

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 127 341

②1 N° d'enregistrement national : **21 09949**

⑤1 Int Cl⁸ : **H 01 S 5/343 (2020.12)**

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 22.09.21.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 24.03.23 Bulletin 23/12.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *SOITEC Société anonyme à conseil d'administration* — FR.

⑦2 Inventeur(s) : FIGUET Christophe et HUUYET Isabelle.

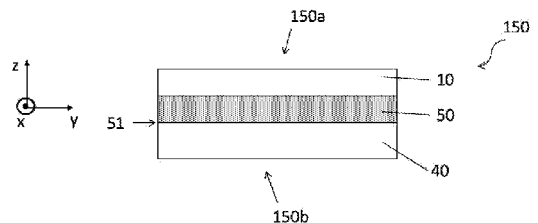
⑦3 Titulaire(s) : *SOITEC Société anonyme à conseil d'administration*.

⑦4 Mandataire(s) : IP TRUST.

⑤4 **STRUCTURE SEMI-CONDUCTRICE POUR APPLICATIONS OPTOELECTRONIQUES.**

⑤7 L'invention concerne une structure semi-conductrice (150) pour applications optoélectroniques comprenant : - une première couche (10) en un matériau semi-conducteur cristallin, disposée sur - une couche intermédiaire (50) incluant ou adjacente à une interface de collage direct, la couche intermédiaire étant disposée sur - une deuxième couche (40) en un matériau semi-conducteur cristallin, la structure semi-conductrice (150) étant caractérisée en ce que la couche intermédiaire (50) est composée d'un matériau différent de ceux des première (10) et deuxième (40) couches et dont le coefficient d'atténuation est inférieur à 100 et l'indice de réfraction s'écarte de moins de 0,3 de l'indice de réfraction : - d'au moins une sous-couche de la première couche (10), adjacente à la couche intermédiaire (50), et - d'au moins une sous-couche de la deuxième couche (40), adjacente à la couche intermédiaire (50).

Figure 2



FR 3 127 341 - A1



Description

Titre de l'invention : STRUCTURE SEMI-CONDUCTRICE POUR APPLICATIONS OPTOELECTRONIQUES

DOMAINE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention vise le domaine des semi-conducteurs et particulièrement de l'optoélectronique. Elle concerne une structure semi-conductrice comprenant une première couche en matériau semi-conducteur cristallin assemblée sur une deuxième couche, via une couche intermédiaire présentant un indice de réfraction très proche des première et deuxième couches.

ARRIÈRE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

[0002] Les diodes laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL pour « vertical-cavity surface-emitting laser ») connaissent un développement croissant dans les applications grand public émergentes que sont la reconnaissance faciale dans le domaine de la téléphonie mobile notamment, et la télédétection (Lidar pour « light detection and ranging ») pour l'automobile.

[0003] Les VCSEL 100 sont élaborés à partir d'empilements de couches semi-conductrices III-V, par croissances épitaxiales successives (figures 1a, 1b). La composition, le dopage et l'épaisseur de chaque couche sont finement définis pour former d'une part, une région active 2 constituée d'un ou plusieurs puits quantiques permettant la génération du faisceau laser, et d'autre part, deux miroirs de Bragg 3a,3b prenant la région active 2 en sandwich et constitués d'une alternance de couches à haut et bas indices de réfraction.

[0004] Il est connu de former l'empilement de couches d'un VCSEL 100 sur un substrat massif 1, comme illustré sur la [Fig.1a], par exemple en arséniure de gallium (GaAs) pour des longueurs d'onde de laser comprises entre 650nm et 1300nm, ou en phosphure d'indium (InP) pour des longueurs d'onde de laser comprises entre 1300nm et 2000nm. Ledit substrat massif 1 doit présenter une excellente qualité pour assurer la fonction de germe d'épitaxie et garantir la haute qualité de l'empilement de couches, pour une haute performance du VCSEL 100.

[0005] Alternativement, pour adresser des problèmes de coûts liés à l'utilisation de substrats massifs de haute qualité, une couche utile mince de haute qualité 10 peut être transférée sur un substrat support 1' dont les propriétés sont plus modestes et/ou adaptées à d'autres contraintes, par exemple d'intégration ou de packaging du VCSEL 100 ([Fig.1b]). Un tel transfert de couche utile sur un substrat support est notamment proposé dans le document WO2021/125005.

[0006] Un transfert de couche(s) mince(s) peut également être utile pour la réalisation du

VCSEL lui-même. Par exemple, dans le cas où les miroirs de Bragg 3a,3b nécessitent un très grand nombre d'alternances de couches du fait de limitations de compositions et dopages imposées par la croissance épitaxiale, il peut être plus favorable de transférer un ensemble de couches minces (miroir de Bragg) plutôt que de le faire croître par épitaxie. On pourra par exemple se référer à l'article de A. Syrbu et al, "1.5-mW single-mode operation of wafer-fused 1550-nm VCSELs", IEEE Photonics Technology Letters, Volume : 16, Issue: 5, pp1230-1232, Mai 2004.

[0007] Dans tous les cas de transferts, l'assemblage entre la couche utile mince 10 et le substrat support 1' doit permettre de conserver la haute qualité de ladite couche 10 et éviter d'apporter des perturbations dans le fonctionnement du VCSEL 100. Un problème peut venir du fait que le collage direct entre une couche utile mince 10 et un substrat support 1', tous deux en matériaux semi-conducteurs III-V, nécessite plusieurs étapes de préparation des surfaces à assembler, par voie chimique, lesquelles peuvent s'avérer complexes et donc coûteuses.

OBJET DE L'INVENTION

[0008] La présente invention propose une solution simplifiant la fabrication de VCSEL et plus généralement la fabrication de composants optoélectroniques, mettant en œuvre le transfert d'une première couche sur une deuxième couche. Elle concerne en particulier une structure semi-conductrice comprenant une première couche en matériau semi-conducteur cristallin assemblée sur une deuxième couche également en matériau semi-conducteur cristallin, via une couche intermédiaire présentant un indice de réfraction très proche de celui d'au moins une sous-couche de la première et d'au moins une sous-couche de la deuxième couche, lesdites sous-couches étant adjacentes à la couche intermédiaire. La couche intermédiaire présente en outre un coefficient d'atténuation très faible.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

[0009] La présente invention concerne une structure semi-conductrice pour applications optoélectroniques comprenant :

[0010] - une première couche en un matériau semi-conducteur cristallin, disposée sur

[0011] - une couche intermédiaire incluant ou adjacente à une interface de collage direct, la couche intermédiaire étant disposée sur

[0012] - une deuxième couche en un matériau semi-conducteur cristallin.

