

Description

Titre de l'invention : Procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite comprenant une couche mince en c-SiC, et structure composite

DOMAINE DE L'INVENTION

- [0001] La présente invention concerne le domaine des matériaux semi-conducteurs. Elle porte en particulier sur un procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite comprenant une couche mince en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support en carbure de silicium polycristallin.
- [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 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 d'un 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 serait hors spécification, ou qui donnerait lieu à une couche épitaxiale hors spécification, en termes de défauts « tueurs ». Il est donc essentiel de détecter mais également 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. La zoologie de défauts du c-SiC est relativement bien connue, et des études nombreuses tendent à définir le type et la taille des défauts, présents dans la couche épitaxiée en c-SiC, qui seraient tueurs pour les composants ; des critères de classification des défauts primaires, dans l'optique d'un transfert de couche mince c-SiC, peuvent donc être établis.
- [0009] 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. Un procédé de contrôle efficace de la qualité de la couche mince est donc requis, d'une part, 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 ; d'autre part, il est important que le procédé de contrôle soit capable de distinguer les défauts de la couche mince des potentiels « faux défauts » (ou bruit de mesure) associés à des grains sous-jacents du substrat en p-SiC.

- [0010] 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 procédés de contrôle permettant une inspection fiable des structures composites.
- [0011] OBJET DE L'INVENTION
- [0012] La présente invention adresse le problème énoncé. L'invention porte sur un procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite comprenant une couche mince (issue d'un substrat donneur en carbure de silicium monocristallin) disposée sur un substrat support en carbure de silicium polycristallin, ledit procédé de contrôle permettant une classification fiable des défauts secondaires présents sur et/ou dans la couche mince.
- [0013] BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION
- [0014] L'invention concerne un procédé de contrôle de la qualité 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 :
- [0015] **a)** l'inspection d'une surface libre de la couche mince par une technique couplant microscopie confocale en lumière visible et imagerie par photoluminescence, permettant de détecter des défauts, dits défauts secondaires, présents sur et/ou dans la couche mince, et de former, pour chaque défaut, une image en lumière visible et une image par photoluminescence,
- [0016] **b)** l'identification préliminaire des défauts secondaires, par similarité, sur la base de leur image en lumière visible, grâce à un algorithme de reconnaissance d'images, entraîné sur différents types de défauts susceptibles d'être présents sur et/ou dans une couche mince, tels que des trous, des bulles, des rayures, des défauts d'origine cristalline ; à l'issue de l'étape b), chaque défaut secondaire étant associé à un type identifié de défaut, avec un certain niveau de similarité,
- [0017] **c)** la classification finale d'au moins certains défauts secondaires par application des premières conditions suivantes :
- [0018] - si le niveau de similarité associé à un défaut secondaire est supérieur à un niveau haut, ledit défaut secondaire est définitivement classé dans le type identifié de défaut,
- [0019] - si le niveau de similarité associé au défaut secondaire est compris entre un niveau bas et le niveau haut, l'image par photoluminescence dudit défaut est analysée par un algorithme de reconnaissance d'images entraîné sur différents types labellisés de défauts; si le défaut secondaire est associé à un type labellisé de défaut, ledit défaut secondaire est définitivement classé dans le type identifié de défaut,
- [0020] - dans les autres cas, le défaut secondaire est définitivement classé comme n'étant pas un défaut.

[0021] Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- les défauts secondaires auxquels s'appliquent les premières conditions sont ceux associés, à l'issue de l'étape b), à des trous ou à des défauts d'origine cristalline ;
- le niveau haut, dit premier niveau haut, et/ou le niveau bas, dit premier niveau bas, utilisés à l'étape c) pour un défaut secondaire associé à un trou à l'étape b), sont différents du niveau haut, dit deuxième niveau haut, et/ou du niveau bas, dit deuxième niveau bas, utilisés à l'étape c) pour un défaut secondaire associé à un défaut d'origine cristalline à l'étape b) ;
- l'étape c) de classification finale est également basée sur l'application des deuxièmes conditions suivantes :
 - si un défaut secondaire est identifié comme un défaut de type bulle à l'étape b) avec un niveau de similarité supérieur à un troisième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme bulle,
 - si un défaut secondaire est identifié comme un défaut de type bulle à l'étape b) avec un niveau de similarité inférieur ou égal au troisième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme n'étant pas un défaut ;
- l'étape c) de classification finale est également basée sur l'application des troisièmes conditions suivantes :
 - si un défaut secondaire est identifié comme un défaut de type rayure à l'étape b) avec un niveau de similarité supérieur à un quatrième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme rayure,
 - si un défaut secondaire est identifié comme un défaut de type rayure à l'étape b) avec un niveau de similarité inférieur ou égal au quatrième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme n'étant pas un défaut ;
- chaque défaut secondaire détecté à l'étape a) présente une taille supérieure à $1\mu\text{m}$, à $5\mu\text{m}$, voire à $10\mu\text{m}$;
- l'étape c) mène à une gradation de la structure composite et à un tri physique permettant de séparer des structures composites déclassées et des structures composites répondant aux spécifications ;

