# PROCEDE DE TRAITEMENT D'UN SUBSTRAT PRESENTANT UNE SURFACE EN UN MATERIAU SEMICONDUCTEUR

## DOMAINE DE L'INVENTION

La présente invention concerne un procédé de traitement d'un substrat présentant une surface d'un matériau semiconducteur, notamment d'un matériau semiconducteur monocristallin. Le procédé de traitement comprend une étape de stabilisation de la surface et une étape de traitement thermique. L'invention se rapporte en outre à un procédé de fabrication d'une structure semi-conductrice comprenant une étape de stabilisation d'une surface d'un matériau semiconducteur, notamment d'un matériau semiconducteur monocristallin, et une étape de traitement thermique de ladite surface.

## ETAT DE LA TECHNIQUE

Les matériaux semiconducteurs, en particulier le carbure de silicium (SiC), sont largement utilisés pour la fabrication de composants électroniques de puissance ou radiofréquence. Dans certaines applications, on utilise des substrats en SiC monocristallin massif, des substrats comportant une couche superficielle en SiC monocristallin, ou des substrats comportant d'autres matériaux semiconducteurs tels que le nitrure d'aluminium (AlN), le nitrure de gallium (GaN), des alliages de ces nitrures, le phosphure d'indium (InP) ou l'arséniure de gallium (GaAs). Dans certains cas, les substrats semiconducteurs ou les couches semiconductrices sont polycristallin(e)s.

Les substrats pour applications électroniques nécessitent souvent des traitements thermiques lors de leur fabrication, par exemple des recuits pour guérir des défauts dans la maille cristalline provoquée pendant 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.

Cependant, la surface des matériaux semiconducteurs considérés 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 à des traitements à température élevée, typiquement à partir d'environ 1300°C. En l'absence d'une protection adéquate de ladite surface, la morphologie se réorganise pour minimiser l'énergie de surface, formant des terrasses. 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 en outre de l'atmosphère et de la pression auxquelles la surface est exposée. Elle dépend également de l'angle de désorientation de la surface par rapport à un axe de haute symétrie du cristal du matériau semiconducteur. Une telle désorientation est utilisée pour faciliter le contrôle du polytype 4H du SiC lors d'une épitaxie ultérieure de SiC monocristallin et éviter des changements de polytype pendant la croissance du SiC monocristallin. On choisit souvent un angle de 4° pour un tel procédé d'épitaxie. Or, plus cet angle d'inclinaison est grand, plus les marches entre les terrasses sont hautes.

De telles désorientations peuvent aussi apparaitre spontanément sur une surface de SiC polycristallin, dont l'orientation des grains est aléatoire.

Les surfaces des autres matériaux semiconducteurs peuvent présenter le même type de marches. Sur les surfaces comprenant du GaN, des billes de gallium peuvent apparaitre sur la surface pendant l'exposition à une température élevée.

Afin d'obtenir des surfaces lisses, on cherche donc à éviter la formation des terrasses ou de les supprimer dans une étape ultérieure, et, le cas échéant, éviter l'apparition de billes de gallium ou d'un autre matériau.

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 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 est souvent trop fine pour les applications envisagées.

L'article de J. Bao et al. propose d'utiliser des rampes de recuit très rapides pour limiter l'apparition de terrasses. Cette méthode nécessite des montées en température très rapides d'environ 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 $SiH_4$ et l'équipement pour créer la surpression. En outre, des gouttelettes de silicium peuvent apparaitre sur la surface en 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, typiquement un film en carbone d'environ 1 µm d'épaisseur. Cette technique implique l'ajout d'étapes supplémentaires dans le procédé de formation telles que le dépôt d'une résine, la carbonisation de ladite résine à une température comprise entre 600°C et 1000°C, et l'utilisation d'équipements supplémentaires et entraîne un risque de contamination du substrat et du four par la résine. De plus, le dépôt de résine et le retrait d'une couche micrométrique de carbone sont des étapes longues et coûteuses.

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 traitement thermique à une température élevée.

La présence d'oxygène dans l'atmosphère du four peut limiter la formation de terrasses, cependant elle risque de former des puits en surface incompatible avec la reprise d'épitaxie. De plus, les fours à haute température comprennent typiquement des éléments en graphite sensibles à la présence d'oxygène pendant le recuit.

## EXPOSE DE L'INVENTION

Un but de l'invention est de mettre à disposition un procédé de traitement d'un substrat présentant une surface d'un matériau semiconducteur, ledit procédé comprenant une étape de stabilisation de ladite surface et une étape de traitement thermique. Le procédé vise à éviter la formation de terrasses et/ou de billes lors du traitement thermique par une étape simple à mettre en œuvre. L'étape de stabilisation doit être facile à intégrer dans le procédé de fabrication d'un substrat comportant une surface d'un matériau semiconducteur, et ne pas présenter de risque de contamination d'un tel substrat.