[0013] La structure semi-conductrice est remarquable en ce que la couche intermédiaire est composée d'un matériau différent de ceux des première et deuxième couches et dont l'indice de réfraction s'écarte de moins de 0,3 de l'indice de réfraction :

[0014] - d'au moins une sous-couche de la première couche, adjacente à la couche intermédiaire, et

- [0015] - d'au moins une sous-couche de la deuxième couche, adjacente à la couche intermédiaire.
- [0016] La couche intermédiaire présente en outre un coefficient d'atténuation inférieur à 100.
- [0017] Selon des caractéristiques avantageuses de l'invention, prises seules ou selon toute combinaison réalisable :
- [0018]
- le coefficient d'atténuation de la couche intermédiaire est inférieur à 10, voire inférieur à 1, voire encore préférentiellement au plus proche de 0 ;
 - le matériau de la couche intermédiaire est amorphe ;
 - le matériau de la première couche est un monocristal de haute qualité cristalline pour former un germe pour épitaxie ;
 - la première couche forme tout ou partie d'une diode laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) ;
 - la deuxième couche est un substrat support présentant une transparence optique supérieure à 30% ;
 - le matériau semi-conducteur de la première couche est l'arséniure de gallium, le matériau semi-conducteur de la deuxième couche est l'arséniure de gallium, et le matériau de la couche intermédiaire est le silicium ;
 - la première couche est une région active d'une diode laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL), et la deuxième couche est un miroir de Bragg en multicouches de ladite diode laser ;
 - le matériau semi-conducteur de la première couche est le phosphore d'indium, le matériau semi-conducteur d'au moins une sous-couche de la deuxième couche adjacente à la couche intermédiaire est l'arséniure de gallium, et le matériau de la couche intermédiaire est le phosphore de zinc germanium ou le carbure de bore ou l'arséniure de zinc silicium.

Brève description des dessins

- [0019] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquelles :
- [0020] [Fig.1a]
- [0021] [Fig.1b] Les figures 1a et 1b présentent des structures semi-conductrices pour la fabrication d'un VCSEL, selon l'état de la technique ;
- [0022] [Fig.2] La [Fig.2] présente une structure semi-conductrice conforme à l'invention ;
- [0023] [Fig.3] La [Fig.3] présente une structure semi-conductrice selon un premier mode de réalisation de l'invention ;
- [0024] [Fig.4a]
- [0025] [Fig.4b]

- [0026] [Fig.4c]
 [0027] [Fig.4d]
 [0028] [Fig.4e]
 [0029] [Fig.4f]
 [0030] [Fig.4g] Les figures 4a à 4g présentent des étapes d'un procédé de fabrication d'une structure semi-conductrice selon un premier mode de réalisation de l'invention ;
 [0031] [Fig.5a]
 [0032] [Fig.5f] Les figures 5a et 5f présentent des étapes d'un procédé de fabrication d'une structure semi-conductrice, selon une variante du premier mode de réalisation de l'invention ;
 [0033] [Fig.6a]
 [0034] [Fig.6b]
 [0035] [Fig.6c] Les figures 6a à 6c présentent des structures semi-conductrices selon un deuxième mode de réalisation de l'invention.
 [0036] Les figures sont des représentations schématiques qui, dans un objectif de lisibilité, ne sont pas à l'échelle. En particulier, les épaisseurs des couches selon l'axe z ne sont pas à l'échelle par rapport aux dimensions latérales selon les axes x et y.
 [0037] Les mêmes références sur les figures pourront être utilisées pour des éléments de même nature.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

- [0038] L'invention concerne une structure semi-conductrice 150 spécialement adaptée pour les applications optoélectroniques.
 [0039] Elle comprend une première couche 10 en un matériau semi-conducteur cristallin, disposée sur une couche intermédiaire 50, elle-même disposée sur une deuxième couche 40 en un matériau semi-conducteur cristallin. Comme illustré sur la [Fig.2], ces couches 10,40,50 s'étendent parallèlement à un plan principal (x,y) et présentent une épaisseur selon un axe z. Par convention, la face avant 150a de la structure semi-conductrice 150 est située du côté de la première couche 10 et sa face arrière 150b est située du côté de la deuxième couche 40.
 [0040] La structure semi-conductrice 150 peut se présenter sous forme d'une plaquette, dont le diamètre est compris par exemple entre 50mm et 200mm : elle est dans ce cas destinée à accueillir une pluralité de composants optoélectroniques qui pourront ultérieurement être singularisés. Elle peut alternativement se présenter sous forme de vignette de plus petite dimension, accueillant un composant optoélectronique ou un groupe de composants.
 [0041] Les matériaux semi-conducteurs cristallins formant respectivement la première couche 10 et la deuxième couche 40 peuvent être de même nature ou de nature

différente. Étant destinés à l'élaboration de composants optoélectroniques, ils sont avantageusement choisis parmi les composés semi-conducteurs III-V, tels que le nitrure de gallium, l'arséniure de gallium, le phosphure d'indium, et autres composés III-V binaires, ternaires ou quaternaires. Notons que la première couche 10 (et/ou la deuxième couche 40) pourra(ont) être composée(s) d'un empilement de sous-couches de dopages ou de compositions différentes ou présenter une composition homogène.

[0042] La structure semi-conductrice 150 selon la présente invention comprend en outre une interface de collage direct 51, ladite interface 51 étant incluse dans ou adjacente à la couche intermédiaire 50. Par collage direct, on entend un collage ne nécessitant pas une matière adhésive et basé sur une adhésion moléculaire entre les surfaces assemblées. Plusieurs types de collage direct existent, qui diffèrent notamment par les conditions de température, de pression, d'atmosphère ou de traitements préalables à la mise en contact des surfaces. On peut citer le collage par adhésion moléculaire à température ambiante avec ou sans activation préalable par plasma des surfaces à assembler, le collage par diffusion atomique (« Atomic diffusion bonding » ou ADB selon la terminologie anglo-saxonne), le collage avec activation de surface (« Surface-activated bonding » ou SAB), etc.

[0043] La structure semi-conductrice 150 visant des applications optoélectroniques, tout ou partie des couches la constituant est destinée à être traversé(e) par un signal lumineux : typiquement, les composants optoélectroniques élaborés sur la structure 150 pourront, selon leur type et leur nature, transmettre ou recevoir le signal lumineux, au niveau de la face avant 150a ou au niveau de la face arrière 150b de la structure semi-conductrice 150.

[0044] Pour que la structure semi-conductrice 150 présente un caractère générique et soit apte à accueillir une grande variété de types de composants optoélectroniques, l'indice de réfraction de la couche intermédiaire 50 s'écarte de moins de 0,3, voire de moins de 0,2, de l'indice de réfraction :

- d'au moins une sous-couche de la première couche 10, ladite sous-couche étant adjacente à la couche intermédiaire 50, et

- d'au moins une sous-couche de la deuxième couche 40, ladite sous-couche étant adjacente à la couche intermédiaire 50.

[0045] En d'autres termes, lorsque la première couche 10 (respectivement la deuxième couche 40) est formée de sous-couches empilées, la différence d'indice de réfraction entre la sous-couche en contact avec la couche intermédiaire 50 et ladite couche intermédiaire 50 est inférieure à 0,3, voire inférieure à 0,2. Lorsque la première couche 10 (respectivement la deuxième couche 40) présente une composition homogène, la différence d'indice de réfraction entre la première couche 10 (respectivement la deuxième couche 40) et la couche intermédiaire 50 est inférieure à 0,3, voire inférieure

à 0,2.