- une structure composite est déclassée lorsqu'elle présente une densité de défauts d'origine cristalline supérieure à 0,25 défauts/cm² et/ou une densité globale de bulles et de trous supérieure à 0,2 défauts/cm².

[0022] L'invention concerne également une structure composite formée d'une couche mince en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support en carbure de silicium polycristallin, ladite structure composite présentant une densité de défauts d'origine cristalline inférieure ou égale à 0,25 défauts/cm² et une densité globale de bulles et de trous inférieure ou égale à 0,2 défauts/cm².

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0023] 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 :

[0024] [Fig.1] La [Fig.1] présente un substrat donneur, une structure composite sans et avec couche épitaxiale ;

[0025] [Fig.2a]

[0026] [Fig.2b] La [Fig.2a] et la [Fig.2b] illustrent différents types de défauts avec leur classification finale par application des conditions particulières du procédé de contrôle conforme à la présente invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0027] Dans la description à suivre, nous nommerons par convention « défauts primaires » les défauts présents sur et/ou dans un substrat donneur 1, « défauts secondaires » les défauts présents sur et/ou dans la couche mince 10 d'une structure composite 100, et « défauts tertiaires » les défauts présents sur et/ou dans la couche épitaxiale 150 crue sur la couche mince d'une structure composite 100.

[0028] Dans un plan principal (x,y), le substrat donneur 1 et la structure composite 100, avec ou sans couche épitaxiale 150, 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.

[0029] Avant d'engager la fabrication d'une structure composite 100 qui comprend une couche mince en carbure de silicium monocristallin (c-SiC) reportée sur un substrat support en carbure de silicium polycristallin (p-SiC), il est important d'effectuer un contrôle de la qualité du substrat donneur 1 (en c-SiC, par exemple de type 4H-SiC) dont sera issue la couche mince.

- [0030] Une inspection de la face avant 1a du substrat donneur 1 par une technique d'imagerie par photoluminescence tel que décrite dans les références [1] et [2] citées en introduction, est préférentiellement réalisée pour détecter et classifier des défauts, appelés défauts primaires par la suite.
- [0031] Les défauts primaires 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.
- [0032] Cette étape d'inspection 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 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 mesurés ; ils attribuent également un critère de typologie (classes prédéfinies de défauts) à chacun des défauts primaires, sur la base d'un algorithme d'apprentissage. Les classes prédéfinies correspondent typiquement à des défauts de type micro-trou (« micro-pipe » en anglais), faute d'empilement (SF pour « stacking fault »), dépression (« pit »), bosse (« bump »), rayure (« scratch »), particule.
- [0033] Après inspection et potentiellement déclassement de certains substrats donneurs 1 dont la densité et/ou la typologie de défauts seraient incompatibles avec le transfert d'une couche mince viable, la structure composite 100 peut être fabriquée. Toute technique de transfert de couche mince peut être mise en œuvre, en particulier le procédé Smart Cut. Ce procédé, basé sur une implantation d'ions légers et un assemblage direct par adhésion moléculaire, ne sera pas décrit en détail ici car il est bien connu. Pour obtenir la structure composite 100, il est mis en œuvre avec un substrat donneur 1 en c-SiC et un substrat support 20 en p-SiC.
- [0034] Typiquement, l'épaisseur de la couche mince 10 est comprise entre 20nm et 1000nm, et sa surface libre présente une rugosité inférieure ou égale à 0,5nm RMS, voire à 0,1nm RMS (mesure par microscopie à force atomique AFM, sur des scans par exemple de $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ à $30 \times 30 \mu\text{m}^2$). Le substrat support 20 peut présenter une épaisseur comprise entre environ 50 μm et plusieurs centaines de micromètres, par exemple entre 200 μm et 700 μm . Optionnellement, la structure composite 100 peut comprendre une couche intermédiaire, interposée entre la couche mince 10 et le substrat support 20. 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). Une interface de collage est présente entre la couche mince 10 et le substrat support 20, ou adjacente à la couche intermédiaire.

