

PROCEDE DE TRAITEMENT D'UN SUBSTRAT DE CARBURE DE SILICIUM

DOMAINE DE L'INVENTION

La présente invention concerne de façon générale le domaine de la fabrication de
5 substrats de carbure de silicium pour la formation de composants électroniques. Elle
propose plus particulièrement un procédé de traitement d'une surface d'un substrat de
carbure de silicium monocristallin.

ETAT DE LA TECHNIQUE

10 Le carbure de silicium monocristallin (m-SiC) est utilisé pour la formation de
composants électroniques, par exemple pour les applications en électronique de puissance
ou radiofréquences. Dans certaines applications, on utilise des substrats de SiC
monocristallin massif, dans d'autres applications des substrats par exemple de carbure de
silicium polycristallin, comportant une couche superficielle de SiC monocristallin.

15 Les procédés de fabrication en microélectronique impliquent souvent des
traitements thermiques des substrats, par exemple pour activer des dopants, pour guérir
des défauts dans la maille cristalline provoquée par une implantation d'espèces ioniques
ou pour modifier la structure cristalline du substrat. De tels traitements sont souvent réalisés
à des températures élevées pouvant aller jusqu'à 2000°C ou plus.

20 Cependant, la surface du SiC monocristallin est susceptible de se déstabiliser sous
l'effet d'une température élevée. Cette déstabilisation peut se traduire par une dégradation
de la surface, notamment par une modification de la morphologie et/ou de la composition
de celle-ci.

En particulier, comme illustré à la figure 1, les surfaces lisses en SiC sont sensibles
25 à des traitements à température élevée, typiquement à partir d'environ 1200°C. En
l'absence d'une protection adéquate de ladite surface, la morphologie se réorganise pour
minimiser l'énergie de surface, formant des terrasses 22. Cet effet est connu sous le terme
anglo-saxon « step bunching ». La réorganisation de la surface 222 est due à une diffusion
des atomes en surface lorsque celle-ci est exposée à de hautes températures. Elle dépend
30 en outre de l'atmosphère et de la pression auxquelles la surface est exposée.

Afin d'obtenir des surfaces lisses, on cherche donc à éviter la formation des
terrasses ou à les supprimer dans une étape ultérieure. On peut par exemple procéder à
un polissage mécanique ou mécano-chimique (CMP) après le traitement thermique.
Cependant, si la hauteur des terrasses formées est trop importante, par exemple supérieure
35 à 80 nm entre deux plateaux consécutifs, l'épaisseur à retirer est trop importante, ce qui

implique un procédé long et laborieux. De plus, l'épaisseur restante de m-SiC est souvent trop fine pour les applications envisagées.

Une autre méthode est d'utiliser des rampes de recuit très rapides pour limiter l'apparition de terrasses. Cette méthode nécessite des montées en température d'environ
5 400°C par minute et n'est donc pas compatible avec les fours industriels.

De manière alternative, on peut appliquer une surpression de silane qui limite la sublimation du silicium dans le SiC, évitant ainsi la formation de terrasses. Cette méthode est décrite dans l'article de R. Zhang et al. Cependant, elle nécessite l'introduction d'un gaz de SiH₄ et l'équipement pour créer la surpression. En outre, des gouttelettes de silicium
10 peuvent apparaître sur la surface du SiC à des températures au-delà de 1600°C.

Une autre possibilité pour éviter la formation de terrasses est d'utiliser une couche de protection. L'article de J. Bao et al. propose une couche de protection de carbone obtenue par un procédé de centrifugation d'une résine sur une surface en SiC. La résine est recuite à 750°C – 900°C pour former un film en carbone d'environ 1 µm d'épaisseur.
15 Cette technique implique l'ajout d'étapes supplémentaires dans le procédé de formation, l'utilisation d'équipements supplémentaires et entraîne un risque de contamination du substrat par la résine.

Dans certains cas, la couche de protection peut également être formée en nitrure d'aluminium (AlN). Cependant, ce matériau est difficile à retirer, en particulier après un
20 traitement thermique à une température élevée.

EXPOSE DE L'INVENTION

Un but de l'invention est de mettre à disposition un procédé de traitement d'une surface d'un substrat de carbure de silicium monocristallin permettant de réduire la
25 formation des terrasses par une étape facile à mettre en œuvre. Un tel traitement doit être facile à intégrer dans le procédé de fabrication d'un substrat comportant une surface en carbure de silicium monocristallin, et ne pas présenter de risque de contamination d'un tel substrat.

A cet effet, l'invention propose un procédé de traitement d'un substrat comprenant
30 au moins une couche superficielle de carbure de silicium monocristallin, ledit procédé comprenant

- le placement dudit substrat dans un four,
- l'abaissement de la pression dans le four jusqu'à une pression comprise entre 0,01 et 0,5 Pa,
- 35 • le chauffage du substrat à une température supérieure à une température de sublimation du silicium à ladite pression, de sorte à former une couche

de carbone sur la couche de carbure de silicium monocristallin par sublimation du silicium de la surface de ladite couche de carbure de silicium monocristallin, et,

- après la formation de la couche de carbone, un traitement thermique du substrat à une température de traitement thermique (T_T) strictement supérieure à 1300°C et sous une pression (p_T) supérieure à la pression (p_F) de formation de la couche de carbone, la couche de carbone protégeant la surface de la couche de carbure de silicium monocristallin contre la formation de marches.

