Description

Titre de l'invention : SUPPORT MUNI D'UNE COUCHE D'OXYDE DE GRAPHÈNE, PREVU POUR LE TRANSFERT D'UNE COUCHE PAR SÉPARATION LASER, ET PROCÉDÉ DE FABRICATION

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

[0001] L'invention concerne un support muni d'une ou plusieurs couches à transférer et destinées à être séparées d'au moins une partie du support par irradiation laser au niveau d'une couche de séparation inclue dans le support, en vue de la fabrication de produits dans le domaine des semi-conducteurs.

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE

[0002] L'industrie des semiconducteurs emploie de plus en plus de techniques de transfert de couche mince, qui consistent, à une première étape, à former une couche mince sur un premier substrat, puis, à une seconde étape, à transférer la couche mince formée sur un second substrat.

[0003] Le premier substrat peut être choisi pour sa compatibilité avec les conditions de formation de la couche mince, ou bien la couche mince peut être formée dans la masse du matériau formant ce premier substrat.

[0004] Le second substrat est adapté à l'exploitation de cette couche mince, par exemple en étant compatible avec des étapes de fabrications ultérieures ou bien même en étant porteur d'une structure sur laquelle la couche mince va venir s'intégrer.

[0005] Parmi les techniques de transfert de couches minces employées dans l'industrie du semi-conducteur, la séparation par laser (laser lift-off ou LLO selon la terminologie anglaise généralement employée) est apparue comme une méthode efficace pour séparer un film ou un empilement de plusieurs films ou une ou plusieurs couches minces d'un substrat porteur à l'aide d'une couche, dite couche de séparation, dont la séparation ou la dégradation est déclenchée par laser.

[0006] En général, la couche de séparation est irradiée par laser à travers le substrat porteur. La couche de séparation doit absorber une quantité suffisante de lumière à la longueur d'onde du laser afin de favoriser la séparation ou sa dégradation (par exemple en faisant fondre localement la couche de séparation ou en provoquant sa dissociation en composant élémentaire), alors que le substrat porteur doit être essentiellement transparent à cette longueur d'onde. Un équilibre entre la puissance du laser, la longueur d'onde du laser et le choix des matériaux (pour la couche de séparation et le substrat porteur) doit être trouvé afin de permettre la séparation tout en préservant la couche ou les couches à transférer de l'impact de la dissipation d'énergie due aux

processus d'interaction avec la lumière : transfert de chaleur dû à l'absorption dans la couche de séparation ou absorption directe d'une partie de l'irradiation laser par la couche ou les couches à transférer.

[0007] Le brevet US 11,069,865 B2 décrit un procédé de fabrication d'un panneau d'affichage OLED flexible, dans lequel le panneau d'affichage est fabriqué sur une plaque de verre recouverte d'une couche de séparation organique absorbant fortement les rayonnements UV. Le panneau d'affichage est détaché de la plaque verre par une opération de séparation par laser, dans laquelle la couche de séparation, capable d'absorber un rayonnement ultraviolet, est irradiée à travers la plaque de verre par un laser opérant dans le domaine ultraviolet, facilitant la séparation.

[0008] Le nombre de matériaux candidats agissant comme couche de séparation est limité et encore plus rare si l'on considère les spécifications de contamination dans les procédés de production de dispositifs semiconducteurs, en particulier durant les opérations dites de « front-end » en terminologie anglaise. L'un des matériaux les plus utilisés est le nitrure de gallium GaN, qui constitue une solution intéressante pour le LLO par irradiation dans l'ultraviolet UV (désigné comme UV-LLO), comme décrit dans le brevet US 8,598,014 B2.

[0009] Cependant, l'utilisation du GaN dans les lignes de production est souvent associée à la contamination dans les lignes de « front-end » et de « back-end ». En outre, l'UV-LLO associé au GaN nécessite des couches épaisses de GaN, dont une partie est brûlée par le laser pour effectuer le LLO et une partie restante est affectée par la température élevée provoquée par l'irradiation laser. L'utilisation de l'UV pour le LLO est également fastidieuse car elle nécessite une installation laser complexe et présente des risques liés à l'énergie tant pour les échantillons que pour les opérateurs.

[0010] Le document KR_20240027262_A1_décrit une méthode de décollage laser par irradiation d'une couche de graphène, d'oxyde de graphène ou d'oxyde de graphène réduit.

[0011] Le document CN_117238747_A décrit une méthode de décollage laser employant une couche de décollement formée d'oxyde de graphène obtenu par dépôt liquide.