A cet objectif, l'invention propose un procédé de traitement d'un substrat présentant une surface libre d'un matériau semiconducteur, notamment d'un matériau semiconducteur monocristallin, comprenant un procédé de stabilisation de ladite surface contre la formation de terrasses et/ou de billes, ledit procédé comprenant

- la formation d'une couche de carbone vitreux par une réaction de carbone en phase gazeuse sur ladite surface à une température supérieure à 700°C, préférablement supérieure à 800°C, et strictement inférieure à 1000°C, préférablement inférieure à 950°, et plus préférablement inférieure à 900°C, et
- un traitement thermique dudit substrat après la stabilisation de ladite surface, dans lequel la couche de carbone vitreux limite la réorganisation de la surface en un matériau semiconducteur sous forme de terrasses,

le dépôt de la couche de carbone et le traitement thermique étant réalisés dans un même four.

La formation de la couche de carbone à une température comprise entre 700°C et 1000°C entraîne une très faible rugosité de la surface du matériau semiconducteur par rapport aux procédés de stabilisation réalisés à des températures plus élevées. De plus, dans de telles conditions, la densité et la taille des particules de carbone se formant à la surface du matériau semi-conducteur pendant la croissance de la couche de carbone et le processus de recuit subséquent peuvent être réduites.

De préférence, la formation de la couche de carbone vitreux est réalisée sous une pression de gaz comprise entre 0,1 et 100 kPa.

De manière avantageuse, la formation de la couche de carbone est réalisée dans un flux de gaz comprenant un gaz carboné et un gaz porteur, le gaz porteur étant de préférence de l'argon.

Avantageusement, le gaz carboné est du propane.

De préférence, la formation de la couche de carbone vitreux est réalisée à une pression partielle du gaz carboné comprise entre 0,1 et 1 kPa.

Le matériau semiconducteur peut être du carbure de silicium.

De manière avantageuse, la couche de carbone présente une épaisseur inférieure ou égale à 100 nm.

Dans certains modes de réalisation, le four comprend des parois intérieures et des éléments de support configurés pour maintenir au moins un substrat, lesdits parois intérieures, lesdits supports et le gaz à l'intérieur du four présentant une même température.

Avantageusement, le four présente au moins une paroi intérieure en carbone.

Le four peut contenir une pluralité de substrats comprenant une surface dudit matériau semiconducteur, lesdits substrats étant superposés verticalement, un espace vertical étant ménagé entre deux substrats adjacents, une couche de carbone étant formée sur la surface du matériau semiconducteur de chacun desdits substrats.

Au moins une partie du traitement thermique peut être réalisée à une température supérieure à 1500°C.

De préférence, le procédé comprend en outre, après le traitement thermique, une étape de retrait de la couche de carbone par polissage mécano-chimique et/ou par gravure ionique réactive et/ou ou par gravure au plasma.

L'invention se rapporte également à un procédé de fabrication d'une structure semiconductrice, comprenant les étapes suivantes :

- la formation d'une zone de fragilisation par implantation d'espèces ioniques dans un substrat donneur en un matériau semiconducteur, notamment en un matériau semiconducteur monocristallin,
- le collage dudit substrat donneur sur un substrat support,
- le détachement du substrat donneur le long de la zone de fragilisation de sorte à transférer une couche du matériau semiconducteur sur le substrat support,
- un procédé de traitement tel que décrit ci-dessus, de sorte à guérir les défauts créés dans la couche du matériau semiconducteur lors de l'implantation des espèces ioniques, dans lequel la couche de carbone est formée sur la surface libre de la couche du matériau semiconducteur transférée sur le substrat support.

## BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

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

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

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

La figure 4 illustre le substrat de la figure 3 après ablation de la couche de carbone.

Les figures 5A à 5C illustrent la fabrication d'un substrat comportant une portion en un matériau semiconducteur monocristallin sur sa face avant.

La figure 6A montre un exemple de profil thermique utilisé pour un premier mode de réalisation d'un procédé selon l'invention.

La figure 6B montre un exemple de profil thermique utilisé pour un deuxième mode de réalisation d'un procédé selon l'invention.

La figure 7A est une image par microscopie à force atomique (AFM) illustrant la rugosité induite par les terrasses à la surface d'un substrat ayant subi un traitement thermique à 1500°C sans application de couche de carbone.

La figure 7B est une image par microscopie à force atomique illustrant la rugosité de la surface d'un substrat ayant subi un traitement thermique à 1500°C avec une couche de carbone vitreux selon l'invention.

La figure 8A est une image par AFM montrant la rugosité de la surface d'une couche de carbone obtenue par un dépôt à 900°C pendant 10 min après mise en œuvre d'un recuit à 1700°C.

La figure 8B est une image par AFM montrant la rugosité de la surface d'une couche de carbone obtenue par un dépôt à 1000°C pendant 10 min après mise en œuvre d'un recuit à 1700°C.