La couche de carbone a pour fonction de protéger le carbure de silicium lors d'un traitement thermique à une température plus élevée, et ainsi de minimiser la formation de marches à la surface du carbure de silicium.

Le pompage à une pression inférieure à une pression comprise entre, 0.01 et 0.5 Pa (entre 0.1 et 5 μ bar) permet d'évacuer rapidement les atomes de silicium s'évaporant de la surface du substrat. De plus, dans le cas d'une pluralité de substrats dans le même four, les atomes de silicium sont évacués de l'espace entre les substrats de carbure de silicium. Une telle évacuation permet d'obtenir une atmosphère relativement homogène sur la surface du substrat, ce qui permet de former une couche de protection présentant une faible variation d'épaisseur entre le bord et le centre de chaque substrat.

De manière avantageuse, la température de formation de la couche de carbone est comprise entre 1200°C et 1500°C.

De préférence, la couche de carbone est une couche de graphène.

Avantageusement, la couche de carbone présente une épaisseur comprise entre 0,2 nm et 1,2 nm.

De manière avantageuse, une pluralité de substrats est traitée simultanément dans le même four.

Les substrats peuvent être verticalement superposés dans le four de sorte qu'un espace vertical est ménagé entre deux substrats adjacents.

De préférence, ledit espace vertical entre deux substrats adjacents présente une hauteur comprise entre 4 et 10 mm.

Dans certains modes de réalisation le procédé comprend, après la formation de la couche de carbone, un traitement thermique du substrat à une température supérieure à la température de formation de la couche de carbone et sous une pression supérieure à la pression de formation de la couche de carbone.

Avantageusement, la température du traitement thermique est supérieure ou égale à 1500°C, de préférence supérieure ou égale à 1700°C.

La température (T_T) du traitement thermique peut être inférieure ou égale à 2000°C.

La pression du traitement thermique est de préférence supérieure ou égale à 2 Pa.

De manière avantageuse, la formation de la couche de carbone et le traitement thermique sont mis en œuvre dans le même four.

- 5 De préférence, le procédé comprend en outre une étape de retrait de la couche de carbone après le traitement thermique.

Avantageusement, le procédé comprend en outre une étape de polissage mécano-chimique après le traitement thermique pour retirer des marches formées à la surface de la couche de carbure de silicium au cours dudit traitement thermique.

- 10 Ledit polissage mécano-chimique peut conduire au retrait d'une épaisseur de carbure de silicium inférieure à 200 nm.

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une structure comprenant une couche de carbure de silicium monocristallin sur un substrat support, comprenant successivement :

- 15 - la formation d'une zone de fragilisation dans un substrat donneur de carbure de silicium monocristallin par implantation d'espèces ioniques, de sorte à délimiter une couche de carbure de silicium monocristallin à transférer,
- le collage du substrat donneur sur le substrat support,
- le détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation de sorte à
20 transférer la couche de carbure de silicium monocristallin sur le substrat support,
- la mise en œuvre du traitement tel que décrit ci-dessus sur la couche de carbure de silicium monocristallin transférée.

- De préférence, la couche de carbure de silicium monocristallin comprend des dopants et en ce que le traitement thermique est mis en œuvre à une température adaptée
25 pour activer lesdits dopants.

Avantageusement, la couche de carbure de silicium comprend des défauts dus à l'implantation des espèces ioniques et en ce que le traitement thermique est mis en œuvre à une température adaptée pour guérir au moins une partie desdits défauts.

- De manière avantageuse, le procédé comprend en outre, après le polissage
30 mécano-chimique, une étape de reprise d'épitaxie de carbure de silicium monocristallin sur la surface de la couche de carbure de silicium monocristallin.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

- D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description
35 détaillée qui va suivre, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

La figure 1 illustre la formation de terrasses sur une face avant en un matériau semiconducteur monocristallin.

La figure 2 illustre un substrat comportant une portion en SiC monocristallin sur sa face avant.

5 La figure 3A illustre le substrat de la figure 2 après la formation d'une couche de carbone.

La figure 3B illustre le substrat de la figure 2 pendant la formation d'une couche de carbone.

10 La figure 3C illustre le substrat de la figure 2 après la formation d'un mode de réalisation particulier de la couche de carbone.

La figure 3D illustre la répartition des différentes épaisseurs d'une couche de carbone sur la surface d'un substrat.

La figure 4 montre le profil thermique utilisé pour un procédé selon l'invention.

15 Les figures 5A à 5C illustrent la fabrication d'un substrat comportant une portion superficielle de m-SiC sur sa face avant.

La figure 6 illustre un four de recuit adapté pour la formation d'une couche de carbone selon un mode de réalisation préféré de l'invention.

La figure 7 montre la rugosité d'une surface de SiC monocristallin en fonction de la position radiale sur le substrat.

20 La figure 8 montre la hauteur des marches entre les terrasses formées sur une surface en SiC monocristallin en fonction de la position radiale sur le substrat.

Les figures 9A et 9B sont des images de microscopie par balayage d'un faisceau d'électrons d'un substrat après un traitement thermique selon un procédé connu.

25 Les figures 10A et 10B sont des images de microscopie par balayage d'un faisceau d'électrons d'un substrat après un traitement thermique selon un procédé selon l'invention.