Exposé de l'invention

[0012] Un objet de l'invention est l'emploi d'une couche d'oxyde de graphène en tant que couche absorbante optiquement dans un procédé de séparation de couche par irradiation laser LLO, résolvant les problèmes mentionnés ci-dessus. Plus spécifiquement, l'invention concerne une structure apte à subir une séparation par irradiation laser ainsi qu'un procédé de fabrication de cette structure.

[0013] Un autre objet de l'invention est un procédé de fabrication d'une structure avancée basé sur la structure obtenue par le procédé du premier objet de l'invention.

[0014] En vue de la réalisation de ces objets, un premier aspect de l'invention est une structure de départ conçue pour subir une séparation par irradiation laser, comprenant un substrat, une couche transférée, et une couche d'oxyde de graphène interposée entre le substrat et la couche transférée. La couche transférée peut être constituée de carbure de silicium SiC monocristallin ou de saphir.

[0015] La structure selon l'invention permet de fournir une structure prête à être intégrée à un procédé de fabrication d'un dispositif semiconducteur nécessitant le transfert d'une couche d'un premier support à un second support. On peut ainsi parler d'une structure ou d'un substrat de départ d'un procédé intégré de fabrication d'un dispositif semiconducteur substrat dit « Epi-Ready » en terminologie anglaise, pour la raison que cette structure ou ce substrat est prêt à servir de support à la croissance d'une couche par épitaxie. Plus généralement, cette couche est apte à être soumise à toute étape de fabrication conventionnellement employée dans le domaine de l'industrie des semiconducteurs, telle qu'une étape de photolithographie, de traitement thermique ou plasma, ou encore de dépôt de couches de matériaux électriquement conducteurs, isolant ou semiconducteurs.

[0016] Un avantage de la structure selon l'invention est de fournir une alternative aux solutions existantes, qui peuvent entraîner une contamination gênante des dispositifs à fabriquer à partir de cette structure.

[0017] Un autre avantage est le taux d'absorption optique d'un rayonnement infra-rouge par la couche d'oxyde de graphène. Lors de l'opération de séparation par irradiation laser, l'énergie du rayonnement incident sera essentiellement absorbée par la couche de graphène si le rayonnement a une longueur d'onde adaptée, limitant la dégradation thermique du reste de la structure, et en particulier de la couche que l'on transfère sur le second support.

[0018] Un avantage supplémentaire tient à la résistance de la couche d'oxyde de graphène aux hautes températures, typiques, par exemple, des procédés de dépôt de couche par épitaxie qui se font d'ordinaire entre 800 et 1500°C. Pour cette raison supplémentaire, la structure selon l'invention est compatible avec un grand nombre de procédés susceptibles de lui être appliqués dans le domaine des semiconducteurs.

[0019] Selon des caractéristiques additionnelles non-limitative du premier aspect de l'invention, considérées individuellement ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

- le substrat peut être transparent à un rayonnement infrarouge ;
- le substrat peut être transparent à un rayonnement de longueur d'onde comprise entre 9 et 11 µm ;
- le substrat peut être constitué de silicium Si ou de carbure de silicium SiC ; et

– la couche transférée peut être constituée de carbure de silicium SiC monocristallin ou de saphir.

[0020] Un deuxième aspect de l'invention est un procédé de fabrication d'une structure de départ conçue pour subir une séparation par irradiation laser, comprenant un substrat, une couche transférée, et une couche d'oxyde de graphène interposée entre le substrat et la couche transférée, le procédé comprenant : une étape de fourniture de deux substrats ; une étape de formation d'au moins une couche de graphène multicouche sur au moins l'un des deux substrats ; une étape d'oxygénation de l'au moins une couche de graphène multicouche de manière à former au moins une couche d'oxyde de graphène ; une étape d'assemblage des deux substrats par l'intermédiaire de l'au moins une couche d'oxyde de graphène ; et une étape de détachement d'une partie de l'un des deux substrats de manière à laisser la couche transférée sur l'autre des deux substrats.

[0021] Selon des caractéristiques additionnelles non-limitative de du deuxième aspect de l'invention, considérées individuellement ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

[0022] - l'étape d'assemblage peut être effectuée par mise en contact direct ;

[0023] - une couche de graphène multicouche peut être formée sur chacun des deux substrats ; et

[0024] - le procédé peut en outre comprendre une étape d'implantation ionique dans le premier substrat, de manière à former un plan de fragilisation dans ce premier substrat et définir ainsi la couche transférée ; et

[0025] - la couche transférée peut être constituée de carbure de silicium SiC monocristallin ou de saphir.