- [0046] De plus, la couche intermédiaire 50 présente un coefficient d'atténuation k inférieur à 100, voire inférieur à 10, voire encore inférieur à 1, et préférentiellement aussi proche de zéro que possible pour limiter l'atténuation du signal lumineux destiné à traverser ladite couche 50. Cela revient à dire que les propriétés physico-chimiques et mécaniques de la couche intermédiaire 50 sont choisies de manière à garantir un faible coefficient d'atténuation.
- [0047] Rappelons que l'indice optique des matériaux se décompose en un indice de réfraction n (précité), qui est la partie réelle de l'indice optique, et en un coefficient d'atténuation k , partie imaginaire de l'indice optique ($n + ik$).
- [0048] La couche intermédiaire 50 de la structure 150 est en outre composée d'un matériau différent de ceux des première 10 et deuxième 40 couches, notamment parce que cette couche remplit une fonction additionnelle, à savoir favoriser l'assemblage par collage entre la première couche 10 et la deuxième couche 40.
- [0049] A titre d'exemple, lorsque l'indice de réfraction de la première couche 10 est égal à 3, l'indice de réfraction de la deuxième couche 40 est compris entre $[3 + 0,3 = 3,30]$ et $[3 - 0,3 = 2,70]$, ainsi que l'indice de réfraction de la couche intermédiaire 50. Le coefficient d'atténuation de la couche intermédiaire 50 est quant à lui inférieur à 100, à 10, ou à 1.
- [0050] Ainsi, la couche intermédiaire 50 de la structure semi-conductrice 150 n'apporte pas ou très peu de perturbation si le signal lumineux doit traverser ladite couche intermédiaire 50. De plus, la couche intermédiaire 50 favorise le collage direct entre la première couche 10 et la deuxième couche 40 en simplifiant les étapes de préparation de surface préalables à l'assemblage, le matériau de la couche intermédiaire 50 était notamment choisi pour sa facilité de préparation ; il permet en outre un arrangement des atomes à basse température, favorable à l'assemblage, tout en limitant les contraintes entre les couches 10 et 40. Notons également que, plus le coefficient d'atténuation est faible (c'est-à-dire plus il est proche de 0), plus on garde de la flexibilité quant à l'épaisseur de la couche intermédiaire 50 ; en d'autres termes, avec un très faible coefficient d'atténuation, la couche intermédiaire 50 plus épaisse peut être mise en œuvre : cela peut s'avérer avantageux pour augmenter la qualité du collage direct.
- [0051] Dans la structure semi-conductrice 150, la rugosité d'interface entre les différentes couches 10,50,40 ou sous-couches est préférentiellement maintenue inférieure à environ 5nm RMS (mesure par microscopie par force atomique, AFM, sur des scans de 10 microns par 10 microns), pour limiter la diffusion du signal lumineux sur lesdites interfaces.
- [0052] Avantagusement, le matériau de la couche intermédiaire 50 est amorphe, de manière

à limiter le champ de contrainte lié au collage de deux matériaux dont les réseaux cristallins ne sont pas alignés et/ou dont les paramètres de maille sont différents, et de manière à éviter la formation de nano-bulles à l'interface de collage.

- [0053] Selon un **premier mode de réalisation de l'invention**, la structure semi-conductrice 150 est destinée à accueillir des composants de type VCSEL avec émission du signal laser par la face arrière 150b.
- [0054] Le matériau de la première couche 10 est un monocristal de haute qualité destiné à former un germe pour la croissance épitaxiale de l'empilement de couches comprenant la région active 2 en sandwich entre les deux miroirs de Bragg 3a,3b. La deuxième couche 40 est un substrat support 40 présentant une forte transparence optique (potentiellement meilleure que celle de la première couche 10), typiquement supérieure à 30%. Avantagusement, pour des raisons essentiellement économiques, le substrat support 40 est de moindre qualité cristalline par rapport à la première couche 10 ([Fig.3]).
- [0055] Typiquement, le matériau semi-conducteur de la première couche 10 est l'arséniure de gallium (GaAs), avec une qualité cristalline permettant une croissance sans défaut, typiquement du GaAs n-type ($\sim 10^{18}$ at/cm³) adapté à l'application visée et présentant une densité de défauts de type dislocations inférieure à 500/cm². L'épaisseur de la première couche 10 est comprise entre 50 et 1500 nm.
- [0056] Le matériau semi-conducteur de la deuxième couche 40 est l'arséniure de gallium et présente une absorbance moindre (meilleure transparence optique) par rapport au matériau de la première couche 10, à la longueur de fonctionnement du composant visé. La deuxième couche 40 qui constitue le substrat support 40 de la structure semi-conductrice 150 ne nécessite pas une haute qualité cristalline en ce qu'il joue essentiellement un rôle de support mécanique. Son épaisseur est par exemple comprise entre 200 et 2000 microns. En vue de la traversée du substrat support 40 par le signal lumineux, induite par l'émission du composant VCSEL par la face arrière 150b, l'arséniure de gallium du substrat support 40 est en outre choisi semi-isolant, afin de limiter l'absorption du signal lumineux et par conséquent de favoriser l'efficacité du composant VCSEL.
- [0057] Pour une longueur d'onde du signal lumineux de l'ordre de 900nm, la première couche 10 et le substrat support 40 présentent un indice de réfraction égal à 3,52.
- [0058] Le matériau de la couche intermédiaire 50 est le silicium (Si), et en particulier, un silicium amorphe. L'épaisseur de la couche intermédiaire 50 peut varier entre 1 nm et 100 nm. Pour une longueur d'onde du signal lumineux de l'ordre de 900nm, la couche intermédiaire 50 présente un indice de réfraction égal à 3,6 et un coefficient d'atténuation très proche de 0.
- [0059] Une structure semi-conductrice 150 selon ce premier mode de réalisation peut être

élaborée à partir d'un procédé de transfert de couches par collage et amincissement, connu de l'état de la technique. Particulièrement adapté au transfert de couches très minces, on peut notamment citer le procédé Smart Cut™.

- [0060] Une première étape a) consiste en la fourniture d'un substrat donneur 11, duquel sera prélevée la première couche 10 ([Fig.4a]). Le substrat donneur 11 peut consister en un substrat massif en GaAs présentant les propriétés et caractéristiques attendues pour la première couche 10. Alternativement, il peut comprendre un substrat initial 11a et une ou plusieurs couches superficielles 11b de haute qualité, par exemple formée(s) par épitaxie sur le substrat initial 11a : la première couche 10 sera alors prélevée de la(les)dite(s) couche(s) superficielle(s) 11b.
- [0061] Une deuxième étape b) consiste en la fourniture d'un substrat support 40 destiné à former la deuxième couche 40 de la structure semi-conductrice 150 ([Fig.4b]). La qualité et les caractéristiques du substrat support 40 en GaAs sont conformes à l'application visée, comme évoqué précédemment.
- [0062] Dans une troisième étape c), une couche de collage 5 en Si amorphe est ensuite déposée sur le substrat donneur 11 et/ou sur le substrat support 40 ([Fig.4c]) : après assemblage des deux substrats 11,40, cette (ou ces) couche(s) de collage 5 sera (seront) enterrée(s) dans la structure et formera(ont) la couche intermédiaire 50. La couche de collage 5 en Si peut être formée par une technique connue mettant en œuvre un dépôt chimique en phase vapeur (CVD) (tels que par exemple la CVD activée par plasma (PECVD)), ou une épitaxie ou encore un dépôt physique en phase vapeur (PVD). Le dépôt est typiquement opéré à une température comprise entre 200°C et 700°C. L'épaisseur typique d'une couche de collage 5 est comprise entre 1 nm et 20 nm.
- [0063] Une quatrième étape d) comprend l'introduction d'ions légers dans le substrat donneur 11 de manière à former un plan fragile enterré 12 qui délimite, avec une face avant du substrat donneur 11, la couche qui sera transférée, à savoir la première couche 10 ([Fig.4d]). Typiquement, dans un substrat donneur en GaAs, une implantation ionique d'hélium ou hydrogène ou de ces deux ions, à une dose de 1^{E+16} at/cm² à 5^{E+17} at/cm² et une énergie de l'ordre de 100keV permet de former le plan fragile enterré 12 qui permettra de transférer une première couche 10 de 500 nm (resp. 700 nm) d'épaisseur, pour une implantation d'ions hélium (resp. hydrogène). Notons que des nettoyages et préparations de surface pourront être réalisés préalablement et/ou après implantation, de manière à éliminer de potentielles contaminations particulières, organiques ou métalliques.
- [0064] Une cinquième étape e) comprend l'assemblage du substrat donneur 11 avec le substrat support 40, pour former un ensemble collé le long d'une interface de collage 51 ([Fig.4e]). Cet assemblage consiste en la mise en contact intime des faces avant des deux substrats 11,40, munies de la ou des couche(s) de collage 5. Comme évoqué pré-

cédemment, un collage direct par adhésion moléculaire à température ambiante, ou alternativement un collage direct sous atmosphère et température contrôlée (de type ADB ou SAB) peut être opéré. On peut bien sûr prévoir des nettoyages ou activations de surfaces (par exemple par plasma) préalablement à la mise en contact des faces à assembler. Ces préparations de surface sont facilitées par rapport à des préparations impliquant un matériau III-V, car le nettoyage et/ou l'activation avant collage du silicium relève(nt) d'étapes et d'équipements conventionnels et bien maîtrisés dans le domaine du semi-conducteur.