La figure 9 illustre un four de recuit adapté pour la formation d'une couche de carbone selon un mode de réalisation préféré de l'invention.

## DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION

La figure 2 illustre un substrat 10 comportant un substrat support 11 et une portion 20 en un matériau semiconducteur monocristallin ou polycristallin sur sa face avant. Le substrat support 11 peut être tout type de substrat support adapté pour le dépôt ou le transfert d'une portion 20 en un matériau semiconducteur monocristallin ou polycristallin, par exemple un substrat support en un matériau semiconducteur polycristallin.

De manière alternative, le substrat 10 peut être un substrat massif en un matériau semiconducteur monocristallin ou polycristallin, c'est-à-dire que le substrat support 11 et la portion 20 constituent ensemble une seule portion en un matériau semiconducteur monocristallin ou polycristallin massif.

De préférence, la portion 20 sur la face avant du substrat est en un matériau semiconducteur monocristallin. Toutefois, le matériau semiconducteur qui forme la face avant du substrat 10, et qui compose donc soit la portion 20 (dans le cas d'un substrat 10 comportant un substrat support 11 et une portion 20) soit le substrat 10 (dans le cas d'un substrat massif) est également susceptible d'être un matériau polycristallin.

Dans la suite de la description, puisque le cas d'un substrat 10 comportant un substrat support 11 et une portion 20 monocristalline est détaillée, le matériau qui compose la portion 20 sera désigné par l'expression « matériau semiconducteur monocristallin » pour le distinguer du matériau composant le substrat support 11. Toutefois, le procédé décrit ci-dessous est également applicable au cas d'un matériau semiconducteur polycristallin, chaque grain étant alors susceptible d'être considéré comme un monocristal.

Selon un mode de réalisation préféré, le matériau semiconducteur monocristallin est du carbure de silicium.

Selon d'autres modes de réalisation, le matériau semiconducteur monocristallin est choisi parmi : le nitrure d'aluminium (AlN), le nitrure de gallium (GaN), des alliages de ces nitrures $Al_xGa_{(1-x)}N$, x étant un nombre compris entre 0 et 1, le phosphure d'indium (InP) ou l'arséniure de gallium (GaAs).

Typiquement, la surface 200 de la portion 20 en un matériau semiconducteur monocristallin ou, le cas échéant, du substrat en un matériau semiconducteur monocristallin massif, est légèrement désaxée. Par exemple, si le matériau semiconducteur est du SiC, la surface peut être désaxée par rapport à la structure cristalline du SiC pour faciliter le contrôle du polytype 4H pendant la croissance.

Dans le cas d'un matériau semiconducteur polycristallin, certains des grains peuvent présenter un tel désaxage par rapport à la structure cristalline du SiC. Par exemple suite à la découpe ou au polissage du substrat 10 de manière à faire apparaître une face spécifique du substrat 10, des grains dont l'orientation est orientée aléatoirement par rapport à cette face présenteront un désaxage.

Formation de la couche protectrice

On forme par la suite, en référence à la figure 3, une couche de carbone vitreux 30 sur la surface 200 de la portion 20 en un matériau semiconducteur monocristallin. La couche de carbone vitreux est continue et couvre l'intégralité de la surface à protéger, c'est-à-dire la face avant du matériau monocristallin. Typiquement la couche de carbone vitreux

30 est déposée sur toutes les surfaces libres du substrat et couvre donc simultanément la face avant et la face arrière du substrat. Cela permet de protéger simultanément la face arrière contre la formation de terrasses et, dans le cas d'un substrat en carbure de silicium, contre une évaporation du silicium pendant le traitement thermique.

Ladite couche de carbone protège la surface du substrat 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 est retirée après finalisation des traitements à haute température pour obtenir une surface du matériau semiconducteur monocristallin propre et de bonne qualité cristalline. L'épaisseur de la couche de carbone est de préférence inférieure à 100 nm pour permettre un retrait facile à la fin d'un procédé à haute température.

Le caractère vitreux de la couche de carbone est obtenu à partir d'une épaisseur de carbone de quelques nanomètres ; pour une épaisseur inférieure, le carbone se présente sous la forme d'une ou deux monocouches de graphène. Lorsque l'épaisseur est suffisante pour obtenir du carbone vitreux, la couche protectrice présente une structure tridimensionnelle non organisée à longue échelle de distance, qui est stable dans toute la gamme de températures auxquelles la surface est exposée pendant le procédé, et qui permet une couverture totale de la surface du substrat. L'uniformité d'une couche de carbone vitreux est plus facile à contrôler sur l'étendue de la surface du substrat.

Avantageusement, la formation de la couche de carbone vitreux est réalisée dans un four qui sera décrit ultérieurement. La couche de carbone est formée en phase gazeuse, c'est-à-dire que le carbone est présent dans le four sous une forme gazeuse. Le substrat est chauffé dans le four à une température de dépôt de la couche protectrice, et la phase gazeuse de carbone se transforme en carbone solide par une réaction avec la surface chaude du substrat.