[0026] Un troisième aspect de l'invention est un procédé de fabrication d'une structure avancée comprenant une couche formée par épitaxie sur la couche transférée d'une structure de départ conçue pour subir une séparation par irradiation laser, comprenant un substrat, une couche transférée, et une couche d'oxyde de graphène interposée entre le substrat et la couche transférée, le procédé comprenant les étapes de : fournir la structure de départ selon le premier aspect de l'invention ; former par épitaxie la couche formée par épitaxie sur la couche transférée de la structure fournie ; assembler un troisième substrat à la structure par mise en contact direct de ce troisième substrat avec la couche épitaxiée ; et irradier la couche d'oxyde de graphène par une irradiation infra-rouge, de manière à séparer la couche transférée, la couche épitaxiée et le troisième substrat du substrat de la structure de départ.

[0027] Selon des caractéristiques additionnelles non-limitative de du troisième aspect de l'invention, considérées individuellement ou selon toute combinaison techniquement réalisable :

[0028] - l'irradiation emploie une onde électromagnétique de longueur d'onde comprise entre 9 et 11 µm ;

[0029] - le procédé peut en outre comprendre une étape de dégagement de la couche suivant l'étape de séparation ; et

[0030] - la couche épitaxiée est une couche de nitrure de gallium GaN ; et

[0031] - la couche transférée peut être constituée de carbure de silicium SiC monocristallin ou de saphir.

[0032] Un avantage des procédés est leur simplicité et leur excellent bénéfice technique par rapport à leur coût.

[0033] Un autre avantage des procédés selon l'invention découle de la simplicité de l'emploi d'une irradiation laser dans le domaine de l'infrarouge couplé à l'emploi de matériaux compatibles avec les procédés de fabrication de dispositifs semiconducteurs.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0034] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée de l'invention qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquels :

[0035] [Fig.1] La [Fig.1] illustre les étapes d'un procédé de fabrication d'une structure de départ selon l'invention ;

[0036] [Fig.2] La [Fig.2] est un diagramme résumant les étapes du procédé de fabrication de la [Fig.1] ;

[0037] [Fig.3] La [Fig.3] illustre une variante du procédé des figures 1 et 2 ;

[0038] [Fig.4] La [Fig.4] illustre un procédé de fabrication d'une structure avancée sur la base de la structure de départ de la [Fig.1] ;

[0039] [Fig.5] La [Fig.5] est un diagramme résumant les étapes du procédé de fabrication de la [Fig.4] ; et

[0040] [Fig.6] La [Fig.6] illustre l'une des étapes du procédé des figures 4 et 5.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0041] Mode de réalisation de l'invention – Structure Struct_0

[0042] Un mode de réalisation de l'invention est détaillé ci-dessous et illustré par les figures 1 à 3.

[0043] La [Fig.1] illustre les étapes d'un procédé 100 de fabrication d'une première structure Struct_0 selon l'invention. Un but de ce procédé de fabrication est l'obtention d'une structure apte à servir de base à l'élaboration d'un dispositif dans le domaine de l'industrie des semiconducteurs. Spécifiquement, la structure Struct_0 comprend une couche TrLay supportée par un substrat Sub2 par l'intermédiaire d'une couche d'oxyde de graphène GO, cette dernière pouvant être dégradée et/ou réduite par irradiation laser infrarouge de manière à détacher la couche TrLay du substrat Sub2. L'intérêt de cette opération sera expliqué par l'exemple au moyen des figures 4 à 6.

[0044] Le procédé 100 débute par la fourniture de deux substrats Sub1 et Sub2 à deux étapes de fourniture 110 et 120, respectivement. Dans cet exemple de mise en œuvre de l'invention, les substrats Sub1 et Sub2 sont constituées de substrats plans de carbure de silicium, tels que des wafers de carbure de silicium SiC.

[0045] A des étapes 130 et 140, des couches de graphène multicouche MG1 et MG2, faites d'atomes de carbone C, sont formées en surface des substrats Sub1 et Sub2 de SiC par un traitement thermique conventionnel, sublimant préférentiellement les atomes de silicium Si des surfaces du SiC. Le nombre de couches de graphène peut être compris entre 5 et 20, ce qui correspond à des épaisseurs comprises entre 1,5 et 14 nm. On peut se reporter par exemple à l'article de Piort Ciochon etal., « Reversible graphitization of SiC: A route towards high-quality graphene on a minimally step bunched substrate », in Applied Surface Science 528 (2020) 146917. Pour favoriser l'obtention des couches de graphène MG1 et MG2 par cette étape, les substrats de SiC sont préférablement formés de SiC monocristallin.

