

## **PROCEDE DE SEPARATION D'UNE STRUCTURE COMPOSITE DEMONTABLE AU MOYEN D'UN FLUX LUMINEUX**

### **DOMAINE DE L'INVENTION**

- 5 La présente invention concerne une structure composite démontable par application d'un flux lumineux, et un procédé de séparation d'une telle structure.

### **ARRIERE PLAN DE L'INVENTION**

- 10 Il est connu, dans le domaine de la microélectronique, de l'optique et de l'opto-électronique, de fabriquer une structure composite démontable comprenant une couche utile et un substrat, ladite structure étant destinée à être ultérieurement traitée afin de séparer la couche utile du substrat.

- Tel est le cas par exemple lorsque le substrat est un substrat de croissance pour la formation par épitaxie de la couche utile, et que l'on souhaite ensuite séparer la couche  
15 utile du substrat pour l'utiliser seule ou la transférer sur un support final.

A cet effet, on dispose au sein de la structure, entre la couche utile et le substrat, une couche sacrificielle qui est destinée à être au moins en partie décomposée lors du traitement de séparation.

- Une technique particulière de séparation est connue sous le terme de « Laser Lift-  
20 Off » (LLO), dans laquelle un flux lumineux est utilisé pour décomposer la couche sacrificielle. Cette technique met à profit des différences de propriétés d'absorption optique et de tenue en température des matériaux constituant la structure. Ainsi, le substrat est sensiblement transparent audit flux lumineux, tandis que la couche sacrificielle absorbe fortement ledit flux. Par conséquent, lorsque l'on irradie la structure  
25 composite en appliquant le flux lumineux au travers du substrat, la couche sacrificielle s'échauffe fortement puis se dissocie lorsque la température dépasse une température donnée, dite température de dissociation. On obtient donc d'une part la couche utile et d'autre part le substrat qui peut être réutilisé, par exemple pour former une nouvelle structure composite.

- 30 Un inconvénient de ce procédé est qu'en raison de la proximité entre la couche à séparer et la couche sacrificielle, la couche à séparer peut être également portée à une température élevée par conduction thermique à partir de la couche sacrificielle. Un tel échauffement de la couche à séparer peut se traduire par une dégradation de certaines de ses propriétés, notamment dans le cas où le substrat et la couche à séparer  
35 présentent des coefficients de dilatation thermique sensiblement différents.

Le document WO 2015/019018 décrit une structure composite démontable dans laquelle une couche de barrière thermique est intercalée entre la couche sacrificielle et la couche à séparer. Ladite couche de barrière thermique est sensiblement transparente au

flux lumineux de manière à ne pas s'échauffer et présente une épaisseur suffisante pour maintenir la couche à séparer à une température inférieure à un seuil déterminé pendant la durée de l'exposition au flux lumineux.

Cependant, pour certains matériaux de la couche à séparer et/ou du support final le cas échéant, une telle couche de barrière thermique peut ne pas être suffisante.

Ainsi, par exemple, dans le cas où la couche à séparer comprend un empilement de matériaux ferromagnétiques tels que CoFeB/MgO, il se produit une inter-diffusion des atomes à partir d'une température de l'ordre de 400 à 600°C. Dans le cas où la couche à séparer est en graphène, une dégradation des propriétés électriques se produit à partir d'une température de 600°C. Dans le cas d'une couche à séparer en molybdénite (MoS<sub>2</sub>), une modification de l'hybridation et une réaction avec d'autres matériaux peut se produire à partir d'une température de l'ordre de 450 à 600°C. Dans le cas où la couche à séparer est en un alliage à changement de phase, tel que GeSbTe, il se produit une fusion et un passage en phase amorphe à partir de 600°C environ.

De même, selon la composition du support final sur lequel la couche à séparer doit être transférée, ledit support peut être affecté par le budget thermique appliqué pour dissocier la couche sacrificielle. Ainsi, par exemple, si le support final comprend des circuits électroniques contenant du cuivre, une extrusion des lignes de cuivre peut se produire à partir de 400°C. Dans le cas où le support final est en un matériau polymère (par exemple une matière plastique), il peut se décomposer dès 200°C.

Dans de tels cas, pour effectuer la séparation à basse température, une technique possible est un retrait du substrat par gravure par la face arrière de la couche à séparer, de sorte que ledit substrat ne peut être recyclé pour une autre utilisation.

Un autre procédé envisageable basé sur la technique LLO, lorsque le support final est sensible à la température, est de transférer la couche à séparer sur un substrat temporaire non susceptible d'être affecté par le budget thermique de dissociation de la couche sacrificielle, puis de transférer la couche à séparer sur le support final. Cependant, ce procédé est plus long et plus onéreux que le procédé LLO puisqu'il nécessite un double transfert de la couche d'intérêt.