DESCRIPTION DETAILLÉE DE MODES DE RÉALISATION

De manière générale, on forme une couche protectrice de carbone sur un substrat comportant une portion superficielle de carbure de silicium monocristallin. La couche de carbone protège temporairement la surface du substrat contre la formation de terrasses pendant un traitement thermique. La couche protectrice est formée par transformation de la surface en m-SiC dans des conditions de température et de pression adaptées pour provoquer une sublimation des atomes de silicium présents sur ladite surface tout en minimisant la formation de terrasses. Après le traitement thermique, la couche protectrice est retirée de la surface du substrat.

30

35

La figure 2 illustre un substrat dont une couche superficielle 20 est en carbure de silicium monocristallin. Ladite couche 20 est agencée sur un support 11 formé d'un ou plusieurs matériaux différents du carbure de silicium monocristallin. Le support peut comprendre un matériau semiconducteur monocristallin ou polycristallin, par exemple du carbure de silicium polycristallin. De manière alternative, le substrat peut être un substrat massif de carbure de silicium monocristallin, la couche 20 formant une portion superficielle dudit substrat.

Formation de la couche de carbone

En référence à la figure 3A, on forme une couche de carbone 30 sur la surface 200 de la couche 20 en m-SiC. La couche de carbone 30 protège la surface de la couche 20 contre la formation de terrasses lors d'un échauffement à une température élevée. Elle stabilise ainsi la structure cristalline de la surface.

La couche de carbone 30 est formée par sublimation du silicium à la surface de la couche de m-SiC. Avantageusement, la formation de la couche de carbone est réalisée dans un four qui sera décrit ultérieurement. Afin d'obtenir une telle sublimation, on abaisse la pression dans le four jusqu'à une pression p_F . La pression p_F est de préférence comprise entre 0,01 et 0,5 Pa (0.1 et 5 μ bar).

Aucun gaz supplémentaire n'est injecté dans le four, ce qui permet de conserver une pression basse et d'éviter tout risque de contamination par des impuretés pouvant être présentes dans un tel gaz.

Pendant l'abaissement de la pression à la pression p_F , on commence à chauffer le substrat à une température T_F . On ajuste les procédés d'abaissement de la pression et de chauffage de sorte que la pression p_F soit atteinte avant ou simultanément avec l'atteinte de la température T_F .

De manière alternative, on procède à la montée en température après l'abaissement de la pression à la pression p_F . La température T_F est supérieure à la température de sublimation du silicium à ladite pression p_F dans le four. Typiquement, la température T_F est comprise entre 1200°C et 1500°C.

Une température inférieure à 1200°C ne permet pas la sublimation du silicium dans la gamme de pression p_F qui peut être obtenue dans un four de traitement de substrats. Une température supérieure à 1500°C engendre un phénomène de formation de terrasses qui concurrence la sublimation du silicium, conduisant à la formation de marches trop hautes entre les terrasses.

On cherche en effet à limiter la formation de marches entre terrasses à une hauteur inférieure à 25 nm afin de minimiser le polissage nécessaire à la suppression desdites marches. La formation de terrasses plus hautes nécessiterait un polissage long et laborieux. De plus, un tel polissage engendre souvent la création de défauts tels que des rayures dans le m-SiC, ce qui augmente le nombre de substrats défectueux.

L'abaissement de la pression dans le four permet d'obtenir une sublimation du silicium à une température T_F inférieure à la température à laquelle la formation de terrasses devient importante. La pression p_F est ainsi ajustée pour éviter ou réduire la formation de terrasses pendant la formation de la couche de carbone.

5 La pression p_F et la température T_F sont maintenues jusqu'à l'obtention d'une couche de carbone 30 recouvrant la totalité de la surface de carbure de silicium monocristallin. Afin de maintenir la pression p_F , on maintient un pompage à vide du four pendant toute l'étape de la formation de la couche de carbone. Le pompage en continu entraîne l'évacuation des atomes de silicium du four. Une telle évacuation est nécessaire
10 pour baisser la pression partielle de silicium et ainsi permettre la sublimation d'autres atomes de silicium de la surface du substrat.

Quand la couche de carbone est finalisée, la couche de carbone prévient la sublimation du silicium. A ce stade, les terrasses et la hauteur des marches sont figées. De ce fait, il est possible de poursuivre le traitement thermique à plus haute température sans
15 dégrader l'état de surface. Typiquement, on augmente la pression en injectant un gaz inerte dans le four, par exemple de l'argon.

Structure de la couche de carbone

La face libre 200 de la couche 20 en m-SiC est une surface de carbure de silicium monocristallin du polytype 4H ou 6H d'une face (0001). Cette orientation cristalline favorise
20 la croissance du carbone sous forme de deux couches distinctes sur la surface.

Optionnellement, la face libre 200 forme un angle compris entre 0 et 8 degrés, par exemple entre 3 et 5 degrés, avec la face (0001) du monocristal de SiC. La face libre 200 est, notamment, formée par un ensemble de facettes (0001) séparées les unes des autres par des marches atomiques. Une telle désorientation limite, lors de l'épitaxie sur cette face
25 libre, les risques de générer des zones de polytype 3C.

Par convention, la face (0001) du m-SiC est nommée en général « face Si », et la face (000-1) est nommée « face carbone ».