La température et la pression de gaz dans le four sont choisies pour éviter la dégradation de la surface à protéger lors du dépôt de la couche de carbone. La température dans le four est, pendant la formation de la couche de carbone, supérieure à 700°C et strictement inférieure à 1000°C, avantageusement inférieure à 950°C. De préférence, la température pendant la formation de la couche de carbone est comprise entre 800°C et 900°C pour protéger la surface du substrat de manière efficace.

Les températures inférieures à 800°C provoquent un ralentissement du procédé. Pour des températures inférieures à 700°C, le ralentissement est tel qu'il nuit à l'efficacité du procédé.

Lors de la formation de la couche de carbone et le traitement thermique successif, on observe souvent une apparition de particules de carbone sur la surface du substrat. La

densité et la taille desdites particules de carbone est considérablement réduite à une température de formation de la couche de carbone strictement inférieure à 1000°C et plus avantageusement inférieure à 900°C. Les températures plus élevées, notamment à partir de 1000°C, provoquent une apparition de particules d'une taille importante, pouvant aller jusqu'à environ 60 nm. Ces particules se forment à la surface du substrat lors de la formation de la couche de carbone et du traitement thermique subséquent. Une température de formation de la couche de carbone à partir de 1000°C augmente donc la rugosité de la surface du substrat.

Une étape de polissage, par exemple un polissage mécano-chimique pour le retrait de la couche de carbone, est plus facile à mettre en œuvre et implique moins de risques de rayures de la surface quand le nombre et la taille de telles particules sont réduites.

De plus, en réduisant la densité et la taille des particules de carbone sur la surface, on réduit le risque de contamination d'autres substrats ou composants par de telles particules, par exemple dans un environnement de production de composants électroniques.

La réduction de la rugosité de la surface permet en outre de plus facilement contrôler l'épaisseur de la couche de carbone déposée.

La plage de températures comprise entre 700 et 950°C, de préférence entre 800 et 900°C, permet ainsi de contrôler facilement l'épaisseur de la couche de carbone déposée par un procédé efficace, en évitant l'apparition de particules de carbone présentant une taille et densité trop importante pour la fabrication des composants électroniques de puissance et radiofréquences.

Avantageusement, la source de carbone est un gaz carboné, par exemple du propane ($C_3H_8$). De manière alternative, le gaz porteur peut être du méthane ($CH_4$) ou de l'éthane ($C_2H_6$). L'utilisation du propane en tant que gaz porteur permet de former la couche de carbone de manière plus rapide en raison de la liaison C-C des atomes de carbone qui est plus facile à rompre que les liaisons C-H dans le méthane et l'éthane.

Le gaz carboné est mélangé avec un gaz porteur, par exemple de l'argon ou un mélange d'argon et d'hydrogène. Le gaz porteur est un gaz neutre qui n'intervient pas dans la réaction chimique de formation de couche. Typiquement, le mélange des gaz est réalisé dans l'enceinte du four à la température du dépôt. Le débit des gaz peut être facilement contrôlé et ajusté aux conditions de dépôt de la couche de carbone.

Typiquement, le dépôt de la couche de carbone est réalisé sous une pression de gaz comprise entre 0,1 et 100 kPa (entre 1 mbar et 1 bar), qui est facile à maintenir dans un four industriel. La pression partielle du gaz carboné est typiquement ajustée à une valeur comprise entre 0,1 et 1 kPa (entre 1 mbar et 10 mbar). Une telle concentration permet

d'éviter une saturation de l'atmosphère du four, ce qui permet un meilleur contrôle de l'épaisseur de la couche de carbone déposée.

Avantageusement, l'épaisseur de la couche protectrice de carbone est inférieure à 100 nm, par exemple comprise entre 50 nm et 100 nm. La durée requise pour l'obtention d'une telle couche dépend de la température et de la pression partielle du gaz carboné et est typiquement comprise entre deux secondes et deux heures. La température pendant la formation de la couche, la pression et type de gaz carboné et la durée de l'étape permettent d'ajuster l'épaisseur de la couche de carbone déposée.

La couche de carbone peut être caractérisée par des techniques d'analyse de surfaces, par exemple par microscopie à force atomique (AFM pour « Atomic Force Microscope »), réflectométrie des rayons X (XRR pour « X-ray reflectivity »), spectroscopie Raman ou microscopie électronique à basse énergie (LEEM pour « Low Energy Electron Microscopy »).

La couche de carbone est stable au moins jusqu'à une température de 2000°C et permet de limiter la formation de terrasses pendant que le substrat est exposé à une température supérieure à la température de formation de terrasses.