[0046] Alternativement, les couches de graphène peuvent être obtenues par CVD, Chemical Vapor Deposition en terminologie anglaise. Dans ce cas, les substrats de SiC peuvent être polycristallins aussi bien que monocristallins.

[0047] A une étape 150 d'implantation d'au moins une espèce légère, le substrat Sub1 est préparé à une étape de séparation de la couche TrLay issue d'une partie de l'épaisseur du substrat Sub1, par exemple selon la technologie Smart Cut™.

[0048] A cette fin, le substrat Sub1 doit être préparé par introduction d'au moins une espèce légère telles que de l'hydrogène ou de l'hélium dans ce substrat. Cette introduction peut correspondre à une implantation d'hydrogène, c'est-à-dire, un bombardement ionique d'hydrogène, ici à travers la couche de graphène MG1. De façon connue en soi, et comme cela est illustré par la [Fig.1], les ions hydrogène H^+ sont implantés de manière à former un plan de fragilisation Frgl délimitant la couche TrLay à transférer. La couche TrLay est située du côté de la couche de graphène MG1 par rapport à ce plan de fragilisation Frgl.

[0049] La nature, la dose des espèces implantées et l'énergie d'implantation sont choisies en fonction de l'épaisseur de la couche que l'on souhaite transférer et des propriétés physico-chimiques du substrat Sub1. Dans le cas d'un substrat Sub1 en SiC, on pourra choisir d'implanter une dose d'hydrogène comprise entre 10^{16} et 5.10^{17} at/cm² avec une énergie comprise entre 30 et 300 keV pour délimiter une couche TrLay de l'ordre de 200 à 2000 nm d'épaisseur.

[0050] A des étapes 160 et 170 d'oxygénation, les couches de graphène MG1 et MG2 sont oxygénées pour former des couches d'oxyde de graphène OG1 et OG2, respectivement. Ces opérations peuvent être réalisées par exemple selon la méthode

de Hummers ou l'une de ses dérivées, qui impliquent le traitement des couches de graphène au moyen de $KMnO_4$ et NaO_3 dans de l'acide sulfurique H_2SO_4 concentré. On peut se référer à l'article de Daniela C. Marcanao et al., « Improved synthesis of graphene oxide », dans *ACS Nano* 2010, 4, 8, 4806–4814.

[0051] Il y a deux raisons pour procéder à ces étapes d'oxygénation.

[0052] La première raison est que l'oxygénation de la couche de graphène lui ajoute des groupes fonctionnels (carbonyl, hydroxyl, epoxy) qui lui confèrent une plus grande hydrophilicité, ce qui facilite le collage de ces deux couches l'une à l'autre à l'étape 200 suivante.

[0053] La seconde raison est que les liaisons chimiques C-O entre les atomes de carbone et les atomes d'oxygène absorbent fortement les rayonnements infra-rouges d'environ 1087 cm^{-1} de longueur d'onde. Cette caractéristique sera mise à profit dans l'étape 340 du procédé 300 illustré par les figures 4 à 6.

[0054] A une étape d'assemblage 200, les deux substrats Sub1 et Sub2 sont assemblés l'un à l'autre par mise en contact direct de la couche d'oxyde de graphène GO1 avec la couche d'oxyde de graphène GO2. Ces deux couches adhèrent l'une à l'autre par collage moléculaire. De cette manière est formé un empilement Stck comprenant, dans cet ordre, le substrat Sub2, la couche GO2, la couche GO1, et le substrat Sub1. Le substrat Sub1 comprend le plan de fragilisation Frgl. On peut considérer que les couches GO1 et GO2 forment collectivement une couche d'oxyde de graphène GO.

[0055] A une étape de détachement 210 suivant l'étape 200, le substrat Sub1 est clivé en deux parties au niveau du plan de fragilisation Frgl, dans cet exemple selon le procédé Smart Cut™.

