

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

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

3 148 651

②1 N° d'enregistrement national : 23 04614

⑤1 Int Cl⁸ : G 02 F 1/025 (2023.01), H 01 L 33/12, 31/036

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 10.05.23.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 15.11.24 Bulletin 24/46.

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) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public — FR et UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES Etablissement public — FR.

⑦2 Inventeur(s) : Pauc Nicolas et Chrétien Jérémie.

⑦3 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public, UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES Etablissement public.

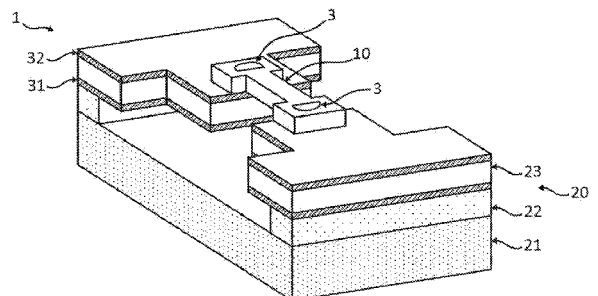
⑦4 Mandataire(s) : BREVALEX.

⑤4 DISPOSITIF OPTOELECTRONIQUE DE DEFORMATION A LA DEMANDE D'UNE PORTION CRISTALLINE SEMICONDUCTRICE COUPLEE OPTIQUEMENT A UN GUIDE D'ONDE.

⑤7 L'invention porte sur un dispositif optoélectronique (1) de déformation à la demande d'une portion cristalline semiconductrice (10), comportant :

une structure de déformation (20), comportant : une couche mince structurée (23) ayant deux bras (23.1) suspendus au-dessus d'une cavité ; la portion cristalline semiconductrice (10), reposant sur les deux bras (23.1) ; un guide d'onde (2), couplé optiquement à la portion cristalline semiconductrice (10) ; un dispositif électrique de déformation, adapté à déformer la portion cristalline semiconductrice (10), comportant : une source électrique, adaptée à générer un signal électrique de commande ; et un circuit électrique (31, 32, 33, 34 ; 35, 36), adapté à générer dans les bras (23.1), en réponse au signal électrique de commande, un champ électrique ou un champ de température, induisant une déformation des bras (23.1) et donc de la portion cristalline semiconductrice (10).

Figure pour l'abrégié : Fig. 1C



FR 3 148 651 - A1



Description

Titre de l'invention : DISPOSITIF OPTOELECTRONIQUE DE DEFORMATION A LA DEMANDE D'UNE PORTION CRISTALLINE SEMICONDUCTRICE COUPLEE OPTIQUEMENT A UN GUIDE D'ONDE

Domaine technique

[0001] Le domaine de l'invention est celui des dispositifs optoélectroniques, tels que les diodes émissives, les photodiodes et les modulateurs optiques, comportant une portion cristalline semiconductrice pouvant être mise en contrainte à la demande, de manière contrôlée et réversible, par des bras suspendus. L'invention trouve une application dans les circuits photoniques intégrés, en particulier dans le cadre de la technologie dite photonique sur silicium.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

[0002] Dans diverses applications optoélectroniques, il peut être avantageux d'utiliser une portion cristalline semiconductrice présentant une contrainte mécanique souhaitée, par exemple en tension. C'est le cas notamment de certaines sources de lumière dont la zone active (amplification optique ou jonction semiconductrice) présente, hors contraintes mécaniques, une structure de bandes d'énergie indirecte, celle-ci étant alors rendue directe par l'application d'une contrainte mécanique en tension suffisante. La portion cristalline semiconductrice peut être un matériau cristallin à base de germanium, comme par exemple du germanium étain $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$.