Etapes à haute température nécessitant la 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 supérieure à la température de formation de terrasses. De telles étapes sont par exemple des recuits afin de guérir des défauts dans la maille cristalline provoqués pendant une implantation d'espèces ioniques, pour modifier la structure cristalline du substrat, ou pour l'activation de dopants. Pendant ces étapes, la surface du matériau semiconducteur monocristallin est protégée par la couche de carbone et la formation de terrasses sur ladite surface est évitée. Les étapes de recuit sont effectuées à des températures comprises entre 1300°C et 1900°C, typiquement supérieures à 1500°C.

La formation de la couche de carbone et le traitement thermique sont réalisés dans le même four, qui est avantageusement un four traditionnellement utilisé pour effectuer des recuits de substrats par lot.

Un four montant à des températures supérieures à 1500°comprend généralement des éléments en graphite en raison de la bonne stabilité de ce matériau à haute température. En tout état de cause, la formation de la couche de carbone dans un tel four ne provoque que le dépôt d'une très fine couche de carbone qui n'affecte pas le fonctionnement de ces éléments constitués du même matériau que la couche.

Retrait de la couche protectrice

A la fin des étapes de recuit, on baisse la température à une température inférieure à la température de formation de terrasses, c'est-à-dire inférieure à 1300°C.

Dans certains modes de réalisation, le retrait peut être effectué dans le même four que celui dans lequel les étapes de formation de la couche protectrice en carbone et/ou les étapes à haute température ont été réalisées. Dans ce cas, on baisse la température jusqu'à une température pour l'ablation de la couche de carbone, par exemple d'environ 900°C. On peut ensuite retirer la couche de carbone car la température est suffisamment basse pour qu'aucune formation de terrasses ne se produise sur la surface du matériau semiconducteur. La faible épaisseur de la couche de carbone favorise un retrait rapide et sans résidus sur le substrat.

Le retrait de la couche en carbone peut être réalisé par un plasma réactif, par exemple un plasma d'oxygène selon la réaction :

$$C(\text{solide}) + O_2(\text{gazeux}) \rightarrow CO_2(\text{gazeux})$$

Dans d'autres modes de réalisation, le substrat est refroidi après l'étape de traitement thermique et transféré vers une autre enceinte ou un autre dispositif pour le retrait de la couche en carbone. Un tel transfert est par exemple nécessaire si des éléments du four sont en graphite non-protégé ou d'autres matériaux pouvant être endommagés par un contact avec le plasma réactif, et que l'ablation de la couche de carbone est réalisée par plasma.

De manière alternative, la couche de carbone peut être retirée par gravure ionique réactive (RIE, acronyme du terme anglo-saxon « Reactive Ion Etching »), par exemple par des ions d'oxygène ou d'un mélange d'oxygène et d'hexafluorure de soufre après un transfert dans une enceinte adaptée.

Afin de retirer d'éventuels résidus de carbone et/ou d'assurer une bonne qualité de la surface du matériau semiconducteur monocristallin, une étape de polissage mécano-chimique adaptée peut être effectuée après le retrait de la couche de carbone.

Dans certains cas, la couche de carbone est retirée pendant une étape de finition du substrat après la sortie du four, par exemple pendant une étape de polissage mécano-chimique ou polissage mécanique.

A l'issue de l'étape de retrait, en référence à la figure 4, le substrat 11 est finalisé et la couche de carbone est retirée. On peut maintenant utiliser le substrat 11 et la surface libre du matériau semiconducteur monocristallin pour la croissance par épitaxie d'une couche d'un matériau semiconducteur monocristallin (identique ou différent de celui du

substrat 11) et/ou la fabrication d'un composant électronique de puissance ou radiofréquence.

Dans certains cas, la couche de carbone sur la face arrière du substrat est retirée avec la couche sur la face avant. Dans d'autres modes de réalisation, la couche de carbone vitreux agencée sur la face arrière du substrat est conservée à cette étape et pendant la fabrication d'un dispositif électronique sur la face avant pour protéger la face arrière pendant ces étapes. Dans ce cas, la couche de carbone sur la face arrière est retirée avant ou pendant une étape d'amincissement du substrat, par exemple par meulage.

Déroulement d'un procédé de fabrication d'une structure semiconductrice

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

On met à disposition un substrat donneur 220 de préférence en carbure de silicium monocristallin à partir duquel la couche superficielle en carbure de silicium monocristallin sera formée. 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 appliquées sur le substrat donneur et/ou sur le substrat de base avant le collage (non représenté).

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 support 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 du substrat 10, comprenant successivement une étape de stabilisation de la surface par la formation d'une couche protectrice en carbone vitreux, un recuit à haute température destiné à guérir les défauts créés dans la couche de carbure de silicium monocristallin lors de l'implantation des espèces ioniques, et réalise un retrait subséquent de la couche protectrice de carbone.

Le procédé comprenant la formation de la couche de carbone et le traitement thermique est réalisé dans un même four. Ainsi, on évite un transfert du substrat d'une

chambre de dépôt dédiée au dépôt de la couche protectrice vers un four de recuit, et ainsi obtenir un procédé plus simple, plus rapide et en minimisant le risque de contamination du substrat.