[0056] Ainsi, dans le présent mode de réalisation, une partie du substrat Sub1 est détachée du reste de son volume pour former une couche d'intérêt, ici la couche TrLay. Comme expliqué plus haut, cette couche a été définie par le volume du substrat Sub1 situé entre plan de fragilisation Frgl et la couche de graphène MG1, maintenant couche d'oxyde de graphène GO1. Après l'étape d'assemblage entre les substrats Sub1 et Sub2, cette couche TrLay est détachée du reste du substrat Sub1 par fracture au niveau du plan de fragilisation Frgl et est ainsi reportée sur le support Sub2. L'ensemble obtenu est désigné par Structuct_0, une structure comprenant, dans cet ordre, le substrat Sub2, la couche GO2, la couche GO1, et la couche TrLay, qui a été transférée du substrat Sub1 au substrat Sub2.

[0057] Cette étape de détachement peut ainsi comprendre l'application à l'empilement Stck d'un traitement thermique dans une gamme de température de l'ordre de 80°C à 500°C pour permettre le détachement de la couche TrLay et ainsi compléter le transfert de celle-ci sur le substrat Sub2. En remplacement ou en complément du traitement

thermique, cette étape peut comprendre l'application d'une lame ou un jet de fluide gazeux ou liquide, ou de tout autre effort de nature mécanique au niveau du plan de fragilisation Frgl.

[0058] A une étape optionnelle 220 suivant l'étape de détachement 210 qui a mené à l'obtention de l'empilement Stck, on peut appliquer un traitement thermique de stabilisation à l'empilement Stck. Le traitement thermique de stabilisation permet de guérir des défauts cristallins présents dans la couche TrLay. Ce traitement thermique peut être prévu pour amener l'empilement à une température comprise entre 300°C et 600° pendant une durée comprise entre 30 minutes et 10 heures. Ce traitement thermique est préférentiellement réalisé en exposant la face libre de la couche diélectrique à une atmosphère gazeuse neutre.

[0059] A la suite du détachement de la couche TrLay du reste de substrat Sub1, sa surface libre est irrégulière. Afin de la mettre en état de servir de support à, par exemple, une étape de croissance d'une couche par épitaxie, un report sur un troisième substrat, ou tout autre opération telles que celles conventionnellement employées dans l'industrie du semiconducteur, il est nécessaire de préparer cette surface et en particulier de réduire sa rugosité, idéalement de manière à la rendre atomiquement plane.

[0060] Ainsi, à une étape 230 de préparation de surface, pouvant précéder ou suivre l'étape 220, un traitement de planarisation et de polissage est appliqué à la couche TrLay. Il peut s'agir d'un traitement de polissage mécanochimique, souvent désigné par l'acronyme CMP pour Chemical Mechanical Polishing en terminologie anglaise.

[0061] A la suite de l'étape 230 de traitement de surface et, le cas échéant, de l'étape 220 de stabilisation, la structure Struct_0 peut être considérée comme apte à servir, par exemple, de support à la formation d'une couche par épitaxie.

[0062] La [Fig.3] illustre une variante du procédé 100. Dans cette variante, une seule couche de graphène est formée puis oxydée. Il est préférable de conserver la couche de graphène qui ne sera pas traversée par des ions lors de la formation du plan de fragilisation Frgl. Plus spécifiquement, le procédé 100 reste le même, à la différence près que la multicouche de graphène MG1 n'est pas formée, et n'est donc pas oxydée. Ainsi, lors de l'étape 200 d'assemblage, la couche d'oxyde de graphène GO2 est mise en contact directement avec le substrat Sub1. Cette couche est donc formée directement sur le volume de matériau du substrat Sub1 destiné à former la couche TrLay. Dans l'empilement Stck, la couche TrLay est définie par le volume du substrat Sub1 situé entre le plan de fragilisation Frgl et la couche de graphène GO2. La couche de graphène GO est ici formée uniquement de la couche de graphène GO2.

[0063] Une variante non illustrée d'obtention d'une couche de graphène oxydé ou oxygéné est de procéder par voie humide : selon des méthodes connues, une poudre de graphite peut être mise en suspension dans une solution liquide contenant de l'oxygène

(typiquement, les solution employées dans la méthode de Hummers) de manière à obtenir du graphène oxydé en suspension, par exemple via sonication. Cette suspension peut alors être directement étalée sur un substrat pour obtenir une couche de graphène oxydé ou oxygéné.

[0064] Les épaisseurs des couches de graphène GO2 et, le cas échéant, GO1, peuvent être adaptées pour définir l'épaisseur de la couche GO en vue d'absorber une part plus ou moins importante d'un rayonnement infrarouge incident lors d'une étape ultérieure de séparation laser. Ces épaisseurs seront déterminées, selon les critères de l'opérateur, dépendant de la nature des couches qui seront à séparer.