[0003] A ce titre, le document EP3745473A1 décrit un dispositif optoélectronique, par exemple une diode laser, comportant une portion cristalline semiconductrice, couplée optiquement à un guide d'onde, et mise en contrainte par une structure de déformation suivant un axe principal. La structure de déformation est formée d'un substrat support, d'une couche mince intercalaire, et d'une couche mince semiconductrice. La couche mince intercalaire est gravée localement pour former une cavité, et la couche mince semiconductrice est structurée pour former deux bras suspendus au-dessus de la cavité et reliés entre eux par une partie centrale. Celle-ci est une zone optiquement active, et forme ici le milieu à gain de la diode laser. Elle est située dans une cavité optique délimitée par deux miroirs de Bragg réalisés dans la couche mince structurée.

[0004] Dans cet exemple, la partie centrale est mise en tension par les bras tenseurs suivant l'axe longitudinal de ces derniers. Comme l'explique notamment l'article de Süess et al. intitulé *Analysis of enhanced light emission from highly strained germanium microbridges*, Nature Photon. **7**, 466-472 (2013), du fait de la forme des bras dans le plan

principal (parallèle au substrat support), la suspension des bras tenseurs au-dessus du substrat support conduit à une augmentation de la tension résiduelle de la partie centrale de la couche mince structurée. Ainsi, lorsque celle-ci est réalisée à base de germanium, la partie centrale peut alors présenter une tension mécanique suffisante suivant l'axe principal pour rendre directe sa structure de bandes.

[0005] Ainsi, la valeur finale de la tension mécanique subie par la partie centrale reste constante et ne peut être ensuite ajustée. Elle dépend essentiellement des dimensions des bras tenseurs et en particulier du rapport d'aspect 'longueur sur largeur' de ces derniers. Il n'est donc pas possible de contrôler à la demande la valeur des contraintes mécaniques subies par la partie centrale, ce qui permettrait d'optimiser les performances du dispositif optoélectronique, que ce soit en cours de fonctionnement du dispositif, ou que ce soit pour tenir compte du type du dispositif optoélectronique (diode émissive, photodiode...).

Exposé de l'invention

[0006] L'invention a pour objectif de remédier au moins en partie aux inconvénients de l'art antérieur, et plus particulièrement de proposer un dispositif optoélectronique adapté à déformer, à la demande, de manière contrôlée et réversible, une portion cristalline semiconductrice couplée optiquement à un guide d'onde.

[0007] Pour cela, l'objet de l'invention est un dispositif optoélectronique :

- une structure de déformation d'une portion cristalline semiconductrice, comportant un empilement de : un substrat support ; puis une couche mince intercalaire délimitant une cavité dans un plan parallèle à celui du substrat support ; puis une couche mince structurée, reposant sur la couche mince intercalaire, comportant au moins deux bras suspendus au-dessus de la cavité, s'étendant longitudinalement suivant un même axe principal ;
- la portion cristalline semiconductrice, reposant sur les deux bras, et s'étendant longitudinalement suivant l'axe principal ;
- un guide d'onde, couplé optiquement à la portion cristalline semiconductrice.

[0008] Selon l'invention, le dispositif optoélectronique comporte un dispositif électrique de déformation, adapté à déformer à la demande la portion cristalline semiconductrice suivant l'axe principal, comportant : une source électrique, adaptée à générer un signal électrique de commande ; et un circuit électrique, connecté à la source électrique, et adapté à générer dans les bras, en réponse au signal électrique de commande, un champ électrique ou un champ de température, induisant une déformation, suivant l'axe principal, des bras et donc de la portion cristalline semiconductrice.

[0009] Certains aspects préférés mais non limitatifs de ce dispositif optoélectronique sont les suivants.