- [0035] La présente invention concerne un procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite 100 comprenant une couche mince 10 en c-SiC disposée sur un substrat support 20 en p-SiC ([Fig.1]).
- [0036] Le procédé de contrôle comprend une étape a) d'inspection d'une surface libre 10a de la couche mince 10 par une technique couplant microscopie confocale en lumière visible (contraste interférentiel différentiel – DIC) et imagerie par photoluminescence, pour détecter des défauts, dits défauts secondaires, présents sur et/ou dans la couche mince 10. Les défauts détectés présentent typiquement une taille (ou un diamètre équivalent) supérieure ou égale à 1µm, supérieure ou égale à 5µm, voire supérieure ou égale à 10µm.
- [0037] Le contraste interférentiel différentiel (également appelé Nomarski) est une technique d'éclairage qui permet de discerner d'infimes variations de la topographie d'une surface en exploitant l'interférence des ondes lumineuses.
- [0038] L'imagerie par photoluminescence est basée sur des variations locales d'intensité d'un signal de photoluminescence (PL) émis par la surface libre 10a, à la suite d'une excitation par un faisceau électromagnétique incident. 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. Les variations locales d'intensité du signal PL traduisent des propriétés modifiées du matériau (contraintes, rugosité, planéité...), correspondant au défaut secondaire. Ce dernier peut apparaître sur l'image PL générée, sous forme de tache(s) blanche(s) ou noire(s) selon ses caractéristiques.
- [0039] A l'étape a), une image en lumière visible – appelée image DIC par la suite – et une image par photoluminescence – appelée image PL par la suite – sont formées pour chaque défaut secondaire détecté.
- [0040] Les défauts secondaires peuvent être induits par des défauts primaires ou 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. Il peut donc s'agir de défauts d'origine cristalline, de défauts de collage tels que des trous (absence locale de couche mince 10) ou des bulles (défaut à l'interface de collage 40, au niveau duquel la couche mince 10 n'est pas collée et forme une cloque), ou encore de défauts superficiels tels que des rayures ou des copeaux de couche (« flakes ») présents sur la face avant 10a de la couche mince.

- [0041] Le procédé de contrôle comprend ensuite une étape b) correspondant à l'identification préliminaire des défauts secondaires, par similarité, sur la base de leur image DIC.
- [0042] Les équipements précédemment cités (et en particulier le SICA88) sont capables d'identifier les défauts secondaires sur la base des images capturées par microscopie en lumière visible, à l'aide d'un algorithme de reconnaissance d'images. L'algorithme est alimenté et entraîné avec des images vérifiées de défauts susceptibles d'être présents sur et/ou dans une couche mince 10, tels que des trous, des bulles, des rayures, des copeaux, des défauts d'origine cristalline : il peut ainsi apprendre à reconnaître chacun de ces défauts et calculer un niveau de similarité entre l'image DIC du défaut détecté et sa banque de données, en prenant en compte des critères de taille, forme, couleur, contraste, etc.
- [0043] A l'issue de l'étape b), chaque défaut secondaire est associé à un type identifié de défaut (par exemple, trou, bulle, rayure, copeau ou défaut d'origine cristalline), avec un certain niveau de similarité (compris entre 0 et 1).
- [0044] Du fait de la présence d'un substrat support 20 polycristallin sous la couche mince 10, l'identification préliminaire réalisée automatiquement par l'équipement n'est pas suffisamment fiable pour décider de la qualité de la structure composite 100. En effet, cette identification peut être impactée par les grains sous-jacents et le niveau de similarité attribué au défaut secondaire ne permet pas à lui seul de déterminer si ledit défaut est bien du type identifié ou si c'est un « faux défaut », par exemple lié aux grains de p-SiC.
- [0045] Le procédé de contrôle comprend donc une étape c) de classification finale des défauts secondaires par application de conditions particulières, exposées ci-après.
- [0046] Des premières conditions s'appliquent en particulier aux défauts secondaires identifiés à l'étape b) comme étant des trous ou des défauts d'origine cristalline :
- i. si le niveau de similarité associé à un défaut secondaire est supérieur à un niveau haut, ledit défaut secondaire est définitivement classé dans le type identifié de défaut ;
 - ii. si le niveau de similarité associé au défaut secondaire est compris entre un niveau bas et le niveau haut, l'image PL dudit défaut est analysée par un algorithme de reconnaissance d'images entraîné sur différents types labellisés de défauts. Deux cas peuvent alors se présenter :
 - si le défaut secondaire est associé à un type labellisé de défaut, ledit défaut secondaire est définitivement classé dans le type identifié de défaut ;
 - si le défaut secondaire n'est pas reconnu comme étant un type labellisé de défaut, ledit défaut secondaire est définitivement classé

comme n'étant pas un défaut (c'est-à-dire considéré comme un « faux défaut ») ;