30

## BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

Un but de l'invention est de remédier aux inconvénients précités et notamment de concevoir une structure composite démontable comprenant une couche sacrificielle capable de se dissocier par application d'un budget thermique limité (correspondant typiquement à une température inférieure à 500°C) généré par l'absorption d'un flux lumineux.

A cet effet, l'invention propose une structure composite démontable au moyen d'un flux lumineux, comprenant successivement :

- un substrat,
  - une couche optiquement absorbante en un matériau adapté pour absorber au moins partiellement un flux lumineux, le substrat étant sensiblement transparent audit flux lumineux,
- 5        - une couche sacrificielle adaptée pour se dissocier sous l'application d'une température supérieure à une température de dissociation, en un matériau différent de celui de la couche optiquement absorbante,
- au moins une couche à séparer.

Par « composite » on entend le fait que la structure est formée d'un empilement de  
10 différents matériaux, présentant notamment des propriétés différentes en termes d'absorption optique et de tenue en température.

Par « démontable » on entend le fait que la structure composite est apte à se  
séparer selon un plan parallèle à ses surfaces principales, en deux parties qui conservent  
chacune leur intégrité, à l'exception d'une couche sacrificielle située à l'interface entre les  
15 deux parties et qui se dissocie pour permettre ladite séparation.

Par « matériau sensiblement transparent », on entend un matériau qui laisse passer  
au moins 90% du flux lumineux qu'il reçoit. En d'autres termes, le produit de l'épaisseur  
dudit matériau et du coefficient d'absorption du flux lumineux par ledit matériau est  
inférieur à 0,1.

20 Par « matériau optiquement absorbant » on entend un matériau qui absorbe au moins 90% du faisceau lumineux qu'il reçoit. En d'autres termes, le produit de l'épaisseur  
dudit matériau et du coefficient d'absorption du flux lumineux par ledit matériau est  
supérieur à 2,3. Le coefficient d'absorption optique, à la longueur d'onde du flux lumineux,  
est de préférence supérieur à  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ .

25 Les termes « sur » et « entre » se rapportant à la position relative de deux couches  
n'impliquent pas nécessairement de contact direct entre lesdites couches, à moins qu'un  
tel contact ne soit spécifié.

En procurant une couche sacrificielle distincte de la couche optiquement  
absorbante, par rapport au procédé connu dans lequel la couche sacrificielle est  
30 confondue avec la couche optiquement absorbante, la structure composite selon  
l'invention présente plusieurs avantages. En effet, l'épaisseur de la couche sacrificielle  
peut être minimisée. De ce fait, la quantité de chaleur présente après dissociation de  
ladite couche du côté de la couche à séparer sera diminuée. En outre, la couche  
sacrificielle contribue elle-même à éloigner la couche optiquement absorbante de la  
35 couche à séparer. Il en résulte que la structure composite peut être séparée au moyen  
d'un budget thermique réduit, ce qui autorise l'utilisation d'une couche à séparer et/ou  
d'un support final sensibles à la température tels que mentionnés plus haut.

Selon d'autres caractéristiques avantageuses mais optionnelles de ladite structure, considérées seules ou en combinaison lorsque cela est approprié :

- la couche sacrificielle est en contact avec la couche optiquement absorbante ;
- la couche sacrificielle est en un matériau sensiblement transparent audit flux lumineux ;
- 5 la structure comprend en outre une première couche de barrière thermique sensiblement transparente audit flux lumineux, entre le substrat et la couche optiquement absorbante ;
- la structure comprend en outre une deuxième couche de barrière thermique entre la couche sacrificielle et la couche à séparer ;
- la première et/ou la deuxième couche de barrière thermique présente un coefficient de conductivité thermique linéaire inférieur à  $10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ;
- la première et/ou la deuxième couche de barrière thermique comprend au moins un des matériaux suivants : silice ( $\text{SiO}_2$ ), alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ;
- 15 la structure comprend en outre un premier film adapté pour réfléchir ou absorber le flux lumineux, entre la couche sacrificielle et la couche à séparer ;
- ledit premier film comprend au moins un des matériaux suivants : silicium, silice ( $\text{SiO}_2$ ), carbure de silicium ( $\text{SiC}$ ), molybdène, nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ;
- la structure comprend en outre, entre la couche sacrificielle et la couche à séparer, un second film adapté pour répartir la chaleur sur l'étendue de la surface de la structure ;
- 20 - ledit second film comprend au moins un des matériaux suivants : alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silice ( $\text{SiO}_2$ ), nitrure d'aluminium ( $\text{AlN}$ ) polycristallin, silicium polycristallin ;
- le substrat comprend au moins un des matériaux suivants : saphir, quartz ;
- la couche optiquement absorbante comprend au moins un des matériaux suivants : nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), silicium polycristallin, carbure de silicium ( $\text{SiC}$ ) polycristallin ;
- 25 la couche sacrificielle comprend au moins un des matériaux suivants : nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), nitrure d'aluminium ( $\text{AlN}$ ) polycristallin, nitrure de gallium ( $\text{GaN}$ ) polycristallin, oxyde d'indium-étain (ITO) ;
- la couche à séparer comprend au moins un des matériaux suivants : un métal, tel que du cuivre ; un matériau du groupe IV présentant une structure cristalline hexagonale, tel que du graphène ; un matériau piézoélectrique, ferromagnétique ou ferroélectrique ; un alliage à changement de phase, tel que  $\text{GeSbTe}$ .