- [0065] A titre d'exemple, un collage type ADB peut être réalisé sous ultravide après avoir déposé sur les substrats 11 et 40 la couche de collage 5 en silicium amorphe.
- [0066] L'ensemble collé peut avantageusement subir un traitement thermique pour la consolidation de l'interface de collage 51, typiquement à une température comprise entre 150 °C et 600 °C, pendant quelques minutes à quelques heures.
- [0067] La [Fig.4e] illustre une interface de collage 51 située dans la couche intermédiaire 50 ; ladite interface 51 peut alternativement être située entre la première couche 10 et la couche intermédiaire 50 lorsque la couche de collage 5 n'est déposée que sur le substrat support 40, ou être située entre le substrat support 40 et la couche intermédiaire 50, lorsque la couche de collage 5 n'est déposée que sur le substrat donneur 11. Même dans le cas où la couche de collage 5 n'est déposée que sur l'un des substrats donneur 11 et support 40, le collage direct est facilité.
- [0068] Une sixième étape f) comprend la séparation le long du plan fragile enterré 12 du fait de la présence et/ou de la croissance de cavités et de microfissures dans ledit plan ([Fig.4f]). Comme cela est connu en soi, une telle séparation s'opère par exemple au cours d'un traitement thermique apte à provoquer le développement des cavités et leur mise sous pression, et à conduire à la propagation spontanée d'une onde de fracture dans le plan fragile enterré 12. Le traitement thermique de séparation correspond typiquement à un recuit à 200 °C pendant 120 minutes. Alternativement ou conjointement au traitement thermique, la séparation peut être provoquée par une sollicitation mécanique appliquée au plan fragile enterré 12.
- [0069] A l'issue de l'étape f), on obtient d'une part la structure semi-conductrice 150 avec sa première couche 10 disposée sur la couche intermédiaire 50, elle-même disposée sur le substrat support 40 (ou deuxième couche 40) ; d'autre part, on obtient le reste 11' du substrat donneur.
- [0070] L'étape f) peut ensuite comprendre des traitements de surface (nettoyage, polissage, gravure) ou autres traitements de lissage, pour améliorer la qualité superficielle de la première couche 10.
- [0071] Cette structure 150 selon l'invention est avantageuse par rapport à une structure qui mettrait en œuvre un collage direct de la première couche 10 et de la deuxième couche

40, sans couche intermédiaire, car elle facilite grandement les étapes de préparation des surfaces avant assemblage et procure une excellente qualité de collage ; elle élimine en outre le risque de formation de dislocations entre les cristaux de la première couche 10 et de la deuxième couche 40. Rappelons que les défauts de collage types nano-bulles et les défauts cristallographiques (de type dislocations) sont susceptibles de perturber un signal lumineux traversant l'interface de collage 51, ce qui peut être dommageable à certains composants optoélectroniques susceptibles d'être élaborés sur la structure semi-conductrice 150.

- [0072] Des étapes g) d'épitaxies successives destinées à élaborer le (ou les) composant(s) optoélectronique(s), en l'occurrence des composants de type VCSEL, peuvent ensuite être appliquées à la structure semi-conductrice 150, en utilisant la première couche 10 comme germe d'épitaxie ([Fig.4g]). Ces étapes, connues de l'état de la technique, mènent en particulier à la formation de la région active 2 du VCSEL en sandwich entre deux miroirs de Bragg 3a,3b, à base d'arséniure de gallium.
- [0073] Selon une **variante du premier mode de réalisation** de la structure semi-conductrice 150, la première couche 10 forme tout ou partie d'un composant VCSEL, la deuxième couche 40 étant toujours le substrat support 40 de haute transparence optique à la longueur d'onde nominale de fonctionnement du composant optique et optionnellement de faible qualité cristalline. Dans cette variante, la première couche 10 comprend donc une pluralité de sous-couches.
- [0074] A l'étape a), le substrat donneur 11, comprend par exemple la couche active 2 et les deux miroirs de Bragg comme illustré sur la [Fig.5a], ou une partie de cet empilement. Tout ou partie du composant VCSEL est ainsi transféré en tant que première couche 10 à l'issue de l'étape f) ([Fig.5f]).
- [0075] Dans le premier mode de réalisation et sa variante, le fait que la couche intermédiaire 50 présente un coefficient d'atténuation très faible (proche de 0) et un indice de réfraction proche de celui de la première couche 10 (ou de celui d'une sous-couche de la première couche 10, adjacente à la couche intermédiaire 50) et de celui du substrat support 40, autorise une émission du signal laser du composant VCSEL par la face arrière 150b de la structure semi-conductrice 150, sans perturbation et atténuation du signal du fait de la traversée de la couche intermédiaire 50 et du substrat support 40.
- [0076] Bien sûr, la structure semi-conductrice 150 selon ce premier mode de réalisation est également adaptée à d'autres types de composants optoélectroniques, transmettant ou recevant un signal optique, tant par la face avant 150a que par la face arrière 150b.
- [0077] Selon un **deuxième mode de réalisation de l'invention**, la structure semi-conductrice 150 est également destinée à accueillir un composant de type VCSEL. Mais cette fois, la première couche 10 forme une région active 2 d'un VCSEL, et la deuxième couche 40 forme un miroir de Bragg 3a en multicouches ([Fig.6a]).