Lors du début de la sublimation du silicium de la surface de la couche 20, en référence à la figure 3B, une première couche 31 de carbone se forme sur la surface. La
30 couche 31 s'étend sur toute la surface 200 de la couche 20 en m-SiC et prend la fonction d'une couche tampon agencée entre la surface 200 du substrat et des éventuelles couches de carbone formées ultérieurement. La première couche 31 est en carbone hexagonal avec une faible proportion d'hybridation sp^3 liée aux atomes de silicium de la couche 20. La proportion des liaisons sp^3 décroît de la face en contact avec la couche 20 vers la face libre
35 de la couche 31.

Lors de la poursuite de la sublimation de silicium, d'autres couches de carbone se forment sur la couche tampon 31. Les couches de carbone sur la couche tampon 31 sont des monocouches de graphène, c'est-à-dire que ces couches comprennent uniquement

des liaisons sp^2 entre les atomes de carbone. Les monocouches de graphène empilées forment ensemble une couche superficielle 32.

La formation et la caractérisation d'une telle couche de carbone sur une surface de m-SiC sont par exemple décrites par Strupinski et al. et par Razado-Colambo et al.

5 Ainsi, en référence à la figure 3C, la couche de carbone 30 est typiquement composée d'une couche tampon 31 en contact avec la surface en m-SiC du substrat, et une couche superficielle 32 agencée sur la surface de la couche tampon 31. De préférence, la couche superficielle 32 comprend entre une et trois monocouches de graphène. La présence d'une couche de carbone composée d'une couche tampon 31 et une couche
10 superficielle 32 limite fortement la formation de terrasses au cours d'un traitement thermique à température élevée.

Les surfaces de m-SiC du polytype 4H et 6H favorisent la croissance du graphène dans un plan parallèle à la surface de la couche tampon 31. Une telle croissance parallèle limite l'évaporation du silicium de la surface pendant un traitement thermique ultérieur et
15 prévient ainsi la décomposition thermique de la couche de carbure de silicium. La croissance sous forme de graphène limite également la mobilité des atomes de silicium et de carbone sur la surface du substrat. De plus, des surfaces de m-SiC d'une telle structure cristalline sont particulièrement concernées par la formation de terrasses.

Dans le cas d'un substrat d'une grande étendue de surface, il est possible que
20 l'épaisseur de la couche de carbone présente des inhomogénéités. Quand on forme une couche tampon et une couche superficielle, on assure que l'intégralité de la surface du substrat soit protégée par une couche de carbone et on prévient le risque de formation de zones dépourvues d'une couche de carbone sur la surface du substrat.

Dans certains modes de réalisation, on forme uniquement une couche tampon 31.
25 Dans ce cas, on arrête le procédé de formation de la couche de carbone quand la couche tampon est finalisée, et aucune couche superficielle 32 n'est formée. Une telle couche tampon seule peut également limiter la formation de terrasses sur la surface de la couche 20 en m-SiC.

De manière générale, la couche tampon 31 s'étend sur toute la surface du substrat.
30 En revanche, la couche superficielle de graphène 32 peut être agencée sur la totalité ou uniquement sur certaines zones de la couche tampon 31, et/ou présenter des épaisseurs différentes en fonction de la position sur le substrat.

Typiquement, avec une distance croissante du centre du substrat, l'épaisseur de la couche de carbone augmente par la présence des monocouches de graphène. Une telle
35 distribution des monocouches de graphène se produit typiquement lors du traitement simultané de plusieurs substrats superposés, en raison de l'évacuation des atomes de silicium plus efficace dans les zones proches du bord B du substrat.

De manière illustrative et non limitative, en référence à la figure 3D, la couche de carbone peut être constituée d'une couche tampon 31 nue dans une première zone proche du centre C du substrat. La couche de carbone peut comprendre une seconde zone 321 dans laquelle la couche de carbone comprend une seule monocouche de graphène
5 agencée sur la couche tampon 31, et une troisième zone 322 dans laquelle la couche de carbone comprend deux monocouches de graphène agencées sur la couche tampon 31. Dans une quatrième zone s'étendant à partir du bord B, la couche de carbone comprend trois monocouches de graphène agencées sur la couche tampon 31.

La couche tampon 31 présente typiquement une épaisseur d'environ 0,2 nm. La
10 couche superficielle 32 présente typiquement une épaisseur comprise entre 0 et 1 nm. Ainsi, l'épaisseur de la couche de carbone 30 est comprise entre 0,2 et 1,2 nm.

Une épaisseur de la couche de carbone comprise entre 0,2 et 1,2 nm est suffisante pour limiter la formation de terrasses pendant un traitement thermique à une hauteur inférieure à 25 nm. A la pression p_F et la température T_F dans le four, il est possible de
15 couvrir l'étendue de la surface du substrat avec une couche de carbone d'une telle épaisseur. Une épaisseur plus importante est difficile à obtenir car la sublimation des atomes de silicium de la face supérieur du substrat est bloquée par la présence de la couche de carbone déjà formée. La formation de monocouches de graphène supplémentaires est donc plus longue que la formation des premières monocouches et
20 prolongerait inutilement le procédé.