Un autre objet de l'invention concerne un procédé de séparation d'une structure composite démontable telle que décrite plus haut.

- 35 Ledit procédé comprend :
  - l'application d'un flux lumineux au travers du substrat, ledit flux lumineux étant absorbé au moins en partie par la couche optiquement absorbante, de sorte à échauffer ladite couche optiquement absorbante,

- le chauffage de la couche sacrificielle par conduction thermique à partir de la couche optiquement absorbante, jusqu'à une température supérieure ou égale à la température de dissociation,
  - la dissociation de la couche sacrificielle sous l'effet dudit chauffage.
- 5 Selon d'autres caractéristiques avantageuses mais optionnelles dudit procédé, considérées seules ou en combinaison lorsque cela est approprié :
- le produit de l'épaisseur du substrat et du coefficient d'absorption du flux lumineux par le substrat est inférieur à 0,1 ;
  - le produit de l'épaisseur de la couche optiquement absorbante et du coefficient
- 10 d'absorption du flux lumineux par ladite couche est supérieur à 2,3 ;
- le flux lumineux est appliqué de manière impulsionnelle ;
  - la longueur d'onde du flux lumineux est comprise entre 100 et 12000 nm ;
  - avant l'application dudit flux lumineux, le procédé comprend une étape de collage
- 15 de la structure composite sur un support, la dissociation de la couche sacrificielle conduisant au transfert de la couche à séparer sur le support ;
- le support comprend au moins un des matériaux suivants : un matériau semi-conducteur, tel que du silicium ; un métal, tel que du cuivre ; un polymère.
- Un autre objet de l'invention concerne un procédé de fabrication d'une structure composite démontable telle que décrite ci-dessus. Ledit procédé comprend les étapes
- 20 suivantes :
- fourniture du substrat,
  - formation, sur le substrat, d'une couche optiquement absorbante en un matériau adapté pour absorber au moins partiellement un flux lumineux, le substrat étant sensiblement transparent audit flux lumineux,
- 25 - formation de la couche à séparer sur la couche optiquement absorbante,
- ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend la formation de la couche sacrificielle entre la couche optiquement absorbante et la couche à séparer, ladite couche sacrificielle étant en un matériau différent de celui de la couche optiquement absorbante.
- De manière avantageuse, la formation de la couche à séparer est mise en œuvre à
- 30 une température inférieure à la température de dissociation de la couche sacrificielle.
- La formation de la couche à séparer peut comprendre le dépôt ou le collage de ladite couche sur une couche germe. Ladite couche germe peut comprendre au moins un des matériaux suivants : platine, nickel, cuivre.

## 35 BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

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

- les figures 1A et 1B illustrent schématiquement une structure composite démontable selon deux modes de réalisation de l'invention,
- la figure 2 illustre schématiquement le collage de la structure de la figure 1A sur un support,
- 5       - la figure 3 illustre schématiquement l'application d'un flux lumineux à la structure composite démontable collée audit support,
- la figure 4 illustre schématiquement la séparation de la structure composite suite à la dissociation de la couche sacrificielle,
- la figure 5 illustre schématiquement la structure obtenue à l'issue de ladite  
10 séparation, comprenant la couche à séparer transférée sur le support,
- les figures 6A à 6C représentent des résultats de simulation thermique montrant respectivement l'échauffement au sein de la structure composite démontable au cours d'une impulsion du flux lumineux et l'homogénéisation de la température au sein de  
15 ladite structure composite après la dissociation de la couche sacrificielle, pour différentes durées après l'impulsion laser et la dissociation de la couche sacrificielle, et l'évolution de la température au niveau de la couche germe au cours du temps, pendant et après une impulsion du flux lumineux, pour un premier type de structure composite,
- les figures 7A et 7B illustrent respectivement la température maximale au niveau de la couche germe et la chaleur nécessaire à la séparation par unité de surface  
20 en fonction de la durée d'impulsion du flux lumineux, pour une structure connue (dans laquelle la couche optiquement absorbante et la couche sacrificielle sont confondues et forment donc une unique couche de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), et pour une structure selon l'invention (dans laquelle la couche optiquement absorbante est réalisée en SiC et la couche sacrificielle est en  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),
- 25       - la figure 7C présente la température maximale au niveau de la couche germe en fonction de la durée d'impulsion du flux lumineux, pour différentes compositions du premier type de structure composite,
- les figures 8A et 8B présentent respectivement la température maximale au niveau de l'interface entre la couche à transférer et le support, et la puissance à  
30 transmettre au travers du substrat pour dissocier la couche sacrificielle, en fonction de la durée d'impulsion, pour différentes compositions d'un deuxième type de structure composite,
- les figures 9A à 9C représentent des résultats de simulation thermique montrant respectivement l'échauffement au sein de la structure composite démontable au cours d'une impulsion du flux lumineux et l'homogénéisation de la température au sein de  
35 ladite structure composite après la dissociation de la couche sacrificielle, pour différentes durées d'impulsion, et l'évolution de la température au niveau de l'interface entre la