- [0078] Typiquement, le matériau semi-conducteur de la première couche 10 comprend au moins une couche de phosphure d'indium (InP), présentant une densité de défauts de type dislocations inférieure à 5000/cm². L'épaisseur de la première couche 10 est comprise entre 10 et 1500 nm. Pour une longueur d'onde du signal lumineux de l'ordre de 1,55 micron, la première couche 10 présente un indice de réfraction égal à 3,1.
- [0079] La deuxième couche 40 comprend de l'arséniure de gallium et est formée d'une pluralité de sous-couches empilées présentant des dopages et des compositions (se référer notamment à l'article de A.Syrbu cité en introduction) définis pour former un miroir de Bragg pour un signal lumineux de longueur d'onde 1,55 micron. Les sous-couches sont par exemple formées à partir de GaAs (indice de réfraction optique de l'ordre de 3,37 à la longueur d'onde considérée), d'arséniure d'aluminium (AlAs) (indice de réfraction de l'ordre de 2,89) et de composés ternaires GaAlAs. L'épaisseur de la deuxième couche 40 est comprise entre 1 et 6 µm.
- [0080] Le matériau de la couche intermédiaire 50 est le phosphure de zinc germanium (ZnGeP₂) ou le carbure de bore (B₄C) ou l'arséniure de zinc silicium (ZnSiAs₂). Pour une longueur d'onde du signal lumineux de l'ordre de 1,55 micron, une couche intermédiaire 50 en ZnGeP₂, en B₄C ou en ZnSiAs₂ présente respectivement un indice de réfraction égal à 3,17, 3,25 ou 3,26 et un coefficient d'atténuation inférieur à 10.
- [0081] L'épaisseur de la couche intermédiaire 50 peut varier entre 1 nm et 100 nm.
- [0082] On choisit de positionner au plus proche de la première couche 10, c'est-à-dire adjacente à la couche intermédiaire 50, une sous-couche de la deuxième couche 40 qui présente l'indice de réfraction le plus proche de la première couche 10 (c'est-à-dire avec une différence d'indice de réfraction inférieur à 0,3).
- [0083] Dans le deuxième mode de réalisation, la structure semi-conductrice 150 comprend avantageusement un substrat support 41 disposé sous la deuxième couche 40 ([Fig.6b]). Le substrat support 41 ne nécessite pas une haute qualité cristalline en ce qu'il joue essentiellement un rôle de support mécanique. Il peut être formé en InP ou en GaAs. Son épaisseur est par exemple comprise entre 250 à 1000 microns suivant son diamètre. Dans le cas où le substrat support 41 doit être traversé par le signal lumineux, par exemple pour une émission par la face arrière 150b du composant VCSEL, le substrat support 41 est choisi avec un coefficient d'extinction optique k (ou coefficient d'atténuation) le plus faible possible et idéalement égal à 0, afin de limiter l'absorption du signal lumineux et par conséquent de favoriser l'efficacité du composant VCSEL.
- [0084] Une deuxième couche intermédiaire 52, de même nature que la couche intermédiaire 50, peut être intercalée entre le substrat support 41 et la deuxième couche 40 ; cette option est notamment avantageuse dans le cas où le signal lumineux doit traverser le substrat support 41, pour limiter les perturbations et atténuation du signal. Une

deuxième interface de collage 51' est située dans la deuxième couche intermédiaire 52, ou est adjacente à cette dernière.

- [0085] Une structure semi-conductrice 150 selon ce deuxième mode de réalisation peut être élaborée à partir d'un procédé de transfert de couches par collage et amincissement connu de l'état de la technique, en particulier le procédé Smart Cut™ détaillé en référence au premier mode de réalisation.
- [0086] Des étapes similaires à celles précédemment évoquées sont mises en œuvre, et potentiellement répétées dans le cas d'une deuxième interface de collage 51'.
- [0087] Dans ce deuxième mode de réalisation, les étapes g) d'épitaxies successives destinées à élaborer le (ou les) composant(s) de type VCSEL, consistent en la formation du deuxième miroir de Bragg 3b sur la première couche 10 (laquelle consiste en la région active 2 du VCSEL). Alternativement, les étapes d'épitaxie sont remplacées par le transfert d'une couche formant le deuxième miroir de Bragg 3b, par l'intermédiaire d'une troisième couche intermédiaire 53, de même nature que la couche intermédiaire 50 ([Fig.6c]). Une troisième interface de collage 51'' est située dans la troisième couche intermédiaire 53, ou est adjacente à cette dernière.
- [0088] La structure semi-conductrice 150 selon le deuxième mode de réalisation permet de fabriquer un composant VCSEL émettant à une longueur d'onde autour de 1,55 micron, en simplifiant la fabrication des miroirs de Bragg 3a,3b, qui nécessitent habituellement un très grand nombre de couches successives épitaxiées en InP. Le transfert d'un miroir de Bragg en GaAs (nécessitant un plus faible empilement de couches) sur une région active en InP, par l'intermédiaire d'une couche intermédiaire 50 présentant un faible coefficient d'atténuation et une différence d'indice de réfraction inférieure à 0,3 avec l'indice de la région active 2 (première couche 10) permet l'élaboration d'un composant VCSEL efficace.
- [0089] Plus généralement, la structure semi-conductrice 150 selon ce deuxième mode de réalisation est compatible avec un composant VCSEL à émission par la face avant 150a ou par la face arrière 150b, du fait de la mise en œuvre d'une deuxième 52, voire d'une troisième 53 couche intermédiaire présentant une différence d'indice de réfraction inférieure à 0,3 avec celui de la première couche 10 (ou région active 2), et présentant un faible coefficient d'atténuation.
- [0090] Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits et on peut y apporter des variantes de réalisation sans sortir du cadre de l'invention tel que défini par les revendications.
- [0091] En particulier, la structure semi-conductrice 150 selon l'invention peut être adaptée à d'autres applications optoélectroniques telles que des photodétecteurs par exemple.

Revendications

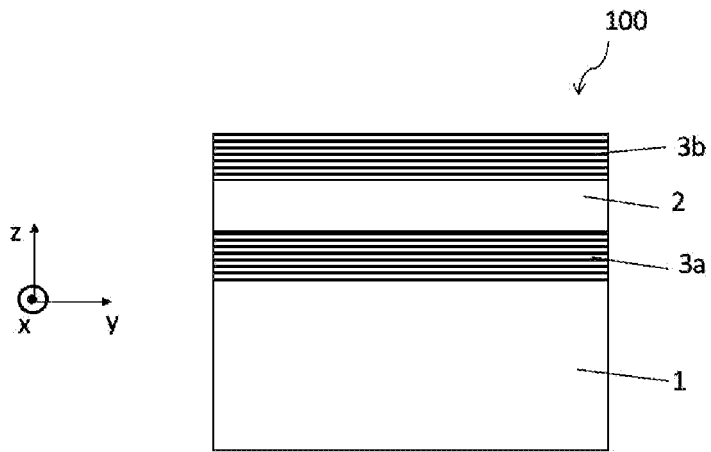
- [Revendication 1] Structure semi-conductrice (150) pour applications optoélectroniques comprenant :
- une première couche (10) en un matériau semi-conducteur cristallin, disposée sur
 - une couche intermédiaire (50) incluant ou adjacente à une interface de collage direct, la couche intermédiaire étant disposée sur
 - une deuxième couche (40) en un matériau semi-conducteur cristallin, la structure semi-conductrice (150) étant caractérisée en ce que la couche intermédiaire (50) est composée d'un matériau différent de ceux des première (10) et deuxième (40) couches, et en ce que ladite couche intermédiaire (50) présente un coefficient d'atténuation inférieur à 100 et un indice de réfraction s'écartant de moins de 0,3 de l'indice de réfraction :
 - d'au moins une sous-couche de la première couche (10), adjacente à la couche intermédiaire (50), et
 - d'au moins une sous-couche de la deuxième couche (40), adjacente à la couche intermédiaire (50).
- [Revendication 2] Structure semi-conductrice (150) selon la revendication précédente, dans laquelle le matériau de la couche intermédiaire (50) est amorphe.
- [Revendication 3] Structure semi-conductrice (150) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle le matériau de la première couche (10) est un monocristal de haute qualité cristalline pour former un germe pour épitaxie.
- [Revendication 4] Structure semi-conductrice (150) selon l'une des revendications 1 et 2, dans laquelle la première couche (10) forme tout ou partie d'une diode laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL).
- [Revendication 5] Structure semi-conductrice (150) selon l'une des deux revendications précédentes, dans lequel la deuxième couche (40) est un substrat support présentant une transparence optique supérieure à 30%.
- [Revendication 6] Structure semi-conductrice (150) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle le matériau semi-conducteur de la première couche (10) est l'arséniure de gallium, le matériau semi-conducteur de la deuxième couche (40) est l'arséniure de gallium, et le matériau de la couche intermédiaire (50) est le silicium.
- [Revendication 7] Structure semi-conductrice (150) selon l'une des revendications 1 et 2, dans laquelle la première couche (10) est une région active d'une diode

laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL), et la deuxième couche (40) est un miroir de Bragg en multicouches de ladite diode laser.