- [0010] La portion cristalline semiconductrice peut présenter une partie centrale située entre deux parties d'extrémité qui reposent sur les bras, la partie centrale présentant une largeur moyenne inférieure à celle des parties d'extrémité.
- [0011] La portion cristalline semiconductrice peut présenter une partie centrale située entre deux parties d'extrémité qui reposent sur les bras, la partie centrale présentant une largeur moyenne inférieure à celle des bras.
- [0012] Le substrat support peut être réalisé à base de silicium, et la portion cristalline semiconductrice peut être réalisée à base de germanium.
- [0013] La couche mince structurée peut être réalisée en un matériau piézoélectrique. Le circuit électrique peut alors comporter deux électrodes inférieure et supérieure, en forme de couches minces, situées de part et d'autre des bras suivant un axe d'épaisseur de la couche mince structurée, et connectées à la source électrique pour générer, en réponse au signal électrique de commande, un champ électrique dans les bras induisant une déformation de ces derniers par effet piézoélectrique inverse.
- [0014] Le dispositif optoélectronique peut comporter une couche mince de protection réalisée en un matériau inerte à un acide fluorhydrique, recouvrant une surface libre des bras.
- [0015] Le dispositif optoélectronique peut comporter deux couches minces de collage, réalisées à base d'un matériau métallique, en contact l'une de l'autre, et situées entre la portion cristalline semiconductrice et les bras.
- [0016] Le circuit électrique peut comporter des pistes métalliques, reposant sur et au contact thermique des bras, et connectées à la source électrique pour générer, en réponse au signal électrique de commande, un champ de température dans les bras induisant une déformation de ces derniers par dilatation thermique.
- [0017] Le guide d'onde peut reposer sur les bras, et être réalisé en le même matériau que celui de la portion cristalline semiconductrice et être en continuité physique avec celle-ci. En variante, le guide d'onde peut être intégré dans le substrat support.
- [0018] L'invention porte également sur un procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique selon l'une quelconque des caractéristiques précédentes, comportant les étapes suivantes :
- réalisation d'un premier empilement comportant la couche mince structurée recouverte par une première couche mince de collage ;
 - réalisation d'un deuxième empilement comportant une couche mince cristalline semiconductrice destinée à former la portion cristalline semiconductrice et recouverte par une deuxième couche mince de collage ;
 - report et collage du deuxième empilement sur le premier empilement, par mise en contact des première et deuxième couches minces de collage.
- [0019] Le procédé peut comporter les étapes suivantes :

- préalablement à l'étape de report, structuration d'une couche mince de déformation du premier empilement pour former la couche mince structurée et les bras ;
- dépôt d'une couche mince de protection, réalisée en un matériau inerte à un agent de gravure utilisé lors d'une étape ultérieure de suspension des bras, de manière à recouvrir une surface libre des bras.

[0020] Le procédé peut comporter l'étape suivante : réalisation d'un empilement formé du substrat support, puis de la couche mince intercalaire, puis d'une couche mince de déformation destinée à former la couche mince structurée, puis d'une couche mince semiconductrice destinée à former la portion cristalline semiconductrice, la couche mince semiconductrice étant réalisée par épitaxie à partir de la couche mince de déformation.

[0021] Le procédé peut comporter les étapes suivantes :

- réalisation d'un empilement formé du substrat support, puis de la couche mince intercalaire, puis de la couche mince structurée, puis de la portion cristalline semiconductrice ;
- gravure chimique d'une partie de la couche mince intercalaire située sous les bras, de manière à réaliser une cavité au-dessus de laquelle les bras sont suspendus.

Brève description des dessins

[0022] D'autres aspects, buts, avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée suivante de formes de réalisation préférées de celle-ci, donnée à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :

[0023] les figures 1A, 1B et 1C sont des vues schématiques et partielles, respectivement en coupe longitudinale, en vue de dessus et en perspective, d'un dispositif optoélectronique selon un premier mode de réalisation où l'actionneur électromécanique est de type piézoélectrique ;

[0024] les figures 2A, 2B et 2C sont des vues schématiques et partielles, respectivement en coupe longitudinale, en vue de dessus et en perspective, d'un dispositif optoélectronique selon un deuxième mode de réalisation où l'actionneur électromécanique est de type thermique ;

[0025] les figures 3A à 3G illustrent des différentes étapes d'un procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique similaire à celui illustré sur les [Fig.1A] à 1C ;