couche germe et la couche à séparer au cours du temps, pendant et après une impulsion du flux lumineux.

- Pour des raisons de lisibilité des figures, les éléments illustrés ne sont pas nécessairement représentés à l'échelle. Par ailleurs, les éléments désignés par les
- 5 mêmes signes de référence sur différentes figures sont identiques.

### DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION DE L'INVENTION

- L'invention se place dans le contexte de la séparation d'une structure composite par dissociation d'une couche de ladite structure sous l'effet d'un chauffage provoqué par
- 10 l'application d'un flux lumineux au travers d'au moins une partie de la structure.

- Par rapport à la structure décrite dans le document WO 2015/019018 précité, l'invention propose de découpler la portion de la structure qui est chauffée par absorption optique de la portion de la structure qui se dissocie sous l'effet dudit chauffage en formant, dans ladite structure, une couche optiquement absorbante distincte de la couche
- 15 sacrificielle. En particulier, contrairement à la couche optiquement absorbante, la couche sacrificielle est en un matériau sensiblement transparent au flux lumineux et apte à se dissocier sous l'application d'une température supérieure à une température de dissociation, ladite température étant atteinte par le chauffage de la couche optiquement absorbante par absorption du flux lumineux.

- 20 D'une manière générale, comme illustré sur la figure 1A, la structure composite 100 comprend successivement au moins un substrat 1 sensiblement transparent au flux lumineux, la couche 2 optiquement absorbante, la couche sacrificielle 3 et une couche 4 (ou un empilement de couches) à séparer du reste de la structure.

- L'irradiation par le flux lumineux est effectuée au travers de la face du substrat
- 25 opposée à la couche à séparer. En effet, la couche à séparer n'est pas nécessairement transparente vis-à-vis du flux lumineux ; d'autre part, un échauffement provoqué par une absorption au moins partielle dudit flux lumineux pourrait endommager ladite couche à séparer. La couche sacrificielle est intercalée entre la couche optiquement absorbante et la couche à séparer. Ainsi, elle contribue à former une barrière thermique entre la couche
- 30 optiquement absorbante qui s'échauffe fortement par absorption du flux lumineux, et la couche à séparer.

- De préférence, la couche sacrificielle est en contact avec la couche absorbante, de manière à maximiser le transfert thermique de la couche absorbante vers la couche sacrificielle.

- 35 Le substrat 1 est choisi en un matériau sensiblement transparent au flux lumineux à appliquer pour dissocier la couche sacrificielle.

De manière avantageuse, le substrat peut être massif ou constitué d'un empilement de couches de différents matériaux, dès lors que chacun desdits matériaux est sensiblement transparent au flux lumineux.

Selon un mode de réalisation préféré, le substrat comprend au moins un des  
5 matériaux suivants : saphir, quartz.

Le matériau de la couche 2 optiquement absorbante est choisi pour être fortement absorbant à la longueur d'onde du flux lumineux.

De manière avantageuse, la couche 2 comprend au moins un des matériaux  
suivants : nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), silicium polycristallin, carbure de silicium ( $\text{SiC}$ )  
10 polycristallin, molybdène ( $\text{Mo}$ ).

La couche sacrificielle 3 est une couche distincte de la couche 2, avantageusement en un matériau sensiblement transparent au flux lumineux. Le matériau de la couche sacrificielle est choisi pour se dissocier à partir d'une température dite de dissociation. A  
15 partir de cette température de dissociation, on observe une décohésion des liaisons chimiques du matériau de la couche sacrificielle, conduisant à une séparation de la structure composite au niveau de ladite couche sacrificielle. Le matériau de la couche optiquement absorbante est en revanche stable à une température supérieure à la température de dissociation.