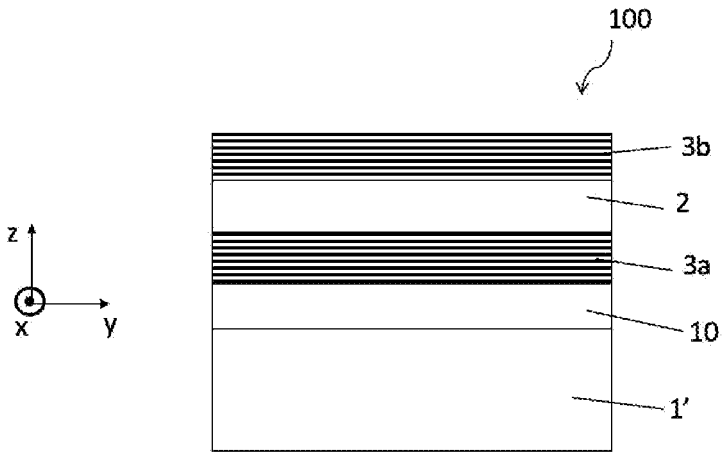
[Revendication 8] Structure semi-conductrice (150) selon la revendication précédente, dans laquelle le matériau semi-conducteur de la première couche (10) est le phosphure d'indium, le matériau semi-conducteur d'au moins une sous-couche de la deuxième couche (40) adjacente à la couche intermédiaire (50) est l'arséniure de gallium, et le matériau de la couche intermédiaire (50) est le phosphure de zinc germanium ou le carbure de bore ou l'arséniure de zinc silicium.

[Revendication 9] Structure semi-conductrice (150) selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle le coefficient d'atténuation de la couche intermédiaire (50) est inférieur à 1.

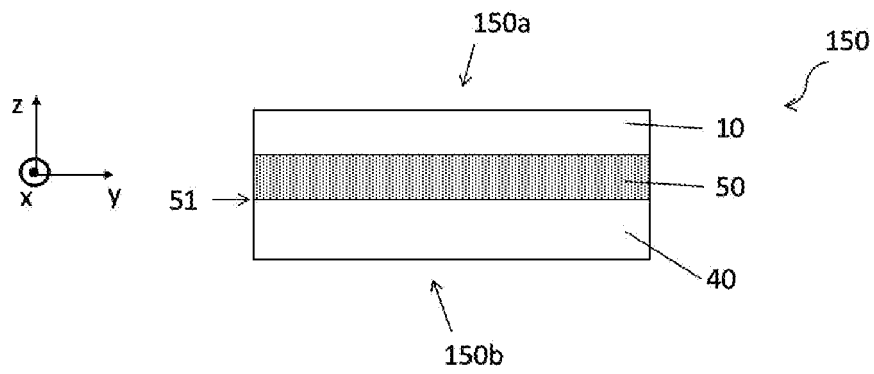
[Fig. 1a]



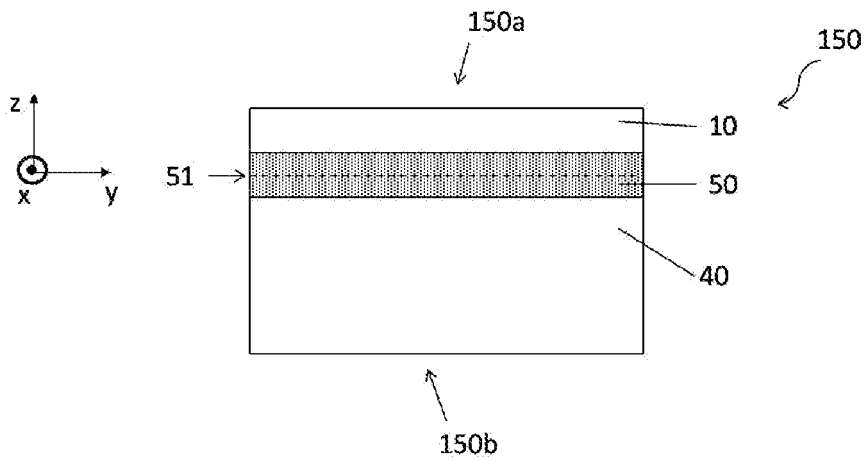
[Fig. 1b]



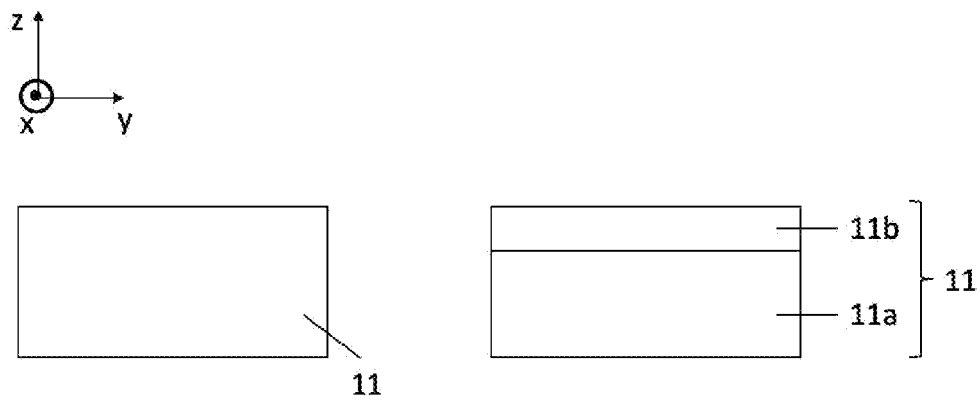
[Fig. 2]



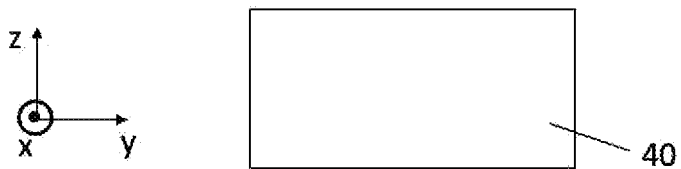
[Fig. 3]



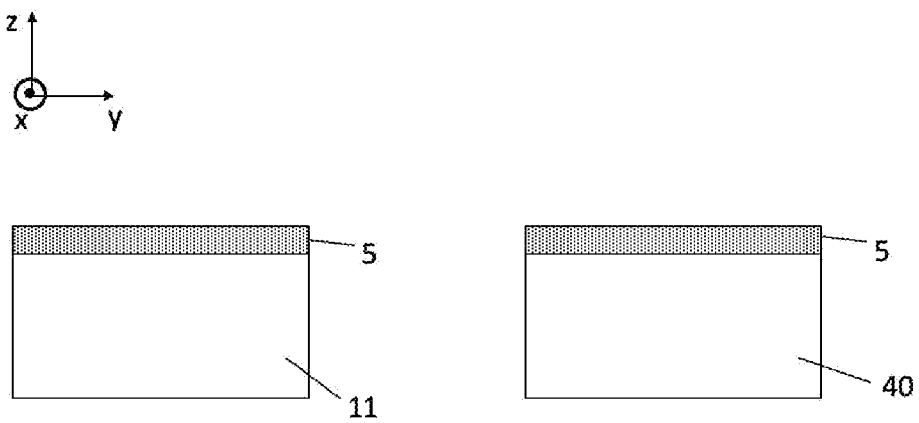
[Fig. 4a]



