la base d'une étude de corrélation entre la valeur de contraste de défauts primaires détectés sur une face avant (1a) d'un substrat donneur (1) test et la présence de défauts secondaires sur une couche mince (10), issue du substrat donneur test, reportée sur un substrat support (20).
- [Revendication 5] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 2 à 4, dans lequel un substrat donneur (1)

présentant une densité de défauts primaires, classés comme défauts critiques quel que soit le type, supérieure à 1 défaut/cm², voire préférentiellement supérieure à 0,25 défaut/cm², est déclassé à l'issue de l'étape 2) et n'est pas utilisé pour l'étape 3).

- [Revendication 6] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 2 à 5, dans lequel l'étape 5) comprend une réconciliation entre les défauts primaires classés comme défauts critiques et les défauts secondaires, chaque défaut primaire classé comme défaut critique et non associé à un défaut secondaire étant ajouté aux défauts de la deuxième cartographie pour être pris en compte dans une décision de gradation.
- [Revendication 7] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon la revendication 6, dans lequel la décision de gradation correspond à un déclassement de la structure composite si cette dernière comporte :
- une densité de défauts secondaires associés à des défauts primaires critiques et de défauts primaires classés comme défauts critiques ajoutés à la deuxième cartographie, supérieure à 0,25 défauts/cm², et/ou
 - une densité de défauts secondaires uniquement détectés sur la deuxième cartographie, non associés à des défauts primaires critiques, supérieure à 0,2 défauts/cm².
- [Revendication 8] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 2 à 5, dans lequel l'étape 5) comprend une réconciliation entre les défauts primaires classés comme défauts critiques et les défauts secondaires, et l'étape 5) comprend un contrôle complémentaire par une technique couplant microscopie optique en lumière visible et imagerie par photoluminescence, permettant de vérifier si des défauts sont présents dans la couche mince (10), aux emplacements desdits défauts primaires classés comme défauts critiques.
- [Revendication 9] Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'étape 3) comprend les sous-étapes suivantes :
- 3a)** l'implantation d'espèces légères dans un substrat donneur (1), pour former un plan fragile enterré (11) délimitant, avec une face avant (1a) du substrat donneur (1), la couche superficielle (10') à transférer ;

3b) l'assemblage d'un substrat support (20) en carbure de silicium polycristallin avec le substrat donneur (1) implanté à l'étape 3a) ;

3c) la séparation le long du plan fragile enterré (11) pour former une structure composite intermédiaire (100') comprenant la couche superficielle (10') après transfert et le substrat support (20), d'une part, et le reste (1') du substrat donneur, dit substrat donneur résiduel (1'), d'autre part ;

3d) l'application de traitements thermique(s), mécanique(s) et/ou chimique(s) à une surface libre (10'a) de la couche superficielle (10'), pour former la structure composite (100) munie de la couche mince (10) en carbure de silicium monocristallin.

[Revendication 10]

Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, dans la structure composite (100) :

- la couche mince (10) comprend une face enterrée disposée en vis-à-vis du substrat support (20) correspondant à la face avant (1a) du substrat donneur (1), et une autre face, opposée à la face avant (1a), correspondant à une surface libre (10a) de ladite couche (10),
- à l'étape 5), un retournement miroir étant appliqué à la première ou à la deuxième cartographie pour les comparer.

[Revendication 11]

Procédé de fabrication d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 1 à 8, dans lequel l'étape 3) comprend les sous-étapes suivantes :

3i) l'implantation d'espèces légères dans un substrat donneur (1), pour former un plan fragile enterré (11) délimitant, avec une face avant (1a) du substrat donneur (1), la couche superficielle (10') à transférer ;

3ii) l'assemblage d'un substrat temporaire (30) avec le substrat donneur (1) implanté à l'étape 3i), via une première interface de collage (60),

3iii) la séparation le long du plan fragile enterré (11) pour former un ensemble intermédiaire comprenant la couche superficielle (10') après transfert et le substrat temporaire (30), d'une part, et le reste (1') du substrat donneur, dit substrat donneur résiduel (1'), d'autre part,

3iv) l'application de traitements thermique(s), mécanique(s) et/ou chimique(s) à une surface libre (10'a) de la couche superficielle (10'), pour former une structure temporaire munie de la couche

mince (10) en carbure de silicium monocristallin disposée sur le substrat temporaire (30),

3v) l'assemblage d'un substrat support (20) en carbure de silicium polycristallin avec la couche mince (10) de la structure temporaire, via une deuxième interface de collage (40) ;

3vi) le démontage le long de la première interface de collage (60) pour séparer le substrat temporaire (30) de la structure composite (100) munie de la couche mince (10) en carbure de silicium monocristallin.

[Revendication 12]

Procédé de fabrication d'une structure composite selon l'une des revendications précédentes, comprenant une étape 6) de recyclage du substrat donneur résiduel (1') pour en faire un substrat donneur recyclé (1''), et dans lequel :

- le substrat donneur recyclé (1'') est introduit directement à l'étape 3) en tant que substrat donneur (1), et
- à l'étape 4) suivante, la gradation de la structure composite (100) résultante utilise la première cartographie établie pour le substrat donneur (10) initial dont est issu le substrat donneur recyclé (1'').

[Revendication 13]

Procédé de fabrication d'une structure composite (100)

comprenant une couche mince (10) en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support (20) en carbure de silicium polycristallin, le procédé comprenant les étapes suivantes :

1) la fourniture d'au moins un substrat donneur (1) en carbure de silicium monocristallin, ayant une face avant (1a) et une face arrière (1b), la face avant (1a) présentant potentiellement des défauts, dits défauts primaires, qui sont traversants et existent également sur la face arrière (1b) ;

2) le contrôle de la qualité du – au moins un – substrat donneur (1) par une technique d'imagerie par photoluminescence de manière à extraire une cartographie de la face arrière (1b), dite première cartographie, répertoriant les défauts primaires identifiés comme étant de type micro-trou, de type complexe de fautes d'empilement en étoile ou de type défaut ponctuel ;

3) le transfert d'une couche mince (10), issue d'une couche superficielle (10') du – au moins un – substrat donneur (1) du côté de sa face avant (1a), sur un substrat support (20) en carbure de silicium polycristallin, pour obtenir une structure composite (100) et un substrat donneur résiduel (1') ;

- 4)** l'inspection d'une surface libre (10a) de la couche mince (10) de la structure composite (100) par une technique d'inspection de défauts par diffusion d'un faisceau laser ultra-violet, de manière à extraire une cartographie de la surface libre (10a), dite deuxième cartographie, répertoriant des défauts, dits défauts secondaires ;
- 5)** la gradation de la structure composite (100), incluant une comparaison de la première cartographie et de la deuxième cartographie.