La figure 6A illustre un profil de température pour un mode de réalisation d'un tel procédé en fonction du temps. On peut distinguer trois séquences principales du procédé qui correspondent à la formation d'une couche protectrice en carbone (S1), un recuit à haute température (S2), c'est-à-dire au-dessus de la température à laquelle la formation de terrasses débute, et une étape de retrait de la couche protectrice (S3).

Le gaz injecté en haut du four est évacué sous un flux du gaz porteur par le bas du four pendant toutes les séquences du procédé.

La première séquence S1 commence à un temps t0. Le substrat se trouve à température ambiante qui est typiquement d'environ 20°C ou à une température inférieure à la température de formation de terrasses. On introduit le substrat dans la chambre de dépôt. On commence à chauffer le substrat à une température T1 de dépôt de la couche de carbone vitreux. La température de dépôt T1 est supérieure à 700°C et strictement inférieure à 1000°C. Ainsi, T1 est inférieure à la température de début de formation de terrasses qui est d'environ 1300°C à une pression de 101 kPa (1 atm), voire d'environ 1200 ou 1100°C à des pressions plus basses. La température T1 est également inférieure à la température d'environ 1000°C pouvant provoquer une augmentation de la rugosité de la surface.

A partir d'un temps t1, on injecte un flux de gaz comprenant un gaz carboné et un gaz porteur dans le four.

Le dépôt de la couche de carbone commence à un temps t1. La durée de la formation de la couche de carbone est typiquement comprise entre deux secondes et deux heures jusqu'au temps t2. Pendant ce temps, on maintient la température de dépôt T1 constante. La pression dans le four est maintenue entre 0,1 et 100 kPa (entre 1 mbar et 1 bar).

Le débit des gaz injectés dépend du volume de la chambre est contrôlée pour obtenir une pression partielle du gaz carboné comprise entre 0,1 et 1 kPa (entre 1 mbar et 10 mbar). La température de dépôt T1 et le débit de gaz carboné peuvent être ajustés pour obtenir une couche de carbone avec une épaisseur et une homogénéité souhaitées adaptées pour une protection optimale pendant la séquence suivante, et pendant un temps suffisamment court pour optimiser le procédé en termes de durée et de coût.

L'alimentation en gaz carboné est arrêtée à la fin de la séquence S1. Les résidus du gaz carboné sont évacués sous le flux du gaz porteur.

Quand le dépôt de la couche de carbone est achevé à un temps t2, on procède à la deuxième séquence S2. La deuxième séquence S2 comprend un échauffement à partir de la température de dépôt T1 à une température de recuit T2 et un plateau de température d'une durée qui est par exemple comprise entre 30 et 120 min. La température de recuit T2 et la durée du traitement sont choisies en fonction de l'état et du substrat avant le procédé en cours, et de la structure cristalline du substrat envisagée. Typiquement, le recuit est réalisé à une température T2 supérieure à 1500°C, par exemple comprise entre 1600°C et 1900°C.

Le traitement thermique de la deuxième séquence est réalisé dans le même four que la formation de la couche de carbone de la première séquence.

A la fin de la séquence S2, le substrat est refroidi pour conserver les propriétés cristallines obtenues lors du recuit. A un temps t3, le substrat atteint une troisième température T3 de 900°C.

Dans certains modes de réalisation, en référence à la figure 6A, on procède directement à une troisième séquence S3 pendant laquelle la couche protectrice en carbone est retirée par oxydation, comme décrit précédemment. Pendant cette étape, de l'oxygène peut être injecté dans le four pour créer un plasma réactif.

Pendant cette étape, la température T3 = 900°C est maintenue constante. La durée du retrait et typiquement comprise entre 10 et 120 s à un taux de taux de décapage d'environ 100 nm par minute. La durée totale de la séquence S3 comprend également une stabilisation du four et est typiquement comprise entre cinq minutes et une heure. Quand, au temps t4, la couche de carbone est complètement retirée, on refroidit le four afin de sortir le substrat.

La figure 6B illustre un profil de température pour un mode de réalisation dans lequel l'étape de retrait de la couche de carbone est réalisée à l'extérieur du four. Les séquences S1 et S2 sont réalisées telles que décrites ci-dessus. A la fin de la séquence S2, le substrat est refroidi jusqu'à une température proche de la température ambiante permettant l'ouverture du four et la sortie du substrat. Le retrait de la couche de carbone est réalisé pendant la séquence S3' à l'extérieur du four. Dans ce cas, on réalise une étape de transfert du four de recuit vers une enceinte de retrait de la couche protectrice ou vers un dispositif de polissage au moment t3. Quand le procédé de traitement du substrat comprend une étape de transfert, les différentes séquences peuvent être réalisées séparément dans le temps. Selon la technique d'ablation de la couche de carbone vitreux mise en œuvre, la séquence S3 peut comprendre un échauffement à une température inférieure à la température de formation de terrasses ou être réalisée à température ambiante.