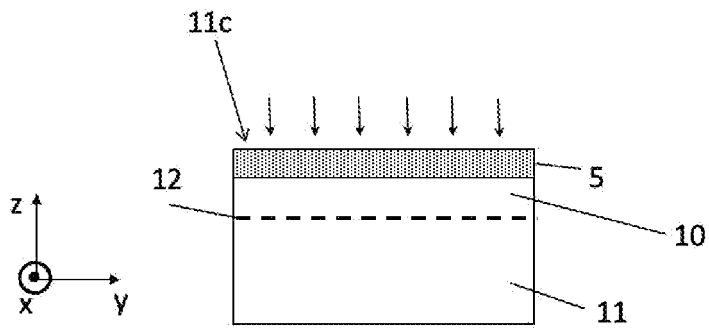
[Fig. 4b]



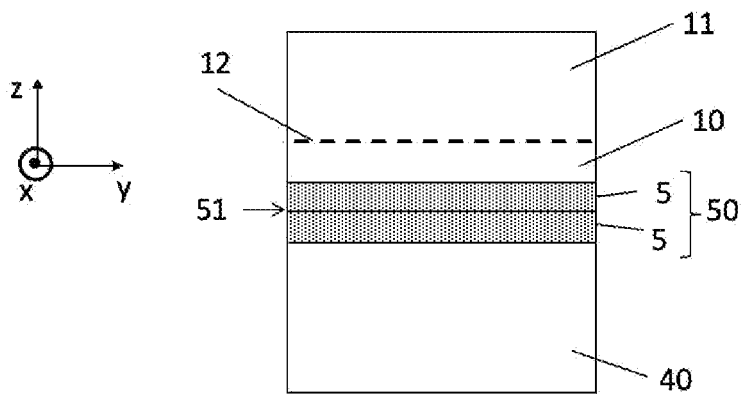
[Fig. 4c]



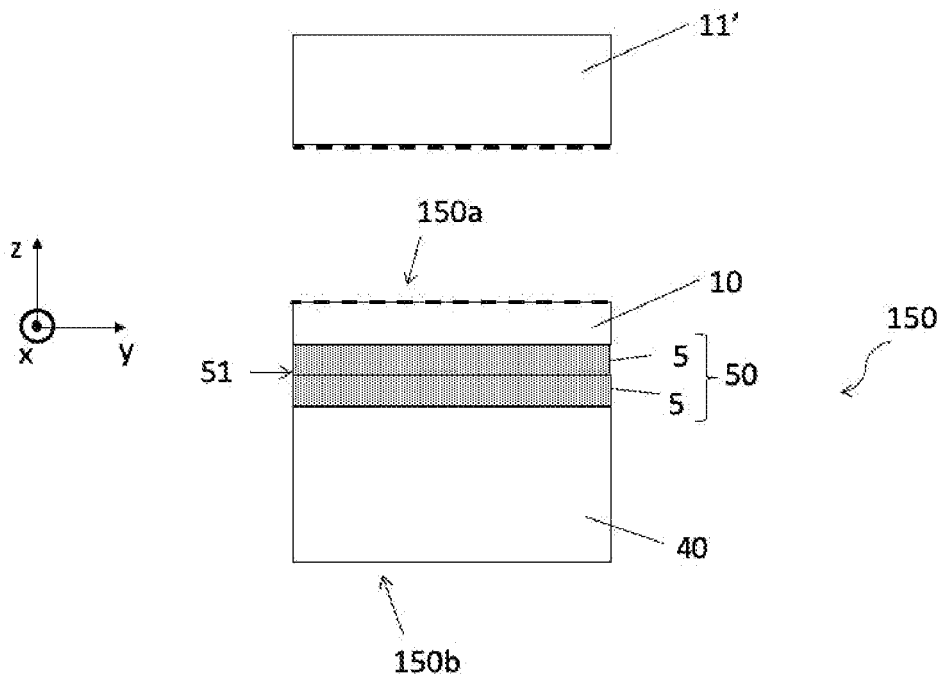
[Fig. 4d]



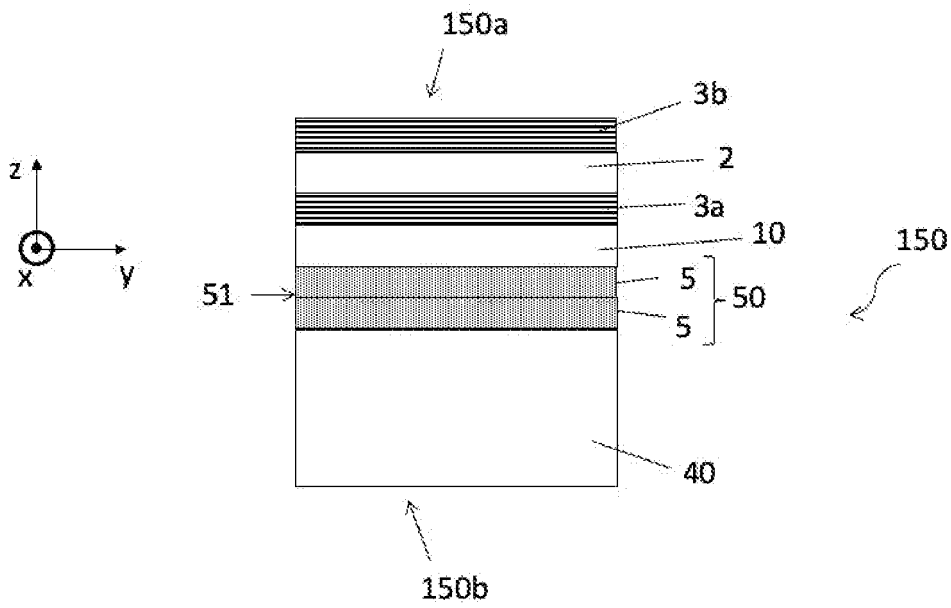
[Fig. 4e]



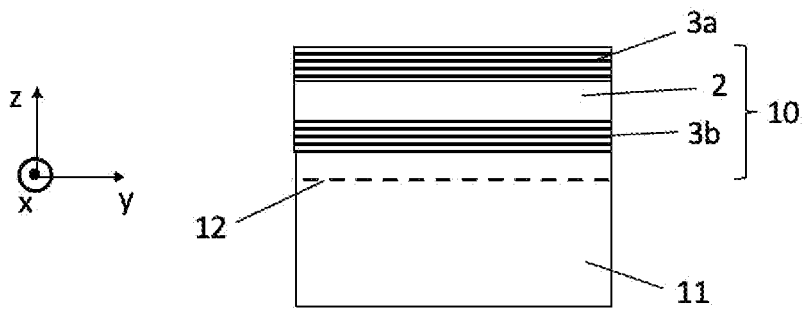
[Fig. 4f]