De manière avantageuse, la couche sacrificielle comprend au moins un des  
20 matériaux suivants : nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), nitrure d'aluminium ( $\text{AlN}$ ) polycristallin, nitrure de gallium ( $\text{GaN}$ ) polycristallin, oxyde d'indium-étain (ITO). La température de dissociation de ces différents matériaux est généralement comprise entre 1000 et 2500°C.

La couche sacrificielle ne s'échauffe sensiblement pas par absorption du flux lumineux, mais par conduction thermique à partir de la couche optiquement absorbante.  
25 Dans la mesure où la couche sacrificielle commence à se dissocier dès que la température à laquelle elle est exposée atteint la température de dissociation de ladite couche, le budget thermique appliqué à la couche à séparer est inférieur au budget thermique qui serait appliqué à ladite couche si elle était en contact avec la couche optiquement absorbante.

Par ailleurs, le fait d'utiliser deux couches distinctes pour l'absorption optique et la  
30 dissociation permet de se contenter d'une couche sacrificielle relativement fine (plus fine que la couche sacrificielle de l'état de la technique). En effet, alors que dans le cas où la couche sacrificielle est confondue avec la couche d'absorption optique, ladite couche doit être suffisamment épaisse (typiquement, de l'ordre de quelques centaines de  
35 nanomètres) pour emmagasiner la chaleur nécessaire à sa propre dissociation, la couche sacrificielle n'a pour fonction que de se décomposer à partir d'une certaine température et peut donc être très fine (de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres).

Dans la mesure où l'invention permet de réduire le budget thermique de la couche à séparer, ladite couche peut être formée d'une grande diversité de matériaux.

Par exemple, la couche à séparer comprend avantageusement au moins un des matériaux suivants : un métal, tel que du cuivre ; un matériau du groupe IV présentant  
5 une structure cristalline hexagonale, tel que du graphène ; un matériau piézoélectrique, ferromagnétique ou ferroélectrique ; un alliage à changement de phase, tel que GeSbTe par exemple.

Ladite structure composite peut être obtenue en faisant croître successivement les couches constitutives sur le substrat 1. Certaines étapes de fabrication de la structure  
10 composite peuvent également inclure des étapes de collage ou de transfert de couche.

En tout état de cause, la température de dissociation de la couche sacrificielle doit être supérieure à la température à laquelle la couche à séparer est déposée ou collée, afin d'éviter toute dissociation intempestive de la couche sacrificielle pendant la fabrication de la structure composite.

15 La structure composite peut avantageusement comprendre une ou plusieurs couches additionnelles, utilisées seules ou en combinaison, qui produisent les effets supplémentaires décrits ci-après en référence à la figure 1B.

La figure 1B illustre un mode de réalisation combinant l'ensemble de ces couches fonctionnelles additionnelles, mais, comme indiqué précédemment, la structure composite  
20 pourrait comprendre seulement une partie de ces couches, dès lors qu'elle comprend au moins les couches décrites en référence à la figure 1A.

Entre le substrat 1 et la couche optiquement absorbante 2 est agencée une première couche 5 formant barrière thermique. La couche 5 est en un matériau sensiblement transparent au flux lumineux et présentant une faible conduction thermique.  
25 Par « faible conduction thermique », on entend dans le présent texte un coefficient de conductivité thermique linéaire inférieur à  $10 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

Une deuxième couche 5 de barrière thermique est agencée sur la couche sacrificielle 3. La couche 5 étant en un matériau de faible conduction thermique, elle permet d'améliorer l'isolation thermique de la couche 4 à séparer.

30 De manière avantageuse, chacune des couches 5 comprend au moins un des matériaux suivants : silice ( $\text{SiO}_2$ ), alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Les couches 5 permettent de confiner la chaleur dans la portion de la structure composite qu'elles délimitent, à savoir la couche optiquement absorbante et la couche sacrificielle. Ainsi, la température de dissociation de la couche sacrificielle est atteinte plus  
35 rapidement qu'en l'absence des couches de barrière thermique.

Un film 6 (ou un empilement de films) adapté pour réfléchir le flux lumineux, ou pour absorber la partie dudit flux transmise au travers de la couche optiquement absorbante, est agencé sur la deuxième couche 5 de barrière thermique.

Ledit film 6 comprend avantageusement au moins un des matériaux suivants : silicium, silice ( $\text{SiO}_2$ ), carbure de silicium ( $\text{SiC}$ ), molybdène, nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Le film 6 peut avantageusement comprendre un empilement de type miroir de Bragg. Ledit empilement peut éventuellement remplir la fonction de barrière thermique et ainsi  
5 remplacer la seconde couche 5.

Ledit film 6 permet d'éviter qu'une partie du flux lumineux ne soit transmis à la couche à séparer, ce qui a pour effet de réduire le budget thermique appliqué à ladite couche et d'éviter des pertes d'énergie.