[0026] les figures 4A à 4F illustrent des différentes étapes d'un procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique similaire à celui illustré sur les [Fig.2A] à 2C ;

[0027] **EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS**

- [0028] Sur les figures et dans la suite de la description, les mêmes références représentent les éléments identiques ou similaires. De plus, les différents éléments ne sont pas représentés à l'échelle de manière à privilégier la clarté des figures. Par ailleurs, les différents modes de réalisation et variantes ne sont pas exclusifs les uns des autres et peuvent être combinés entre eux. Sauf indication contraire, les termes « sensiblement », « environ », « de l'ordre de » signifient à 10% près, et de préférence à 5% près. Par ailleurs, les termes « compris entre ... et ... » et équivalents signifient que les bornes sont incluses, sauf mention contraire.
- [0029] L'invention porte sur un dispositif optoélectronique adapté à déformer à la demande, de manière contrôlée et réversible, une portion cristalline semiconductrice, celle-ci étant couplée optiquement à un guide d'onde pour recevoir ou lui transmettre un mode optique. Un tel dispositif optoélectronique peut être une source lumineuse (diode laser ou diode électroluminescente), un photodétecteur, voire un modulateur optique. En fonction des applications, le guide d'onde peut appartenir ou être couplé à un circuit photonique intégré, ou peut être couplé à une fibre optique externe.
- [0030] D'une manière générale, le dispositif optoélectronique comporte un dispositif électrique de déformation adapté à déformer, de manière contrôlée et réversible, des bras suspendus d'une structure de déformation sur lesquels repose la portion cristalline semiconductrice. Le dispositif électrique de déformation et la structure de déformation forment ensemble un actionneur électromécanique.
- [0031] La structure de déformation comporte une couche mince structurée ayant deux bras suspendus au-dessus d'un substrat support, qui s'étendent longitudinalement suivant un axe principal. La portion cristalline semiconductrice repose sur les deux bras de sorte que la déformation des bras suivant l'axe principal entraîne celle de la portion cristalline semiconductrice suivant le même axe.
- [0032] Le dispositif électrique de déformation comporte : une source électrique adaptée à générer un signal électrique de commande ; et un circuit électrique, connecté à la source électrique, et adapté à générer, en réponse au signal électrique de commande, un champ électrique ou un champ de température dans les bras, lequel provoque la déformation des bras suivant l'axe principal, et donc de la portion cristalline semiconductrice suivant le même axe.
- [0033] La portion cristalline semiconductrice passe alors, de manière contrôlée et réversible, d'un premier état au repos de contraintes mécaniques, en l'absence du signal électrique de commande, où elle peut être relaxée ou peut présenter des contraintes résiduelles, à un deuxième état de contraintes mécaniques différent du premier état.
- [0034] Par portion contrainte, on entend que la portion cristalline semiconductrice subit des contraintes mécaniques en tension ou en compression, entraînant une déformation des mailles de son réseau cristallin. Ainsi, la portion est contrainte en tension lorsqu'elle

subit une contrainte mécanique qui tend à étirer les mailles du réseau suivant une direction donnée. Dans le cadre de l'invention, la portion cristalline semiconductrice est destinée à être plus ou moins contrainte en tension ou en compression, et de préférence en tension, suivant l'axe principal qui correspond à l'axe longitudinal des bras.