- iii. enfin, si le niveau de similarité associé au défaut secondaire est inférieur au niveau bas, ledit défaut secondaire est également définitivement classé comme n'étant pas un défaut.

[0047] On nomme « faux défaut », un défaut détecté et associé à un type donné (avec un certain niveau de similarité) à l'étape b), mais qui ne correspond pas réellement audit type : il peut soit correspondre à un autre type de défaut de la couche mince, à un artefact de mesure ou à l'image d'un grain du substrat support 20 sous-jacent.

[0048] L'algorithme de reconnaissance des images PL est alimenté et entraîné avec des images PL vérifiées de défauts susceptibles d'être présents sur et/ou dans une couche mince 10 : il peut ainsi apprendre à reconnaître chacun de ces défauts et à les classer dans des catégories prédéfinies (c'est-à-dire, les associer à des types de défauts labellisés), en prenant en compte des critères de taille, forme, contraste, etc. Un type labellisé de défaut correspond donc à un vrai défaut, dont la signature sur l'image PL se traduit par des critères (tels que précités) particuliers.

[0049] Dans la condition (ii), lorsque l'image PL associée au défaut secondaire analysé correspond à l'un des types labellisés de défauts, cela vient confirmer que l'on a à faire à un « vrai défaut » et le défaut secondaire est ainsi classé dans le type identifié à l'étape b) ; par contre, lorsque l'image PL ne correspond à aucun des types labellisés de défauts et/ou que l'image PL ne montre aucun contraste particulier (pas de signal PL), le défaut secondaire est considéré comme un « faux défaut », bien qu'il ait été associé à un type identifié de défaut à l'étape b).

[0050] Notons que le niveau haut (dit premier niveau haut) et/ou le niveau bas (dit premier niveau bas) utilisés à l'étape c) pour juger du niveau de similarité de l'image DIC, pour un défaut secondaire associé à un trou, peuvent être différents du niveau haut (dit deuxième niveau haut) et/ou du niveau bas (dit deuxième niveau bas) utilisés pour un défaut secondaire associé à un défaut d'origine cristalline.

[0051] Des deuxième conditions peuvent s'appliquer aux défauts secondaires identifiés à l'étape b) comme étant des bulles :

- i. si le niveau de similarité associé à un défaut secondaire identifié comme étant une bulle est supérieur à un troisième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme bulle,
- ii. si le niveau de similarité est inférieur ou égal au troisième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme n'étant pas un défaut.

[0052] Des troisième conditions peuvent s'appliquer aux défauts secondaires identifiés à l'étape b) comme étant des rayures :

- i. si le niveau de similarité associé à un défaut secondaire identifié comme étant une rayure est supérieur à un quatrième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme rayure,
 - ii. si le niveau de similarité est inférieur ou égal au quatrième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme n'étant pas un défaut.
- [0053] Cette étape c) de classification finale permet de catégoriser de manière fiable les défauts critiques présents sur et/ou dans la couche mince 10, et évite la prise en compte de « faux défauts », notamment liés à la détection des grains sous-jacents du substrat support 20.
- [0054] A titre d'exemple, le procédé de contrôle est appliqué sur une structure composite 100 comprenant une couche mince en c-SiC de 600 nm d'épaisseur, disposée sur un substrat support en p-SiC de 150mm de diamètre. L'équipement utilisé est le SICA88. Dans les exemples de la [Fig.2a] et de la [Fig.2b], le premier niveau bas et le premier niveau haut de similarité, utilisés à l'étape c) pour juger du niveau de similarité associé aux défauts secondaires identifiés comme des trous sont respectivement définis à 0,3 et 0,85. Le deuxième niveau bas et le deuxième niveau haut de similarité, utilisés à l'étape c) pour juger du niveau de similarité associé aux défauts secondaires identifiés comme des défauts d'origine cristalline sont respectivement définis à 0,3 et 0,85. Le troisième niveau utilisé à l'étape c) pour juger du niveau de similarité associé aux défauts secondaires identifiés comme des bulles est défini à 0,85. Enfin, le quatrième niveau utilisé à l'étape c) pour juger du niveau de similarité associé aux défauts secondaires identifiés comme des rayures est défini à 0,97.
- [0055] Les figures 2a et 2b illustrent des défauts de type trou, défaut d'origine cristalline, bulle et rayure détectés sur et/ou dans la couche mince 10 :
- [0056] [1] Image DIC : Niveau de similarité supérieur au premier niveau haut => Défaut classé en trou ;
- [0057] [2] Image DIC : Niveau de similarité compris entre le premier niveau haut et le premier niveau bas => Défaut classé en trou car défaut labellisé détecté sur l'image PL ;
- [0058] [3] Image DIC : Niveau de similarité supérieur au deuxième niveau haut => Défaut classé en défaut d'origine cristalline ;
- [0059] [4] Image DIC : Niveau de similarité compris entre le deuxième niveau haut et le deuxième niveau bas => Défaut classé en défaut d'origine cristalline car défaut labellisé détecté sur l'image PL ;
- [0060] [5] Image DIC : Niveau de similarité inférieur au deuxième niveau bas => Défaut secondaire classé comme n'étant pas un défaut d'origine cristalline ;
- [0061] [6] Image DIC : Niveau de similarité supérieur au troisième niveau => Défaut classé en bulle ;