Par ailleurs, un film 7 (ou un empilement de films) présentant une certaine inertie  
10 thermique et adapté pour répartir la chaleur sur l'étendue de la surface de la structure est agencé sur le film 6.

Ledit film 7 se caractérise par un produit épaisseur x densité x capacité thermique massique.

Ledit film 7 comprend au moins un des matériaux suivants : alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silice  
15 ( $\text{SiO}_2$ ), nitrure d'aluminium ( $\text{AlN}$ ) polycristallin, silicium polycristallin.

Enfin, une couche germe 8 est agencée sur le film 7, en contact direct avec la couche 4 à transférer. La couche germe est choisie pour faciliter le collage ou le dépôt de la couche 4 à séparer, selon le mode de formation de ladite couche.

La couche germe 8 peut comprendre au moins un des matériaux suivants : platine,  
20 nickel, cuivre.

Dans le cas où la couche à séparer doit être transférée sur un support en vue d'une utilisation ultérieure, la structure composite est assemblée audit support par l'intermédiaire de la couche à séparer. La réduction du budget thermique de séparation décrite plus haut est également bénéfique au support, en particulier si celui-ci est sensible  
25 à la température. L'invention permet donc également d'utiliser une plus grande diversité de supports, notamment en matériau polymère ou en métal.

D'une manière générale, le support peut comprendre au moins un des matériaux suivants : un matériau semi-conducteur, tel que du silicium ; un métal, tel que du cuivre ; un polymère.

La figure 2 illustre le collage de la structure composite de la figure 1A sur un support  
30 200. Le collage peut être précédé de toute étape de préparation de surface adaptée en vue de renforcer l'énergie de collage. De manière alternative, le support peut être déposé sur la couche à séparer, pourvu que le budget thermique mis en œuvre pour ce dépôt soit suffisamment faible pour ne pas provoquer une dissociation de la couche sacrificielle.

La figure 3 illustre de manière schématique l'irradiation de la structure composite collée au support par un faisceau laser (représenté par la flèche). Ledit faisceau traverse  
35 le substrat 1 (et, le cas échéant, la première couche de barrière thermique) et est absorbé par la couche optiquement absorbante, qui s'échauffe.

De manière avantageuse, le flux lumineux est appliqué de manière impulsionnelle. La durée de chaque impulsion est de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes. Cette durée est choisie en fonction de la puissance du laser et de la température à atteindre dans la couche optiquement absorbante pour pouvoir dissocier la couche  
5 sacrificielle.

La longueur d'onde du laser est choisie en rapport avec les matériaux des couches constituant la structure composite. Notamment, le substrat et la ou les couches de barrière thermique, ainsi que la couche sacrificielle, sont sensiblement transparents à la longueur d'onde du laser, contrairement à la couche optiquement absorbante.

10 D'une manière générale, la longueur d'onde du laser peut être comprise entre 100 et 12000 nm. Pour un substrat de quartz, la longueur d'onde du laser est avantageusement de l'ordre de 150 à 700 nm. Pour un substrat de silicium, la longueur d'onde du laser est avantageusement de l'ordre de 1000 à 12000 nm.

En référence à la figure 4, la couche sacrificielle 3 se dissocie sous l'effet de la  
15 chaleur générée dans la couche électriquement absorbante 2. La structure composite se sépare donc en deux parties : une première partie qui comprend le substrat 1 et la couche optiquement absorbante 2, d'une part, et une seconde partie qui comprend la couche 4 à séparer, d'autre part. Des résidus de la couche sacrificielle 3 peuvent se trouver sur l'une et/ou l'autre des deux parties. Un traitement de finition peut éventuellement être mis en  
20 œuvre pour éliminer ces résidus.

La figure 5 illustre la couche 4 transférée sur le support 200.

#### Exemple n°1

Ce premier exemple concerne une structure composite pour la croissance d'une couche de graphène à transférer sur un support.

25 La structure composite comprend successivement, en référence à la figure 1B (on notera que toutes les couches représentées sur la figure 1B ne sont pas présentes dans ladite structure) :

- un substrat 1 de saphir de 500  $\mu\text{m}$  d'épaisseur ;
- une première couche 5 de barrière thermique en  $\text{SiO}_2$  de 500 nm d'épaisseur ;
- 30 - une couche 2 optiquement absorbante en carbure de silicium ( $\text{SiC}$ ) de 30 nm d'épaisseur ;
- une couche sacrificielle 3 en nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) de 20 nm d'épaisseur ;
- une seconde couche 5 de barrière thermique en  $\text{SiO}_2$  de 1000 nm d'épaisseur ;
- une couche germe 8 de nickel de 50 nm d'épaisseur.