- [0035] Le matériau de la portion cristalline semiconductrice, lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques générées par l'actionneur électromécanique, présente donc des propriétés optiques et/ou électriques modifiées, par exemple en termes d'indice de réfraction à une longueur d'onde donnée et d'énergie de bande interdite. En particulier, dans le cas d'une portion cristalline semiconductrice réalisée à base de germanium subissant une tension mécanique, le matériau peut présenter une énergie de bande interdite diminuée, notamment celle associée à la vallée Γ (ou vallée directe). L'énergie de bande interdite peut être estimée en fonction de la déformation en tension, comme le décrit dans le cas d'une couche en germanium la publication de Guilloy et al. intitulée *Germanium under high tensile stress: Nonlinear dependence of direct band gap vs strain*, ACS Photonics 2016, 3, 1907-1911. La contrainte mécanique en tension subie par la portion cristalline semiconductrice peut être suffisante pour que la structure de bandes d'énergie devienne directe.
- [0036] Par structure de bandes directe ou sensiblement directe, on entend que le minimum d'énergie $E_{BC,L}$ de la bande de conduction de la vallée L (ou vallée indirecte) est supérieur ou sensiblement égal au minimum d'énergie $E_{BC,\Gamma}$ de la bande de conduction de la vallée Γ (ou vallée directe), autrement dit : $\Delta E = E_{BC,L} - E_{BC,\Gamma} \geq 0$. La portion cristalline semiconductrice peut être réalisée à base de germanium dont la structure de bandes d'énergie est indirecte à l'état relaxé, autrement dit $\Delta E < 0$, et devient directe lorsqu'elle subit une déformation en tension suffisante.
- [0037] Notons toutefois que la portion cristalline semiconductrice peut être réalisée en un matériau dont la structure de bandes n'est pas nécessairement rendue directe par la déformation générée par l'actionneur électromécanique. Ainsi, dans le cas d'un photodétecteur, la portion cristalline semiconductrice peut être réalisée en germanium dont la valeur de la bande d'énergie interdite varie en fonction de la déformation générée (peu importe que sa structure de bandes soit directe ou indirecte). Par ailleurs, dans le cas d'une source lumineux, la portion cristalline semiconductrice peut être réalisée en $Ge_{1-x}Sn_x$ avec x au moins égal à 6% pour que sa structure de bandes soit naturellement directe.
- [0038] Comme détaillé par la suite, dans un premier mode de réalisation illustré sur les [Fig.1A] à 1C, l'actionneur électromécanique est de type piézoélectrique, c'est-à-dire qu'il assure une déformation contrôlée des bras par un effet piézoélectrique inverse. Par ailleurs, dans un deuxième mode de réalisation illustré sur les [Fig.2A] à 2C,

l'actionneur électromécanique est de type thermique, c'est-à-dire que la déformation contrôlée des bras correspond à une dilatation thermique de ces derniers.

[0039] Les figures 1A et 1B sont des vues schématiques et partielle, en coupe transversale et en vue de dessus ([Fig.1B]), d'un dispositif optoélectronique 1 selon le premier mode de réalisation où la déformation des bras 23.1 est obtenue par un effet piézoélectrique inverse. La [Fig.1C] est une vue en perspective du dispositif optoélectronique 1 où certains éléments sont omis par souci de clarté.

[0040] Dans cet exemple, le dispositif optoélectronique 1 est adapté à émettre un rayonnement lumineux monochromatique cohérent (diode laser). Il comporte une cavité optique orientée suivant l'axe principal et délimitée par deux réflecteurs optiques 3, dans laquelle se trouve le milieu à gain formé par une partie centrale 11 de la portion cristalline semiconductrice 10. Cependant, le dispositif optoélectronique 1 peut être une diode électroluminescente, une photodiode, voire un modulateur optique.

[0041] On définit ici et pour la suite de la description un repère direct tridimensionnel XYZ, où le plan XY (plan principal) est parallèle au plan du substrat support 21, où l'axe X est orienté suivant l'axe longitudinal des bras 23.1 et de la portion cristalline semiconductrice 10 (axe principal), et où la direction +Z est orientée du substrat support 21 en direction de la portion cristalline semiconductrice 10. Par ailleurs, les termes « inférieur » et « supérieur » s'entendent comme étant relatifs à un positionnement croissant lorsqu'on s'éloigne du substrat support 21 suivant la direction +Z.