Etapes à haute température nécessitant une couche protectrice

Après la formation de la couche de carbone, on peut procéder à d'autres étapes à réaliser sur le substrat à une température T_T de traitement thermique, typiquement supérieure à la température T_F de formation de la couche de carbone. De telles étapes sont
25 par exemple des recuits pour l'activation de dopants ou des recuits afin de guérir des défauts dans la maille cristalline provoqués pendant une implantation d'espèces ioniques. Une telle implantation peut être utilisée pour le transfert de la couche de m-SiC sur un substrat de base tel que décrit ci-dessous. Une implantation d'espèces ioniques peut également être effectuée pour la réalisation d'un dopage du m-SiC.

Pendant la ou les étapes de recuit, la surface du matériau semiconducteur monocristallin est protégée par la couche de carbone et la formation de terrasses sur ladite surface est ainsi évitée. Une étape de recuit est typiquement effectuée à une température T_T de traitement thermique strictement supérieure à 1300°C, de préférence supérieure à 1500° et plus préférentiellement supérieure à 1700°. Avantagusement, la température du
35 traitement thermique est inférieure ou égale à 2000°C. Typiquement, le traitement thermique est réalisé sous atmosphère d'un gaz de protection, par exemple de l'argon. Pendant cette étape, la pression p_T de traitement thermique dans le four est comprise entre la pression P_F et la pression atmosphérique, par exemple supérieure ou égale à 2 Pa.

Avantageusement, on réalise de tels traitements thermiques directement après la formation de la couche de carbone dans le même four. La montée en température jusqu'à la température du traitement thermique peut être réalisée à partir de la température T_F sans refroidissement intermédiaire. La montée en pression peut être réalisée à partir de la pression p_F sous atmosphère de gaz de protection, sans exposition du substrat à l'air ambiant. Le traitement subséquent dans le même four évite des étapes de refroidissement intermédiaire, d'exposition à l'air ambiant et de sortie et de chargement dans des enceintes différentes. On diminue ainsi la main d'œuvre nécessaire, le temps de refroidissement et chauffage, et le risque de contamination du substrat.

10 Profil de température

De manière illustrative et non limitative, la figure 4 montre un profil de température d'un tel procédé. Le substrat est placé dans le four au temps t_0 . On baisse la pression pour atteindre la pression p_F . Par la suite, on augmente la température jusqu'à la température T_F au temps t_1 . Cette température est par exemple d'environ 1450°C pour une pression p_F de 2.10⁻¹ Pa. La couche de carbone est formée par sublimation jusqu'au moment t_2 . La durée de la formation de la couche de carbone est typiquement comprise entre 10 et 120 minutes. On augmente ensuite la pression dans le four pour arrêter la sublimation du silicium et la formation de carbone à la surface du substrat. Typiquement, la pression est montée jusqu'à environ 2 Pa sous atmosphère d'argon. On chauffe le substrat jusqu'au temps t_3 où on atteint la température T_T nécessaire pour le traitement thermique, par exemple 1700°C. On maintient la température T_T de traitement thermique selon le type de substrat et l'objectif du traitement thermique. Après le traitement thermique, au temps t_4 , on baisse la température du four. Après refroidissement du substrat, au temps t_5 , on peut sortir le substrat du four pour des traitements ultérieurs tels que le polissage.

25 Retrait des terrasses et de la couche de carbone

A la fin des étapes de formation de la couche de carbone et de traitement thermique, on baisse la température afin de sortir le substrat du four.

Les terrasses apparues lors du traitement thermique peuvent ensuite être retirées, par exemple par un polissage mécanique ou mécano-chimique. La couche de carbone est retirée dans la même étape. La faible épaisseur de la couche de carbone permet d'éviter des étapes supplémentaires de retrait de la couche de carbone.

La faible hauteur des marches pouvant apparaître lors du traitement thermique et la faible épaisseur de la couche de carbone permettent de limiter le retrait du carbure de silicium à une épaisseur inférieure ou égale à 200 nm. Cela permet de limiter considérablement le temps de polissage et la consommation de matériau par rapport aux étapes de polissage d'un substrat traité selon un procédé sans couche de protection.

A l'issue de cette étape, le substrat est finalisé. On peut alors utiliser la surface libre en m-SiC pour la croissance par épitaxie d'une couche d'un matériau semiconducteur

monocristallin, par exemple une autre couche de m-SiC ou une couche de GaN, et/ou pour la fabrication d'un composant électronique de puissance ou radiofréquence.

Procédé de fabrication d'une structure semiconductrice

On va maintenant décrire un procédé de fabrication d'une structure semiconductrice pour applications électroniques, présentant une couche superficielle 20 en carbure de silicium monocristallin.

On met à disposition un substrat donneur 220 en carbure de silicium monocristallin à partir duquel la couche superficielle en carbure de silicium monocristallin sera formée. Typiquement, le substrat donneur comprend également des dopants incorporés dans la matrice cristalline. En référence à la figure 5A, comme schématisé par les flèches, on met en œuvre une implantation d'espèces ioniques, telles que de l'hydrogène et/ou de l'hélium, de sorte à former une zone de fragilisation 21 dans le substrat donneur 220. Ladite zone de fragilisation 21 définit une couche 20 en carbure de silicium monocristallin à transférer.

En référence à la figure 5B, on colle le substrat donneur 220 ainsi implanté sur un substrat de base 11. Le substrat donneur peut être collé directement sur le substrat de base comme illustré sur la figure 5B, ou via une ou plusieurs couches intermédiaires qui peuvent être agencées sur le substrat donneur et/ou sur le substrat de base avant le collage (non représentées).