35 Lorsque l'on soumet ladite structure à un faisceau d'un laser pulsé émettant à 193 nm, avec une durée d'impulsion de 20 ns et une fluence d'environ  $0,1 \text{ J.cm}^{-2}$ , au travers du substrat 1, la température au sein de la structure augmente pendant la durée de chaque impulsion. La chaleur générée est essentiellement localisée dans la couche 2

optiquement absorbante. Lorsque la température atteint la température de dissociation du nitrure de silicium (soit environ 1900°C), une partie de la couche sacrificielle, la seconde couche de barrière thermique 5 et la couche germe 8 se désolidarisent du substrat 1 et de la première couche de barrière thermique 5.

- 5       Après une impulsion laser, la température s'homogénéise dans la structure. On s'intéresse en particulier à la température au niveau de l'interface supérieure de la couche germe 8, c'est-à-dire l'interface entre la couche germe et la couche de graphène.

10       La figure 6A montre la répartition de la température au sein de la structure composite en fonction de la profondeur  $z$  (en  $\mu\text{m}$ ) pour différentes durées inférieures ou égale à la durée d'impulsion laser, qui est de 20 ns dans ce cas.

La figure 6B montre l'homogénéisation de la température au sein de la structure en fonction de la profondeur  $z$  (en  $\mu\text{m}$ ) pour différentes durées après la fin de l'impulsion laser.

- 15       La figure 6C montre l'évolution de la température  $T$  (en °C) au niveau de la couche germe en fonction du temps  $t$  (en ms). On observe que ladite température n'excède pas 275°C, qui est une température bien inférieure à la température à partir de laquelle on observe une dégradation des propriétés électriques du graphène.

20       A la longueur d'onde de 193 nm, le SiC présente un coefficient d'absorption optique plus de trois fois supérieur à celui du nitrure de silicium, tout en étant stable au-dessus de la température de dissociation du nitrure de silicium.

La combinaison d'une couche optiquement absorbante de SiC de 30 nm d'épaisseur et d'une couche sacrificielle de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  de 20 nm d'épaisseur remplace avantageusement une unique couche sacrificielle optiquement absorbante de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  de 100 nm d'épaisseur utilisée dans l'état de la technique.

- 25       La figure 7A présente ainsi la température maximale  $T$  à l'interface supérieure de la couche germe 8 (en °C), pour la combinaison d'une couche optique absorbante de 30 nm de SiC et d'une couche sacrificielle de 20 nm de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  selon l'invention et pour une unique couche sacrificielle optiquement absorbante de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  de 100 nm d'épaisseur, non conforme à l'invention, en fonction de la durée d'impulsion du laser (en ns). On observe  
30       que la température maximale est réduite de plus de 100°C avec la structure selon l'invention.

- La figure 7B illustre la chaleur  $C$  nécessaire au détachement par unité de surface (en  $\text{J.cm}^{-2}$ ) en fonction de la durée d'impulsion du laser (en ns), pour la combinaison d'une couche optique absorbante de 30 nm de SiC et d'une couche sacrificielle de 20 nm de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  selon l'invention et pour une unique couche sacrificielle optiquement absorbante de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  de 100 nm d'épaisseur, non conforme à l'invention. On observe que la chaleur  
35       nécessaire est réduite de près de  $0,02 \text{ J.cm}^{-1}$  avec l'invention, soit une réduction d'environ 14%.

La figure 7C illustre par ailleurs des résultats de simulations numériques pour différentes structures composites.

Les structures S1, S2 et S3 sont conformes à l'invention. Elles comprennent toutes successivement le substrat 1 de saphir, la première couche 5 de barrière thermique en SiO<sub>2</sub>, la couche 2 optiquement absorbante en SiC, la couche sacrificielle 3 en Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, la seconde couche 5 de barrière thermique et une couche de nickel, constituant une couche germe pour la couche de graphène à séparer (sauf indication contraire, l'épaisseur de chacune desdites couches est celle mentionnée plus haut). Les structures S1 et S2 comprennent en outre une couche 7 d'inertie thermique en silicium polycristallin entre la seconde couche de barrière thermique et la couche germe 8 ; dans le cas de la structure S1, l'épaisseur de la couche 7 est de 1000 nm ; dans le cas de la structure S2, l'épaisseur de la couche 7 est de 500 nm.

La structure S4 n'est pas conforme à l'invention : elle comporte une unique couche sacrificielle optiquement absorbante de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> de 100 nm d'épaisseur entre des première et seconde couches de barrière thermique identiques à celles des structures S1 à S3.