- [0062] [7] Image DIC : Niveau de similarité supérieur au quatrième niveau => Défaut classé en rayure.
- [0063] A l'issue de l'étape c) du procédé de contrôle, il est possible d'attribuer un grade aux structures composites 100 contrôlées. En particulier, un grade de qualité supérieure peut être attribué aux structures 100 présentant une densité globale de bulles et de trous inférieure ou égale à 0,2 défauts/cm². Préférentiellement, un tel grade sera attribué aux structures composites 100 présentant une densité globale de bulles, de trous et de rayures inférieure ou égale à 0,2 défauts/cm². Encore préférentiellement, le grade de qualité supérieure peut être attribué aux structures 100 présentant une densité globale de défauts, hors défauts d'origine cristalline, inférieure ou égale à 0,2 défauts/cm².
- [0064] La densité de défauts d'origine cristalline acceptable est définie en fonction du niveau de qualité du substrat donneur 1 duquel est issue la couche mince 10. Avantagusement, une densité de défauts d'origine cristalline inférieure ou égale à 0,25 /cm² pour une structure 100 lui donne un grade de qualité supérieure.
- [0065] A l'inverse, un grade inférieur, menant au déclassement d'une structure composite 100 à l'issue de l'étape c), pourra être défini pour une densité globale de défauts supérieure aux seuils précédemment énoncés.
- [0066] La présente invention concerne donc également une structure composite 100 formée d'une couche mince 10 en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support 20 en carbure de silicium polycristallin. Ladite structure composite, inspectée en final avec le procédé de contrôle selon l'invention, présente :
- une densité de défauts d'origine cristalline inférieure ou égale à 0,25 défauts/cm², inférieure ou égale à 0,2 défauts/cm², voire inférieure ou égale à 0,18 défauts/cm², voire encore inférieure ou égale à 0,15 défauts/cm², et
 - une densité globale de bulles et de trous (et éventuellement de rayures) inférieure ou égale à 0,2 défauts/cm², inférieure ou égale à 0,18 défauts/cm², inférieure ou égale à 0,15 défauts/cm², voire inférieure ou égale à 0,12 défauts/cm², voire encore inférieure ou égale à 0,1 défauts/cm².
- [0067] Après la gradation, un tri physique des structures composites 100 permet de séparer les structures 100 déclassées des structures 100 répondant aux spécifications.
- [0068] Dans une étape de fabrication ultérieure, une croissance par épitaxie de SiC peut être opérée sur la couche mince 10 des structures composites 100 en spécification, afin de former la couche épitaxiée 150 sur et dans laquelle les dispositifs seront élaborés ([Fig.1]). L'étape de croissance épitaxiale pourra être faite selon les techniques connues de l'état de la technique.
- [0069] Le procédé de contrôle de la qualité des structures composites 100, avant l'étape d'épitaxie, permet d'assurer que la densité de défauts tertiaires tueurs, liés à la qualité

de la couche mince 10, sera maîtrisée, voire inférieure à une spécification donnée, car ce procédé permet une classification fiable des défauts présents sur et/ou dans la couche mince 10, sans pour autant effectuer de la sur-qualité en déclassant des structures composites 100 onéreuses, sur la base de « faux défauts » induits notamment par un substrat sous-jacent polycristallin.