En référence à la figure 5C, on détache ensuite le substrat donneur 220 le long de la zone de fragilisation 21, ce qui conduit au transfert de la couche en carbure de silicium monocristallin sur le substrat de base 11, formant ainsi le substrat 10 tel que représenté sur la figure 2. La portion détachée 221 du substrat donneur peut être réutilisée pour le transfert d'autres couches de carbure de silicium monocristallin sur d'autres substrats de base.

On réalise par la suite un procédé de traitement, comprenant successivement une étape de stabilisation de la surface par la formation d'une couche protectrice 30 en carbone, un recuit à haute température destiné à activer les dopants et/ou guérir les défauts créés dans la couche de carbure de silicium monocristallin lors de l'implantation des espèces ioniques, et le retrait subséquent de la couche protectrice de carbone.

Présentation du four

Afin de rendre un procédé de traitement d'une pluralité de substrats efficace et rapide, on utilise de préférence un four de recuit pouvant traiter simultanément un lot de substrats dans des conditions identiques. Un tel four est classiquement appelé four de « batch anneal » dans le domaine de la microélectronique.

La figure 6 illustre un four 70 adapté pour recevoir une quantité comprise entre 120 et 150 substrats dans une chambre de recuit. Les substrats 10 sont positionnés horizontalement dans le four et sont superposés verticalement afin de traiter un maximum de substrats. On maintient un espace libre entre chaque substrat 10 et les substrats 10 adjacents pour optimiser le flux de gaz et d'obtenir une pression homogène lors de

l'abaissement de la pression. Une pression homogène permet de faciliter la formation de la couche de carbone et d'obtenir une épaisseur de la couche de carbone plus homogène sur l'étendue de chaque substrat. La distance verticale optimale dépend du diamètre des substrats. Typiquement, la distance verticale entre deux substrats superposés est comprise

5 entre 4 et 10 mm pour des substrats d'un diamètre compris entre 150 et 200 mm. La distance entre les substrats peut être augmentée pour des diamètres de substrats importants, et diminuée pour des diamètres inférieurs afin de permettre la circulation de gaz entre deux substrats adjacents, tout en optimisant l'espace dans le four pour permettre le traitement simultané d'un grand nombre de substrats.

10 Un tel four utilise une configuration du type « top flow », c'est-à-dire qu'un flux de gaz peut être acheminé dans le four par le haut 71 et/ou être évacué par une sortie 79 au fond du four. Pendant la formation de la couche de carbone, aucun gaz n'est injecté dans le four. L'abaissement de la pression est réalisé par un pompage à la sortie 79 du four. Lors de la montée en pression, un flux de gaz peut être acheminé dans le four par le haut 71.

15 Tous les éléments de la chambre de recuit à l'intérieur du four, c'est-à-dire les parois intérieures 75, les porte-substrats pour maintenir les substrats dans une position horizontale et verticalement superposés, et le gaz compris dans la chambre de recuit sont à la même température pendant l'utilisation du four, à l'exception des éléments extérieurs tels que la paroi extérieure 76 et les extrémités des tuyaux d'arrivée de gaz. Par la même température,

20 on entend que la différence de température entre l'extrémité 74 du haut du four et l'extrémité 78 du bas du four est minimale, typiquement de quelques degrés °C, par exemple moins de 3 degrés pour une température dans le four entre 800 et 1200°C.

Les substrats sont chauffés principalement par conduction depuis les parois du four. Les gaz sont injectés à la même température que la température à l'intérieur du four.

25 Un four de recuit n'est pas destiné à la formation de couches mais à l'application d'un traitement thermique des substrats mis en place dans le four. Ces fours sont donc optimisés pour une grande homogénéité en température des substrats qui y sont reçus, mais pas pour assurer une homogénéité de l'évacuation de gaz dans l'espace entre les substrats. Le positionnement superposé des substrats nuit notamment à cette homogénéité

30 puisque, lors d'un abaissement de la pression, il est plus difficile d'abaisser la pression dans l'espace entre les substrats proche du centre des substrats qu'au bord de ceux-ci. Il est également plus difficile d'éliminer les atomes de silicium à la suite de la sublimation lors de la création de la couche de carbone.

Afin d'obtenir une couche de carbone homogène, il est nécessaire de contrôler

35 l'épaisseur de sorte à obtenir une épaisseur suffisante sur l'étendue de la surface, de tous les substrats contenus dans le four, en particulier dans la zone centrale des substrats.

La pression p_F comprise entre 0,01 et 0,5 Pa est particulièrement adaptée au traitement d'un lot de substrats dans un tel four.

D'une part, une pression supérieure à 0,5 Pa engendre une évacuation insuffisante des atomes de silicium entre deux substrats adjacents, en particulier proche du centre du substrat. Une évacuation insuffisante entraîne la présence d'un nombre important d'atomes de silicium à proximité de la surface du substrat et empêche ainsi la sublimation d'autres
5 atomes de silicium du m-SiC de la surface du substrat inférieur. Un tel blocage de la sublimation du silicium empêche donc la formation de la couche de carbone.