Effet de la couche de protection sur la formation de terrasses

Les figures 7A et 7B sont des images par microscopie à force atomique (AFM) sur une surface de 30x30 $\mu m^2$ de deux substrats respectifs présentant chacun une surface en carbure de silicium monocristallin.

La figure 7A est une image AFM d'un substrat ayant subi un traitement thermique à 1500°C sans application de couche de carbone. Des terrasses se sont formées sur la surface du substrat, visibles sous forme de traits verticaux sur l'image AFM. La valeur moyenne quadratique (RMS, acronyme du terme anglo-saxon « Root Mean Square ») de la rugosité de surface induite par les terrasses est d'environ 16 nm.

La figure 7B est une image AFM illustrant la rugosité de la surface d'un substrat du même type, ayant également subi un traitement thermique à 1500°C. Le substrat de la figure 7B a été protégé par une couche de carbone vitreux formée à une température de 900 °C et une pression inférieure à 5 kPa (50 mbar) pendant 10 minutes avant le traitement thermique. La couche de carbone était formée dans une atmosphère comprenant de l'argon en tant que gaz porteur et du propane en tant que gaz carboné. Le taux du propane dans le mélange était inférieur à 30%.

L'image du substrat protégé ne montre aucune structure de traits parallèles indiquant la présence de terrasses. La valeur moyenne quadratique de la rugosité de surface est d'environ 0,2 nm. La rugosité du substrat protégé par la couche de carbone est donc considérablement inférieure à la rugosité du substrat sans couche protectrice.

Effet de la température pendant la formation de la couche de carbone

Les figures 8A et 8B sont des images par AFM sur une surface de 5x5 $\mu m^2$ de deux substrats respectifs présentant une surface en carbure de silicium monocristallin. Chaque substrat comporte une couche protectrice de carbone. Les couches de carbone ont été déposées à des températures différentes. Chaque substrat respectif a subi un traitement thermique à 1500°C dans des conditions identiques.

Le substrat de la figure 8A est protégé par une couche de carbone déposée pendant 10 minutes à une température de 900°C, conformément à un mode de réalisation préféré de l'invention. La courbe sous l'image AFM montre le profil en hauteur de la portion agrandie de l'image sur une longueur l de 100 nm. Dans cette zone, les plus grandes particules sur la surface présentent une hauteur h d'environ 1,5 nm.

Le substrat de la figure 8B est protégé par une couche de carbone déposée pendant 10 minutes à une température de 1000°C, c'est-à-dire dans des conditions non couvertes par l'invention. Cette image présente une structure plus granuleuse que l'image de la figure 8A, indiquant une rugosité plus importante de la surface. Un profil de hauteur sur une

longueur l de 500 nm de cette surface est représenté sous l'image AFM. Dans ce profil, on distingue des grains de plus grande taille, allant jusqu'à une hauteur h d'environ 15 nm.

La couche de carbone formée à 900°C présente donc une rugosité considérablement inférieure à la couche formée à 1000°C. Du fait que la rugosité augmente avec la température de la formation de la couche de carbone, il est nécessaire de former la couche de carbone à une température strictement inférieure à 1000°C.

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 maximum de substrats dans des conditions identiques. Un tel four est classiquement appelé four de « batch anneal » dans le domaine de la microélectronique.

La figure 9 illustre un four 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 dans le même flux 73 de gaz chaud. On maintient un espace libre entre chaque substrat 10 et les substrats 10 adjacents pour optimiser le flux de gaz et faciliter la formation de la couche de carbone. Typiquement, la distance verticale entre deux substrats adjacents est comprise entre 2 et 20 mm.

Un tel four utilise une configuration du type « top flow », c'est-à-dire qu'un flux de gaz est acheminé dans le four par le haut 71 et, après le passage du four, est évacué par une sortie 79 au fond du four. Typiquement un flux de gaz porteur transporte le gaz carboné (typiquement propane) pour la formation de la couche carbonée. Dans certains cas, on ajoute d'autres gaz dans le four, par exemples des gaz du type catalyseur pour favoriser la décomposition du gaz carboné.

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, 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 Celsius, 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 flux du gaz sont injectés à la même température que la température à l'intérieur du four.

Un four de recuit n'est pas destiné au dépôt 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 permettre une optimisation d'un dépôt de matière, notamment pour assurer une homogénéité de flux de gaz sur la surface des substrats. Le positionnement superposé des substrats nuit notamment à cette homogénéité puisque les gaz accèdent plus difficilement au centre des substrats qu'au bord de ceux-ci. Cependant, ce type de four se prête néanmoins au dépôt de couches de carbone pour protéger la surface d'un matériau semiconducteur contre la formation de terrasses, notamment parce que l'homogénéité de l'épaisseur de la couche de carbone n'est pas un critère déterminant tant que la totalité de la surface à protéger est couverte. L'utilisation temporaire de la couche de carbone ne demande pas une homogénéité accrue de cette couche. Cependant, il est nécessaire de contrôler l'épaisseur de sorte à obtenir une épaisseur suffisante sur l'étendue de la surface de tous les substrats contenus dans le four. L'utilisation d'éléments en graphite à l'intérieur du four est compatible avec le dépôt de la couche de carbone du fait qu'il s'agit du même matériau et que l'épaisseur de la couche déposée est faible par rapport aux dimensions desdits éléments.