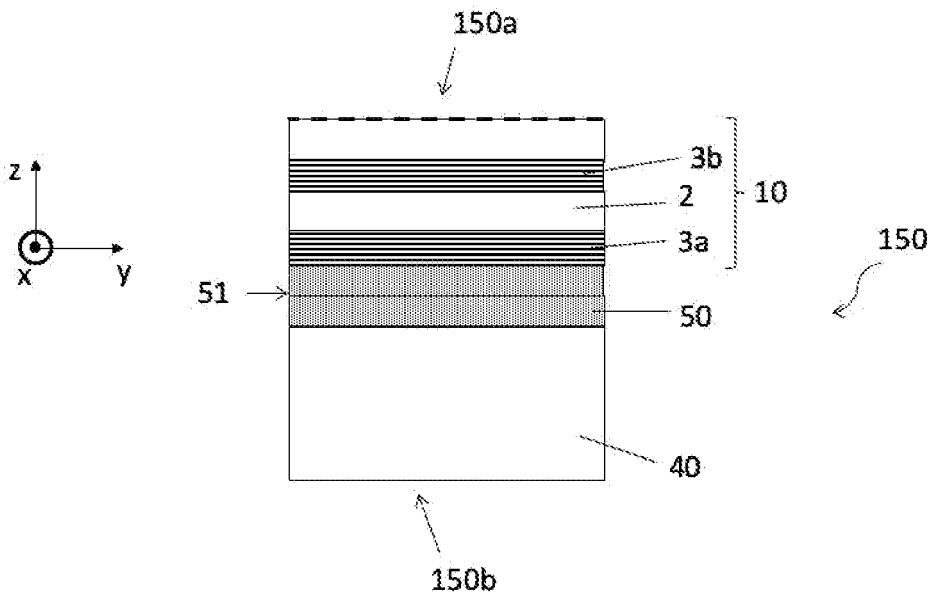
[Fig. 4g]



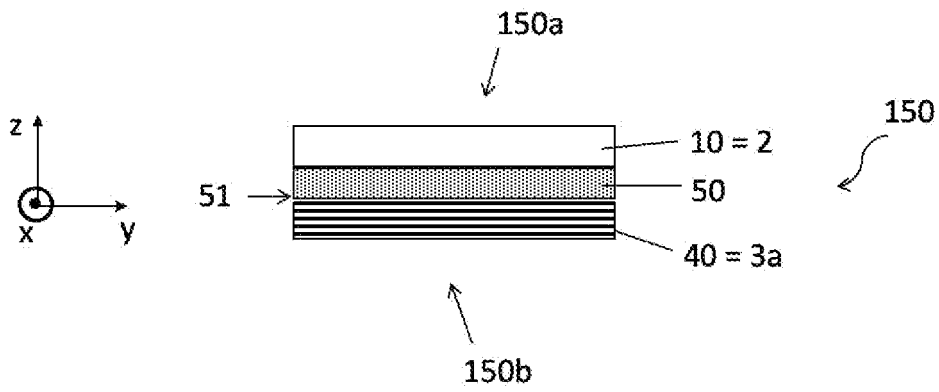
[Fig. 5a]



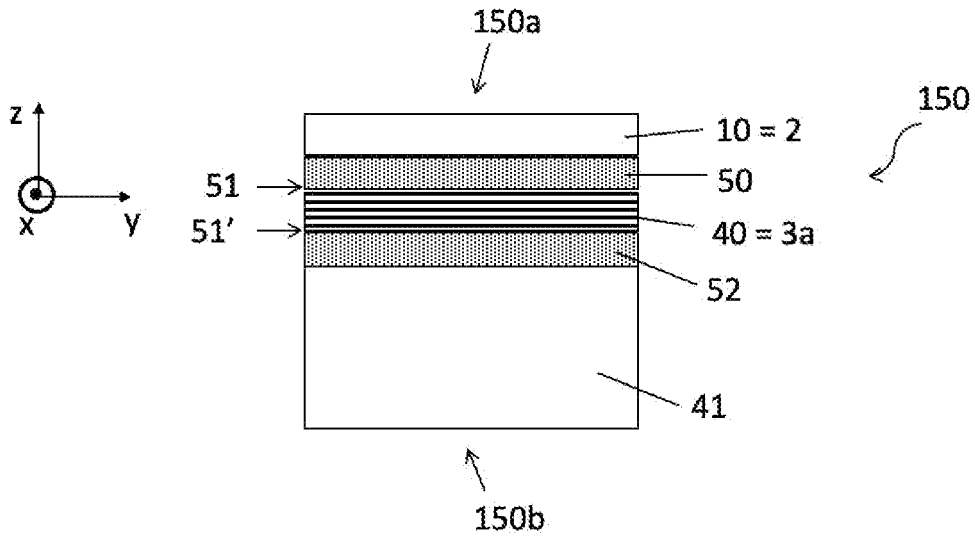
[Fig. 5f]



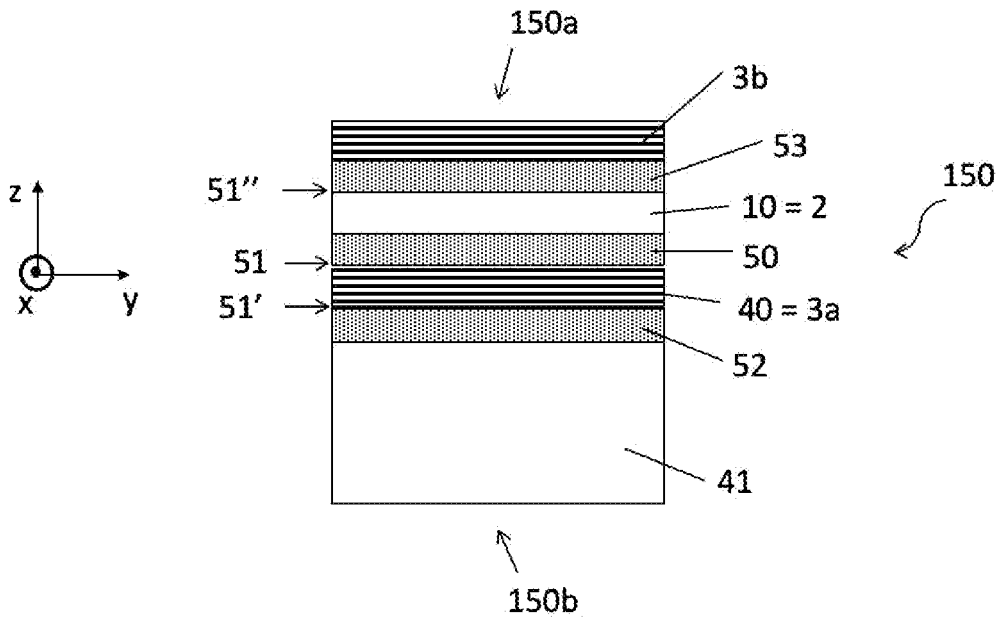
[Fig. 6a]



[Fig. 6b]



[Fig. 6c]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 899145
FR 2109949

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 2003/213950 A1 (HWANG WEN-YEN [US]) 20 novembre 2003 (2003-11-20)	1-5, 9	H01S5/343
A	* alinéas [0030] - [0032], [0038], [0071], [0053]; figures 2,3d * -----	6	
X	US 2002/074546 A1 (SEKINE NORIHIKO [JP]) 20 juin 2002 (2002-06-20)	1-5, 7, 9	
A	* alinéas [0030], [0034], [0053]; figure 1A * -----	8	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H01S
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
22 mars 2022		Lendroit, Stéphane	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2109949 FA 899145**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **22-03-2022**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2003213950 A1	20-11-2003	US 6746777 B1	08-06-2004
		US 2003213950 A1	20-11-2003

US 2002074546 A1	20-06-2002	JP 2002185080 A	28-06-2002
		US 2002074546 A1	20-06-2002