[0065] Mode de réalisation de l'invention – Structure Struct_1

[0066] Les figures 4 à 6 illustrent un exemple de procédé employant la structure Struct_0, avec la formation d'une couche épitaxiée Epi directement sur la couche TrLay, et le transfert de cette couche épitaxiée sur un support Sub3.

[0067] Cet exemple illustre l'obtention d'une structure avancée Struct_1 comprenant un support Sub3 supportant une couche épitaxiée de nitrure de gallium GaN.

[0068] Un procédé 300 selon l'invention débute avec une étape 310 de fourniture de la structure Struct_0 obtenue par exemple au moyen du procédé 100 illustré par les figures 1 à 3.

[0069] A une étape 320 d'épitaxie, une couche Epi de nitrure de gallium GaN est formée par épitaxié sur la couche TrLay de carbure de silicium, connue pour être un bon substrat pour une croissance de GaN d'excellente qualité cristalline, la couche de GaN ainsi formée pouvant être considéré comme monocristalline.

[0070] A une étape 330 d'assemblage, un substrat Sub3 est assemblé à la structure Struct_0 par l'intermédiaire de la couche Epi. Le substrat Sub3 et la couche Epi sont mis en contact intime et fixés l'un à l'autre par collage moléculaire, par exemple par collage direct hydrophile.

[0071] Le substrat Sub3 est choisi suffisamment plan et lisse pour être apte au collage direct avec la couche Epi. Il peut s'agir par exemple d'un wafer de silicium monocristallin ou tout autre matériau utilisé dans le domaine des semiconducteur, tel que saphir, poly-SiC, mono ou poly AlN ou verre. Le substrat Sub3 est également choisi pour sa compatibilité avec les étapes de fabrications prévues pour être appliquées ultérieurement à la couche Epi, telles que des étapes de photolithographie, traitements plasma, dépôt de couches électriquement isolantes ou conductrices, implantations ioniques, traitements thermiques ou autres étapes de fabrications employées dans l'industrie des semiconducteurs.

[0072] A une étape 340 d'irradiation, un faisceau laser de longueur d'onde comprise dans l'infrarouge, de préférence entre 9 et 11 µm, irradie la couche GO à travers le substrat Sub2. La densité de puissance, la vitesse de balayage du faisceau et autres paramètres

seront adaptés par l'opérateur à la transparence et l'épaisseur du matériau à travers lequel la couche GO est irradiée, ainsi que de l'épaisseur de la couche GO. Sous l'effet de cette irradiation Irr, la couche GO peut être dégradée par décomposition comme illustré par la [Fig.4] et indiqué par « X » sur la [Fig.5]. Alternativement et éventuellement conjointement, l'irradiation Irr peut induire la réduction chimique de couche GO d'oxide de graphène pour former de l'oxide de graphène réduit rGO, de volume bien plus important que l'oxyde de graphène. On peut se référer à l'article de Tung Xuan Tran et al., « Laser-Induced Reduction of Graphene Oxide by Intensity-Modulated Line Beam for Supercapacitor Applications », ACS Appl Mater Interfaces, 2018 Nov 21;10(46):39777-39784. Cette augmentation de volume peut aider à éloigner l'une de l'autres deux couches encadrant la couche GO.

[0073] L'irradiation de l'étape 340 permet ainsi une séparation de la couche TrLay du substrat Sub2 à une étape 350. Ainsi est formée une structure comprenant, dans cet ordre, le substrat Sub3, la couche épitaxiée Epi, la couche transférée TrLay et des restes de la couche GO formée d'oxyde de graphène et/ou d'oxyde de graphène réduit rGO. Les étapes 340 et 350 peuvent également être considérées comme une étape unique d'irradiation et de séparation.

[0074] A une étape 360, les restes de la couche GO ainsi que la couche TrLay sont éliminés de manière à dégager la couche Epi. Ce nettoyage peut être effectué par polissage mécanochimique ou CMP en terminologie anglaise. Ainsi est formée une structure qui comprend, dans cet ordre, le substrat Sub3 et la couche Epi de GaN.