On observe que la température maximale est d'autant plus basse que la couche d'inertie thermique 7 est épaisse. Ainsi, pour la structure S2, comprenant une couche d'inertie thermique 7 de 500 nm d'épaisseur, la température maximale est inférieure à 200°C pour une impulsion de 20 ns. Dans ce cas, le film d'inertie thermique procure 43% de capacité thermique surfacique (en J.K<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>) supplémentaire par rapport à l'ensemble des couches 3, 5 et 8.

#### Exemple n°2

Ce second exemple concerne une structure composite permettant le dépôt d'une couche de PZT (titano-zirconate de plomb) sur un substrat de silicium puis le transfert de ladite couche sur un support flexible. Une telle couche présente des propriétés ferroélectriques, piézoélectriques et/ou pyroélectriques.

La structure composite comprend successivement, en référence à la figure 1B (toutes les couches représentées sur la figure 1B n'étant pas nécessairement présentes dans ladite structure) :

- un substrat 1 de silicium de 500 µm d'épaisseur ;
- une première couche 5 de barrière thermique en SiO<sub>2</sub> de 500 nm d'épaisseur ;
- une couche 2 optiquement absorbante en molybdène de 100 nm d'épaisseur ;
- une couche sacrificielle 3 en oxyde de titane et d'indium (ITO) de 20 nm d'épaisseur ;
- une seconde couche 5 de barrière thermique en SiO<sub>2</sub> de 500 nm d'épaisseur ;
- une couche 4 de PZT de 1 µm d'épaisseur.

Afin d'obtenir des propriétés satisfaisantes, ladite couche 4 doit être chauffée à 600°C.

Après cette étape, un support flexible sous la forme d'un film de polyimide est collé sur la couche de PZT en vue d'y transférer ladite couche. La température maximale que peut supporter le film de polyimide est comprise entre 200 et 400°C en fonction de la durée d'application de la température.

- 5 Pour séparer ladite structure composite, on utilise un laser CO<sub>2</sub> émettant de l'infrarouge, par exemple présentant une longueur d'onde de 10,6 µm.

La figure 8A illustre la température maximale (en °C) à l'interface de collage en fonction de la durée d'impulsion laser (en ns), pour différentes structures composites S5-S8.

- 10 La température limite de 200°C est dépassée si la durée d'impulsion est supérieure à 50 ns.

Si la puissance de la source laser n'est pas suffisante, il est possible de procurer un transfert avec une impulsion plus longue (100 ns par exemple) en augmentant l'épaisseur des couches 5 de barrière thermique et/ou en insérant un film 7 de répartition de la chaleur afin d'augmenter la capacité thermique des couches comprises entre la couche sacrificielle 3 et l'interface de collage entre la couche 4 de PZT et le support.

- 15 Les structures S5, S6, S7 et S8 sont conformes à l'invention. Elles comprennent toutes successivement le substrat 1 de silicium, la première couche 5 de barrière thermique en SiO<sub>2</sub>, la couche 2 optiquement absorbante en molybdène, la couche sacrificielle 3 en ITO, la seconde couche 5 de barrière thermique et une couche 4 de PZT de 1 µm, constituant la couche à séparer (sauf indication contraire, l'épaisseur desdites couches est celle mentionnée plus haut). Les structures S5 et S6 comprennent en outre une couche 7 d'inertie thermique en silicium polycristallin entre la seconde couche de barrière thermique et la couche germe 8 ; dans le cas de la structure S5, l'épaisseur de la couche 7 est de 1000 nm ; dans le cas de la structure S6, l'épaisseur de la couche 7 est de 500 nm. Par rapport à la structure S8, la seconde couche de barrière thermique de la structure S7 est plus épaisse (1000 nm au lieu de 500 nm).

- 20 La figure 8B illustre la densité D de puissance du laser (en W.m<sup>-2</sup>) à transmettre au travers du substrat de silicium pour dissocier la couche sacrificielle, en fonction de la durée d'impulsion laser (en ns), pour les structures S5-S8 mentionnées précédemment. Les points sont sensiblement confondus pour l'ensemble desdites structures.

La figure 9A montre la répartition de la température au sein de la structure composite S5 en fonction de la profondeur z (en µm) pour différentes durées inférieures ou égale à la durée d'impulsion laser, qui est de 100 ns dans ce cas.

- 35 La figure 9B montre l'homogénéisation de la température au sein de la structure S5 en fonction de la profondeur z (en µm) pour différentes durées après la fin de l'impulsion laser.

La figure 9C montre l'évolution de la température T (en °C) à l'interface supérieure de la couche de PZT de la structure S5 en fonction du temps t (en  $\mu$ s). On observe que ladite température n'excède pas 180°C, de sorte que le support en polyimide collé à la couche de PZT ne risque pas d'être endommagé lors du procédé de séparation.

- 5 Naturellement, les exemples développés ci-dessus ne sont fournis qu'à titre illustratif et non limitatif.

#### REFERENCES

WO 2015/019018