[0042] D'une manière générale, le dispositif optoélectronique 1 comporte : la portion cristalline semiconductrice 10 ; un guide d'onde 2 couplé optiquement à celle-ci ; et un actionneur électromécanique adapté à générer une déformation suivant l'axe principal, à la demande (de manière contrôlée et réversible) des bras 23.1, et donc de la portion cristalline semiconductrice 10, ici par effet piézoélectrique inverse.

[0043] L'actionneur électromécanique est formé : d'une structure de déformation 20 qui comporte des bras 23.1 de déformation sur lesquels repose la portion cristalline semiconductrice 10 ; et d'un dispositif électrique de déformation adapté à générer dans les bras 23.1, en réponse à un signal électrique de commande, un champ électrique induisant par effet piézoélectrique inverse une déformation mécanique de ces derniers, et donc une déformation de la portion cristalline semiconductrice 10 suivant l'axe principal.

[0044] La structure de déformation 20 est formée d'un empilement du substrat support 21, d'une couche mince intercalaire 22, et d'une couche mince structurée 23 réalisée en un matériau piézoélectrique, laquelle comporte deux bras 23.1 qui s'étendent longitudinalement suivant un même axe principal. La portion cristalline semiconductrice 10 repose sur ces deux bras 23.1 de sorte que la déformation des bras 23.1 (ici par effet piézoélectrique inverse) induit la déformation de la portion cristalline semiconductrice

10. Cet effet piézoélectrique inverse est le phénomène physique de déformation de la structure cristalline du matériau piézoélectrique, en dilatation ou en compression, en réponse à l'application d'un champ électrique le traversant. De manière connue, le champ T des contraintes dans le matériau piézoélectrique dépend du champ électrique E et du coefficient piézoélectrique e. Le tenseur de contrainte [T] peut ainsi s'écrire, en l'absence d'une force externe appliquée : $[T] = -[e][E]$.

[0045] Le substrat support 21 assure le support de la couche mince intercalaire 22, de la couche mince structurée 23 et de la portion cristalline semiconductrice 10. Il peut être réalisé à base de silicium, par exemple en silicium et/ou en un oxyde ou nitrure de silicium. Il peut toutefois être réalisé en un matériau choisi parmi le saphir, le borosilicate, le verre, le quartz ou tout autre matériau adapté. Il peut présenter une épaisseur de l'ordre de quelques microns à quelques centaines de microns. Par ailleurs, le substrat support 21 peut comporter des éléments optiques actifs ou passifs (modulateurs, multiplexeurs, réseaux de couplage...), notamment dans le cadre de la technologie dite photonique sur silicium.

[0046] La couche mince intercalaire 22 assure l'espacement des bras 23.1 de la couche mince structurée 23 vis-à-vis du substrat support 21, et délimite la cavité dans le plan XY. Elle est réalisée de préférence à base de silicium, par exemple en un oxyde ou nitrure de silicium, voire en alumine Al_2O_3 , entre autres. Elle repose sur le substrat support 21, et peut présenter une épaisseur de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres à quelques microns. Elle définit latéralement, dans le plan XY, une cavité au-dessus de laquelle sont suspendus les bras 23.1 de la couche mince structurée 23.

[0047] La couche mince structurée 23 repose sur la couche mince intercalaire 22. Elle est formée d'une partie de maintien 23.2, qui repose sur la couche mince intercalaire 22, et de bras 23.1 suspendus au-dessus de la cavité. Les bras 23.1 sont allongés suivant l'axe principal X, c'est-à-dire qu'ils présentent une largeur moyenne suivant l'axe Y inférieure à la longueur suivant l'axe Z. Ils s'étendent longitudinalement, de manière coaxiale, suivant l'axe principal X, de sorte que cet axe forme l'axe de déformation principale de la portion cristalline semiconductrice 10.