[0075] A un moment quelconque suivant l'étape d'assemblage du substrat Sub3 à la structure Struct_0, on peut appliquer une étape 370 de traitement thermique de stabilisation à l'ensemble formé. Le traitement thermique de stabilisation permet de guérir des défauts cristallins présents dans la couche Epi et contribue à consolider la fixation entre la couche Epi et le substrat Sub3. Ce traitement thermique peut être prévu pour amener l'empilement à une température comprise entre 300°C et 600° pendant une durée comprise entre 30 minutes et 10 heures. Ce traitement thermique est préférentiellement réalisé en exposant la face libre de la couche diélectrique à une atmosphère gazeuse neutre. Effectué après l'étape 360 d'élimination de la couche TrLay, ce traitement peut avantageusement réparer les dégâts causés à la couche Epi par cette étape 350A l'issu des étapes ci-dessus, la structure Struct_1 est obtenue.

[0076] Il existe d'autres méthodes pour obtenir des couches minces de nitrure de gallium et les transférer sur un substrat receveur, en particulier celles employant la technologie Smart Cut™. Cette technologie repose sur la formation d'un plan de fragilisation dans un substrat donneur épais, par exemple un wafer monocristallin obtenu à partir d'une boule massive monocristalline du matériau visé. La profondeur de ce plan de fragilisation définit l'épaisseur d'une couche de matériau qui pourra être détachée du

wafer. Ce plan de fragilisation est obtenu par implantation ioniques d'espèces légères dans le wafer, à travers l'une de ses surfaces. Cependant, la profondeur à laquelle se trouve ce plan d'implantation est limitée par la tension d'accélération maximale des équipements d'implantation ionique disponibles sur le marché. Ainsi, une couche pouvant être détachée du substrat donneur voit son épaisseur limitée par la profondeur d'implantation maximale des ions formant le plan de fragilisation.

[0077] En revanche, la procédé 300 décrit ci-dessus, appliqué ici au nitrure de gallium, permet avantageusement de contourner cette limitation d'épaisseur tout en permettant un transfert aisé de la couche obtenue. En effet, la couche Epi peut être épitaxiée selon des épaisseurs arbitraires (tout en restant soumise à l'épaisseur critique d'épitaxie), indépendantes de l'équipement d'implantation ionique disponible. Ensuite, un substrat porteur est assemblé à la couche épitaxiée.

[0078] Variantes

[0079] L'exemple présenté ci-dessus concerne la formation d'une couche Struct_0 employant des substrats Sub1 et Sub2 de carbure de silicium SiC. D'autres substrats peuvent être employés, tant qu'un moins l'un d'entre eux est compatible avec la formation d'une couche de graphène et son traitement d'oxygénation. On peut citer par exemple des substrats , mais tout autre substrat vérifiant la condition de compatibilité énoncée ci-dessus pourrait être employé, tel que ceux mis en œuvre dans l'industrie des semiconducteurs.

[0080] En ce qui concerne la formation de la structure Struct_1, une condition s'ajoutant à celle énoncée au paragraphe précédent est que le substrat Sub2, porteur de la couche TrLay par l'intermédiaire de la couche GO, soit sensiblement transparent à la longueur d'onde utilisée lors de l'étape d'irradiation de la couche GO. On peut citer à nouveau des substrats de carbure de silicium et de silicium pour Sub2. On parle de « sensiblement transparent » quand au moins 0% de la longueur d'onde considérée sont transmis à travers ce substrat.

[0081] Alternativement, et bien que ce ne soit a priori pas le prcédé préférentiel, il serait possible d'irradier la couche GO à travers le substrat Sub3 et la couche TrLay. En ce cas, c'est le substrat Sub3 qui doit être sensiblement transparent à la longueur d'onde utilisée lors de l'étape d'irradiation de la couche GO. En ce cas, on peut citer à nouveau des substrats de carbure de silicium et de silicium pour Sub3.

[0082] Dans ce document, les figures ne sont pas nécessairement à l'échelle. Certaines caractéristiques et certains composants peuvent être représentés exagérés par rapport à d'autres composants ou sous une forme quelque peu schématique, et certains détails d'éléments conventionnels peuvent ne pas être représentés dans l'intérêt de la clarté et de la concision.

[0083] Bien entendu l'invention n'est pas limitée aux modes de mise en œuvre décrits et on peut y apporter des variantes de réalisation sans sortir du cadre de l'invention tel que défini par les revendications.

Revendications

[Revendication 1] Structure de départ (Struct_0) conçue pour subir une séparation par irradiation laser, comprenant un substrat (Sub2), une couche transférée (TrLay), et une couche d'oxyde de graphène (GO, GO2) interposée entre le substrat (Sub2) et la couche transférée (TrLay), dans laquelle la couche transférée est constituée de carbure de silicium SiC monocristallin ou de saphir.