[0070] 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 contrôle de la qualité 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 :

- a)** l'inspection d'une surface libre (10a) de la couche mince (10) par une technique couplant microscopie confocale en lumière visible et imagerie par photoluminescence, permettant de détecter des défauts, dits défauts secondaires, présents sur et/ou dans la couche mince (10), et de former, pour chaque défaut, une image en lumière visible et une image par photoluminescence,
- b)** l'identification préliminaire des défauts secondaires, par similarité, sur la base de leur image en lumière visible, grâce à un algorithme de reconnaissance d'images, entraîné sur différents types de défauts susceptibles d'être présents sur et/ou dans une couche mince (10), tels que des trous, des bulles, des rayures, des défauts d'origine cristalline ; à l'issue de l'étape b), chaque défaut secondaire étant associé à un type identifié de défaut, avec un certain niveau de similarité,
- c)** la classification finale d'au moins certains défauts secondaires par application des premières conditions suivantes :
 - si le niveau de similarité associé à un défaut secondaire est supérieur à un niveau haut, ledit défaut secondaire est définitivement classé dans le type identifié de défaut,
 - si le niveau de similarité associé au défaut secondaire est compris entre un niveau bas et le niveau haut, l'image par photoluminescence dudit défaut est analysée par un algorithme de reconnaissance d'images entraîné sur différents types labellisés de défauts; si le défaut secondaire est associé à un type labellisé de défaut, ledit défaut secondaire est définitivement classé dans le type identifié de défaut,
 - dans les autres cas, le défaut secondaire est définitivement classé comme n'étant pas un défaut.

[Revendication 2]

Procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite (100) selon la revendication 1, dans lequel les défauts secondaires auxquels s'appliquent les premières conditions sont ceux associés, à l'issue de l'étape b), à des trous ou à des défauts d'origine cristalline.

- [Revendication 3] Procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite (100) selon la revendication 2, dans lequel le niveau haut, dit premier niveau haut, et/ou le niveau bas, dit premier niveau bas, utilisés à l'étape c) pour un défaut secondaire associé à un trou à l'étape b), sont différents du niveau haut, dit deuxième niveau haut, et/ou du niveau bas, dit deuxième niveau bas, utilisés à l'étape c) pour un défaut secondaire associé à un défaut d'origine cristalline à l'étape b).
- [Revendication 4] Procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel l'étape c) de classification finale est également basée sur l'application des deuxièmes conditions suivantes :
- si un défaut secondaire est identifié comme un défaut de type bulle à l'étape b) avec un niveau de similarité supérieur à un troisième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme bulle,
 - si un défaut secondaire est identifié comme un défaut de type bulle à l'étape b) avec un niveau de similarité inférieur ou égal au troisième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme n'étant pas un défaut.
- [Revendication 5] Procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel l'étape c) de classification finale est également basée sur l'application des troisièmes conditions suivantes :
- si un défaut secondaire est identifié comme un défaut de type rayure à l'étape b) avec un niveau de similarité supérieur à un quatrième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme rayure,
 - si un défaut secondaire est identifié comme un défaut de type rayure à l'étape b) avec un niveau de similarité inférieur ou égal au quatrième niveau, ledit défaut secondaire est définitivement classé comme n'étant pas un défaut.
- [Revendication 6] Procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel chaque défaut secondaire détecté à l'étape a) présente une taille supérieure à 1µm, à 5µm, voire à 10µm.
- [Revendication 7] Procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite (100) selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel l'étape c) mène à

une gradation de la structure composite (100) et à un tri physique permettant de séparer des structures composites déclassées et des structures composites répondant aux spécifications.

[Revendication 8]

Procédé de contrôle de la qualité d'une structure composite (100) selon la revendication 7, dans lequel une structure composite (100) est déclassée lorsqu'elle présente une densité de défauts d'origine cristalline supérieure à 0,25 défauts/cm² et/ou une densité globale de bulles et de trous supérieure à 0,2 défauts/cm².

[Revendication 9]

Structure composite (100) formée d'une couche mince (10) en carbure de silicium monocristallin disposée sur un substrat support (20) en carbure de silicium polycristallin, ladite structure composite (100) présentant une densité de défauts d'origine cristalline inférieure ou égale à 0,25 défauts/cm² et une densité globale de bulles et de trous inférieure ou égale à 0,2 défauts/cm².