D'autre part, une pression inférieure à 0,01 Pa est difficile à obtenir dans un four industriel et nécessite un effort et une durée de pompage important. Un tel pompage nécessite de l'équipement supplémentaire et ralentit considérablement le procédé. De plus,
10 il est difficile d'assurer une étanchéité suffisante du four pour obtenir des pressions plus basses de manière fiable.

La formation d'une couche tampon et d'une ou plusieurs épaisseurs de graphène à la surface de chaque substrat permet d'obtenir une épaisseur suffisante et suffisamment homogène pour limiter la formation de terrasses sur chaque substrat. Quand les substrats
15 sont superposés dans un four, on obtient typiquement une épaisseur de la couche de carbone plus importante à proximité du bord de chaque substrat, et une épaisseur plus fine à proximité du centre du substrat. En utilisant une pression p_F de formation de la couche de carbone comprise entre 0,01 et 0,5 Pa, la couche de carbone présente typiquement une épaisseur comprise entre 0,2 et 1,2 nm sur toute l'étendue du substrat.

20 Contrairement à une enceinte de dépôt, un tel four permet de traiter simultanément un grand nombre de substrats grâce à l'agencement en superposition verticale.

Homogénéité de la couche de protection et l'effet sur la formation de terrasses

La figure 7 montre la valeur moyenne quadratique (RMS, acronyme du terme anglo-saxon « Root Mean Square ») de la rugosité de surface engendrée par la formation de
25 terrasses sur une surface en SiC monocristallin, mesurée par AFM. La rugosité est mesurée en fonction de la position radiale sur le substrat.

La courbe r_1 correspond à la rugosité mesurée sur des substrats ayant subi un traitement thermique à 1700°C pendant 30 minutes sans formation d'une couche protectrice de carbone. En raison du flux de gaz limité entre les substrats, on observe une
30 inhomogénéité importante entre les points de mesure proches du centre C du substrat, et les points de mesure proches du bord B du substrat. La rugosité moyenne est supérieure à 15 nm à proximité du centre C, et comprise entre environ 7 et 9 nm à proximité du bord B.

La courbe r_2 correspond à la rugosité de substrats après un traitement comprenant
35 la formation d'une couche de carbone et un traitement thermique à 1700°C pendant 30 minutes. La température et la durée du traitement thermique sont donc identiques à la température et la durée du traitement du substrat de la courbe r_1 . Pendant le traitement thermique, chaque substrat était donc protégé par une couche de carbone respective. La

rugosité est d'environ 5 nm à proximité du centre C et comprise entre 3 et 4 nm à proximité du bord B de chaque substrat. La rugosité d'un substrat comportant une couche de carbone formée par un procédé tel que décrit ci-dessus (courbe r_2) est donc clairement inférieure à la rugosité d'un substrat traité sans couche de carbone (courbe r_1).

5 Dans les deux procédés (courbes r_1 et r_2), les substrats ont été agencés au sein d'un lot de substrats dans un four tel que présenté ci-dessus. La distance verticale entre deux substrats adjacents était de 4mm. La différence de la rugosité au centre et proche du bord est due au flux de gaz limité et la différence des pressions partielles des différents gaz dans la zone au centre entre deux substrats superposés dans le four.

10 La figure 8 montre la hauteur des marches entre deux terrasses formées sur les surfaces en SiC monocristallin des mêmes substrats que dans la figure 7. La hauteur des marches est évaluée en tant que hauteur moyenne dans une zone de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. L'axe des abscisses correspond à la position radiale sur le substrat.

La hauteur des marches des substrats ayant subi un traitement thermique sans
15 formation de couche de carbone est illustrée par la courbe H_1 . La hauteur moyenne H_1 des marches est d'environ 80 nm proche du centre C et d'environ 40 nm proche du bord B du substrat. La courbe H_2 montre la hauteur moyenne des marches pour des substrats après un procédé comprenant la formation d'une couche de carbone tel que décrite ci-dessus, suivie d'un traitement thermique identique au traitement thermique des substrats de la
20 courbe H_1 . La hauteur des marches H_2 sur le substrat protégé par une couche de carbone est comprise entre 30 et 40 nm proche du centre C du substrat, et comprise entre 25 nm et 30 nm proche du bord B du substrat. La hauteur des marches formées lors du traitement thermique est donc considérablement réduite par la présence d'une couche de carbone pour les deux positions radiales respectives.

25 Les figures 9A et 9B sont des images de microscopie par balayage d'un faisceau d'électrons de la surface de m-SiC d'un substrat après un traitement thermique selon un procédé connu sans formation de couche de carbone. Chaque image représente une surface de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$. La figure 9A est l'image d'une zone proche du centre du substrat. La figure 9B est l'image d'une zone à proximité du bord du même substrat. Les terrasses
30 présentent une étendue et une hauteur plus importante dans la zone proche du centre du substrat.

Les figures 10A et 10B sont des images de microscopie par balayage d'un faisceau d'électrons de la surface de m-SiC d'un substrat après un traitement thermique selon un
35 procédé tel que décrit ci-dessus, comprenant la formation d'une couche de carbone par sublimation du silicium. Chaque image représente une surface de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$. La figure 10A est l'image d'une zone proche du centre d'un substrat. La figure 10B est l'image d'une zone à proximité du bord du même substrat. Comme pour le substrat des figures 9A et 9B, les terrasses présentent une largeur et une hauteur plus importantes dans la zone proche du

centre du substrat. Cependant, les terrasses présentent une étendue et une taille considérablement inférieures à celles de toutes les terrasses obtenues sur le substrat après le traitement thermique sans formation d'une couche de carbone.