[Revendication 2] La structure selon la revendication 1, dans laquelle le substrat (Sub2) est transparent à un rayonnement infrarouge.

[Revendication 3] La structure selon la revendication 1, dans laquelle le substrat (Sub2) est transparent à un rayonnement de longueur d'onde comprise entre 9 et 11 μm.

[Revendication 4] La structure selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans laquelle le substrat est constitué de silicium Si ou de carbure de silicium SiC.

[Revendication 5] Procédé (100) de fabrication d'une structure de départ (Struct_0) conçue pour subir une séparation par irradiation laser, comprenant un substrat (Sub2), une couche transférée (TrLay), et une couche d'oxyde de graphène (GO, GO2) interposée entre le substrat (Sub2) et la couche transférée (TrLay), le procédé comprenant :
- une étape (110, 120) de fourniture de deux substrats (Sub1, Sub2) ;
- une étape (130, 140) de formation d'au moins une couche (MG1, MG2) de graphène multicouche sur au moins l'un des deux substrats (Sub1, Sub2) ;
- une étape (160, 170) d'oxygénation de l'au moins une couche de graphène multicouche de manière à former au moins une couche d'oxyde de graphène (GO1, GO2) ;
- une étape (200) d'assemblage des deux substrats (Sub1, Sub2) par l'intermédiaire de l'au moins une couche (GO1, GO2, GO) d'oxyde de graphène ; et
- une étape de détachement (210) d'une partie de l'un (Sub1) des deux substrats de manière à laisser la couche transférée (TrLay) sur l'autre des deux substrats (Sub2).

[Revendication 6] Le procédé de fabrication selon la revendication 5, dans lequel l'étape (200) d'assemblage est effectuée par mise en contact direct.

[Revendication 7] Le procédé de fabrication selon la revendication 5 ou 6, dans lequel une couche (MG1, MG2) de graphène multicouche est formée sur chacun des deux substrats (Sub1, Sub2).

[Revendication 8] Le procédé selon l'une quelconques de revendications 5 à 7, comprenant en outre une étape (150) d'implantation ionique dans le premier substrat (Sub1), de manière à former un plan de fragilisation (Frgl) dans ce premier substrat (Sub1) et définir ainsi la couche transférée (TrLay).

[Revendication 9] Le procédé selon l'une quelconques de revendications 5 à 8, dans lequel la couche transférée (TrLay) est constituée de carbure de silicium SiC monocristallin ou de saphir.

[Revendication 10] Procédé (300) de fabrication d'une structure avancée (Struct_1) comprenant une couche (Epi) formée par épitaxie sur une couche transférée (TrLay) d'une structure de départ (Struct_0) conçue pour subir une séparation par irradiation laser, comprenant un substrat (Sub2), la couche transférée (TrLay), et une couche d'oxyde de graphène (GO, GO2) interposée entre le substrat (Sub2) et la couche transférée (TrLay), le procédé comprenant les étapes de :
- fournir (310) la structure de départ (Struct_0) ;
- former (320) par épitaxie la couche (Epi) sur la couche transférée (TrLay) de la structure (Struct_0) fournie ;
- assembler (330) un troisième substrat (Sub3) à la structure (Struct_0) par mise en contact direct de ce troisième substrat (Sub3) avec la couche (Epi) épitaxiée ; et
- irradier (340) la couche (GO) d'oxyde de graphène par une irradiation (Irr) infra-rouge, de manière à séparer (350) la couche transférée (TrLay), la couche (Epi) épitaxiée et le troisième substrat (Sub3) du substrat (Sub2) de la structure de départ (Struct_0).

[Revendication 11] Le procédé selon la revendication 10, dans lequel l'irradiation (Irr) emploie une onde électromagnétique de longueur d'onde comprise entre 9 et 11 µm.

[Revendication 12] Le procédé selon la revendication 10 ou 11, comprenant en outre une étape (360) de dégagement de la couche (Epi) suivant l'étape (350) de séparation.

[Revendication 13] Le procédé selon l'une quelconque des revendications 10 à 12, dans lequel la couche épitaxiée est une couche de nitrure de gallium GaN.

[Revendication 14] Le procédé selon l'une quelconques de revendications 10 à 13, dans lequel la couche transférée (TrLay) est constituée de carbure de silicium SiC monocristallin ou de saphir.