[0048] Les bras 23.1 présentent une longueur L_b et une largeur moyenne $\langle l_b \rangle$, laquelle est inférieure à la largeur de la cavité. La largeur est ici la dimension suivant l'axe transversal Y. Les bras 23.1 peuvent présenter une forme dans le plan XY sensiblement rectangulaire, avec éventuellement une diminution progressive ou brutale (comme illustré sur les [Fig.1B] et 1C) de la largeur locale en direction de la portion cristalline semiconductrice 10. Dans cet exemple, les bras 23.1 présentent une largeur locale l_b qui passe, à partir de la partie de maintien 23.2, une première valeur l_{b1} sensiblement constante, puis diminue brutalement à une deuxième valeur l_{b2} sensiblement constante. De préférence, pour induire efficacement une déformation de la portion

cristalline semiconductrice 10, la valeur moyenne $\langle lb \rangle$ de la largeur des bras 23.1 est supérieure à la valeur moyenne de la portion cristalline semiconductrice 10, et de préférence supérieure à la valeur moyenne $\langle lpc \rangle$ de la largeur de la partie centrale 11 de la portion cristalline semiconductrice 10 (là où se situe le milieu à gain).

- [0049] Notons que les bras 23.1 peuvent être physiquement distincts l'un de l'autre suivant l'axe principal X, comme illustré sur la [Fig.1A] (pas de continuité entre les bras 23.1 par le ou les matériaux dont ils sont formés) . En variante (non représentée), ils peuvent être raccordés l'un à l'autre par une partie centrale de la couche mince structurée 23, cette partie centrale s'étendant continument d'un bras à l'autre sous la portion cristalline semiconductrice 10 et présentant de préférence une largeur locale au plus égale à celle de la portion cristalline semiconductrice 10.
- [0050] Dans ce mode de réalisation où la déformation à la demande des bras 23.1 est obtenue par un effet piézoélectrique inverse, la couche mince structurée 23 est réalisée à base d'un matériau piézoélectrique, de préférence en plomb zirconate titanate $PbZrTiO_3$ (PZT), mais d'autres matériaux peuvent être utilisés, tels que le $BaTiO_3$, l'AlN, le ZnO, $LiNbO_3$, $Pb(NbO_3)_2$, $PbTiO_3$, $Pb(Mg_{0,33}Nb_{0,66})O_3$, $Pb(Sc_{0,5}Ta_{0,5})O_3$ ou tout autre matériau piézoélectrique adapté. Elle présente une épaisseur de l'ordre de quelques microns, par exemple comprise entre 0.5 et 2 μm . Il s'agit d'une couche mince déposée sur la couche mince intercalaire 22 par des techniques de dépôt de la microélectronique, par exemple par une méthode sol gel ou par pulvérisation. Elle se distingue donc des substrats piézoélectriques dont l'épaisseur est de plusieurs centaines de microns voire de plusieurs millimètres.
- [0051] La portion cristalline semiconductrice 10 est réalisée en au moins un matériau semi-conducteur cristallin, et de préférence monocristallin. Ce matériau peut être choisi notamment parmi les éléments de la colonne IV de la classification périodique, tels que le germanium Ge, le silicium Si, et parmi les composés formés de ces éléments, par exemple le GeSn, le SiGe et le SiGeSn. Il peut également être choisi parmi les composés III-V comportant des éléments des colonnes III et V de la classification périodique, comme par exemple l'InP et le GaInAs, voire parmi les composés II-VI, comme par exemple le CdHgTe.
- [0052] De préférence, la portion cristalline semiconductrice 10 est réalisée à base d'un matériau semiconducteur dont la structure de bandes, en l'absence d'une déformation en tension suffisante, est indirecte. La déformation en tension de la portion cristalline semiconductrice 10, induite par l'actionneur électromécanique, peut alors être suffisante pour rendre directe sa structure de bandes. La portion cristalline semiconductrice 10 est de préférence réalisée à base de germanium. Par « réalisée à base de germanium », on entend que la portion cristalline semiconductrice 10 est formée majoritairement en germanium ou en ses composés. Dans cet exemple, la portion cristalline

semiconductrice 10 est réalisée en GeSn.