5 L'étendue des terrasses proches du centre du substrat qui est protégé par une couche de carbone (figure 10A) est inférieure à la taille des terrasses au bord et au centre du substrat traité sans formation d'une telle couche protectrice (figure 9A). De plus, dans la zone à proximité du bord du substrat (figures 9B et 10B), la formation des terrasses été quasiment supprimée par la présence de la couche de carbone.

10 REFERENCES

R. Zhang et al. « Growth of large Domains of Epitaxial Graphene on the C-face of SiC », J. of App. Phys. 2012, 112 (10); doi: 10.1063/1.4765666

J. Bao et al. "Sequential Control of Step-Bunching During Graphene Growth on SiC (0001)", App. Phys. Lett. 2016, 109(8); doi: 10.1063/1.4961630

15 W. Strupinski et al. « Formation mechanism of graphene buffer layer on SiC(1000), Carbon 81 (2015) page 63-72.

I. Razado-Colambo et al. « Structural determination of bilayer graphene on SiC(0001) using synchrotron radiation photoelectron diffraction », Scientific Reports 2018, 8:10190

20

REVENDICATIONS

1. Procédé de traitement d'un substrat (10) comprenant au moins une couche
5 superficielle de carbure de silicium monocristallin, ledit procédé comprenant :
- le placement dudit substrat (10) dans un four,
 - l'abaissement de la pression dans le four jusqu'à une pression (p_F) comprise entre 0,01 et 0,5 Pa,
 - le chauffage du substrat à une température (T_F) supérieure à une
10 température de sublimation du silicium à ladite pression (p_F), de sorte à former une couche de carbone sur la couche de carbure de silicium monocristallin par sublimation du silicium de la surface de ladite couche de carbure de silicium monocristallin, et,
 - après la formation de la couche de carbone (30), un traitement thermique du substrat à une température de traitement thermique (T_T) strictement supérieure à 1300°C
15 et sous une pression (p_T) supérieure à la pression (p_F) de formation de la couche de carbone, la couche de carbone protégeant la surface de la couche de carbure de silicium monocristallin contre la formation de marches.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la température (T_F) de
20 formation de la couche de carbone (30) est comprise entre 1200°C et 1500°C.
3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la couche de carbone (30) est une couche de graphène.
- 25 4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la couche de carbone (30) présente une épaisseur comprise entre 0,2 nm et 1,2 nm.
5. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel une pluralité de substrats (10) est traitée simultanément dans le même four (70).
30
6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel les substrats (10) sont verticalement superposés dans le four (70) de sorte qu'un espace vertical est ménagé entre deux substrats adjacents.
- 35 7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel ledit espace vertical entre deux substrats (10) adjacents présente une hauteur comprise entre 4 et 10 mm.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la température (T_T) du traitement thermique est supérieure ou égale à 1500°C, de préférence supérieure ou égale à 1700°C.
- 5 9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la température (T_T) du traitement thermique est inférieure ou égale à 2000°C.
- 10 10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la pression (p_T) du traitement thermique est supérieure ou égale à 2 Pa.
- 15 11. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la formation de la couche de carbone et le traitement thermique sont mis en œuvre dans le même four.
12. Procédé selon l'une des revendications précédentes, comprenant en outre une étape de retrait de la couche de carbone (30) après le traitement thermique.
- 20 13. Procédé selon l'une des revendications précédentes, comprenant en outre une étape de polissage mécano-chimique après le traitement thermique pour retirer des marches formées à la surface de la couche de carbure de silicium au cours dudit traitement thermique.
- 25 14. Procédé selon la revendication 13, dans lequel ledit polissage mécano-chimique conduit au retrait d'une épaisseur de carbure de silicium inférieure à 200 nm.
15. Procédé de fabrication d'une structure comprenant une couche de carbure de silicium monocristallin sur un substrat support, comprenant successivement :
- la formation d'une zone de fragilisation dans un substrat donneur de carbure de silicium monocristallin par implantation d'espèces ioniques, de sorte à délimiter une couche de carbure de silicium monocristallin à transférer,
 - le collage du substrat donneur sur le substrat support,
 - le détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation de sorte à transférer la couche de carbure de silicium monocristallin sur le substrat support,
 - 35 - la mise en œuvre du traitement selon l'une des revendications précédentes sur la couche de carbure de silicium monocristallin transférée.

16. Procédé selon la revendication 15, dans lequel la couche de carbure de silicium monocristallin comprend des dopants et en ce que le traitement thermique est mis en œuvre à une température adaptée pour activer lesdits dopants.

5

17. Procédé selon l'une des revendications 15 ou 16, dans lequel la couche de carbure de silicium comprend des défauts dus à l'implantation des espèces ioniques et en ce que le traitement thermique est mis en œuvre à une température adaptée pour guérir au moins une partie desdits défauts.

10

18. Procédé selon l'une des revendications 15 à 17 dans leur relation de dépendance vis-à-vis des revendications 13 ou 14, comprenant en outre, après le polissage mécano-chimique, une étape de reprise d'épitaxie de carbure de silicium monocristallin sur la surface de la couche de carbure de silicium monocristallin.

15