Contrairement à une enceinte d'épitaxie, un tel four permet de traiter simultanément un grand nombre de substrats grâce à l'agencement en superposition verticale. De plus, un tel four permet de réaliser l'étape de dépôt de la couche de carbone et du recuit dans la même chambre, ce qui évite un risque de contamination pendant un transfert entre deux enceintes différentes. On évite des étapes de transfert entre une enceinte de dépôt de la couche de carbone et un four de recuit, évitant ainsi un refroidissement entre les étapes respectives, le besoin de main d'œuvre pour le transfert et ainsi une perte de temps et d'efficacité.

**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

## REVENDICATIONS

1. Procédé de traitement d'un substrat présentant une surface libre d'un matériau semiconducteur, notamment d'un matériau semiconducteur monocristallin, comprenant un procédé de stabilisation de ladite surface contre la formation de terrasses et/ou de billes, ledit procédé comprenant

- la formation d'une couche de carbone vitreux (30) par une réaction de carbone en phase gazeuse sur ladite surface à une température (T1) supérieure à 700°C, préférablement supérieure à 800°C, et strictement inférieure à 1000°C, préférablement inférieure à 950°, et plus préférablement inférieure à 900°C, et
- un traitement thermique dudit substrat après la stabilisation de ladite surface, dans lequel la couche de carbone vitreux (30) limite la réorganisation de la surface en un matériau semiconducteur sous forme de terrasses,

le dépôt de la couche de carbone (30) et le traitement thermique étant réalisés dans un même four.

2. Procédé de traitement selon la revendication 1, dans lequel la formation de la couche de carbone vitreux (30) est réalisée sous une pression de gaz comprise entre 0,1 et 100 kPa (entre 1 mbar et 1 bar).

3. Procédé de traitement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la formation de la couche de carbone est réalisée dans un flux de gaz comprenant un gaz carboné et un gaz porteur, le gaz porteur étant de préférence de l'argon.

4. Procédé de traitement selon la revendication 3, dans lequel le gaz carboné est du propane.

5. Procédé de traitement selon l'une quelconque des revendications 3 ou 4 en combinaison avec la revendication 2, dans lequel la formation de la couche de carbone vitreux (30) est réalisée à une pression partielle du gaz carboné comprise entre 0,1 et 1 kPa (entre 1 mbar et 10 mbar).

6. Procédé de traitement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le matériau semiconducteur est du carbure de silicium.

7. Procédé de traitement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la couche de carbone (30) présente une épaisseur inférieure ou égale à 100 nm.

8. Procédé de traitement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le four (70) comprend des parois intérieures (75) et des éléments de support configurés pour maintenir au moins un substrat (10), lesdits parois intérieures (75), lesdits supports et le gaz à l'intérieur du four (70) présentant une même température.

9. Procédé de traitement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le four (70) présente au moins une paroi intérieure (75) en carbone.

10. Procédé de traitement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le four (70) contient une pluralité de substrats comprenant une surface dudit matériau semiconducteur, lesdits substrats étant superposés verticalement, un espace vertical étant ménagé entre deux substrats adjacents, une couche de carbone (30) étant formée sur la surface du matériau semiconducteur de chacun desdits substrats.

11. Procédé de traitement selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel au moins une partie du traitement thermique est réalisée à une température supérieure à 1500°C.

12. Procédé de traitement selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant en outre, après le traitement thermique, une étape de retrait de la couche de carbone (30) par polissage mécano-chimique (CMP) et/ou par gravure ionique réactive et/ou ou par gravure au plasma.

13. Procédé de fabrication d'une structure semiconductrice, comprenant les étapes suivantes :

- la formation d'une zone de fragilisation (21) par implantation d'espèces ioniques dans un substrat donneur (220) en un matériau semiconducteur, notamment en un matériau semiconducteur monocristallin,
- le collage dudit substrat donneur (220) sur un substrat support (11),
- le détachement du substrat donneur (220) le long de la zone de fragilisation (21) de sorte à transférer une couche (20) du matériau semiconducteur sur le substrat support (11),
- un procédé de traitement selon l'une des revendications 1 à 12, de sorte à guérir les défauts créés dans la couche du matériau semiconducteur (20) lors de l'implantation des espèces ioniques, dans lequel la couche de carbone (30) est formée sur la surface libre (200) de la couche (20) du matériau semiconducteur transférée sur le substrat support.