- [0053] La portion cristalline semiconductrice 10 présente de préférence une forme allongée suivant l'axe principal X. Elle repose sur les bras 23.1, de sorte que la déformation des bras 23.1 suivant l'axe principal X entraîne celle de la portion cristalline semiconductrice 10 suivant le même axe. Elle comporte une partie centrale 11, qui forme ici le milieu à gain de la diode laser, et deux parties d'extrémité 12, lesquelles reposent sur les bras 23.1. Dans cet exemple où les bras 23.1 sont distincts l'un de l'autre (pas de continuité de matière), la partie centrale 11 est directement suspendue au-dessus du substrat support 21 sans reposer sur les bras 23.1, alors que les parties d'extrémité 12 reposent sur les bras 23.1. Pour améliorer la tenue mécanique de la portion cristalline semiconductrice 10 sur les bras 23.1 d'une part, et pour optimiser la déformation de celle-ci, la partie centrale 11 présente de préférence une largeur moyenne inférieure à celle des parties d'extrémité 12. Par ailleurs, la partie centrale 11 présente ici une longueur L_{pc} et une largeur l_{pc} ici sensiblement constante. De préférence, comme indiqué précédemment, de manière à optimiser la déformation induite par les bras 23.1 dans la portion cristalline semiconductrice 10, sa largeur moyenne $\langle l_{pc} \rangle$ est inférieure à la largeur moyenne $\langle l_b \rangle$ des bras 23.1. La portion cristalline semiconductrice 10 présente une épaisseur suivant l'axe Z pouvant être comprise entre quelques centaines de nanomètres et quelques microns, par exemple comprise entre 100 nm et 2 μm environ.
- [0054] Le dispositif optoélectronique 1 comporte un dispositif électrique de déformation, adapté à générer un champ électrique dans les bras 23.1 de la couche mince structurée 23, induisant une déformation des bras 23.1 (par effet piézoélectrique inverse), et donc de la portion cristalline semiconductrice 10, suivant l'axe principal X. Ce dispositif électrique de déformation comporte une source électrique (non représentée) et un circuit électrique adapté à générer le champ électrique.
- [0055] La source électrique est adaptée à générer un signal électrique de commande, par exemple une différence de potentiel électrique entre deux électrodes 31, 32, de manière à provoquer une déformation en compression ou en tension, par effet piézoélectrique inverse, de la couche mince structurée 23 suivant l'axe principal X.
- [0056] Le circuit électrique est connecté à la source électrique. Il comporte deux électrodes inférieure 31 et supérieure 32, qui se présentent sous la forme de couches minces conductrices situées de part et d'autre de la couche mince structurée 23 suivant l'axe vertical Z. Les électrodes 31, 32 sont réalisées en un matériau électriquement conducteur, par exemple en CrAu, Pt/TiO₂, entre autres, et présentent une épaisseur par exemple de l'ordre de 100 nm. Le circuit électrique peut comporter des plots de contact 33, 34, qui assurent la connexion des électrodes inférieure 31 et supérieure 32 à la source électrique. Les plots de contact 34 traversent ici la couche mince structurée

23 pour venir au contact des électrodes inférieures 31 (sans contacter l'électrode supérieure 32).

- [0057] Enfin, le dispositif optoélectronique 1 comporte un guide d'onde 2 couplé optiquement à la portion cristalline semiconductrice 10. Dans cet exemple où le dispositif optoélectronique 1 est une diode laser, le guide d'onde 2 est adapté à recevoir un rayonnement lumineux issu de la portion cristalline semiconductrice 10 (cf. flèche en pointillé sur la [Fig.1A]). Le guide d'onde 2 est ici une portion linéaire réalisée dans le même matériau que celui de la portion cristalline semiconductrice 10, et assurant une continuité physique avec celle-ci. Il peut présenter une largeur différente de celle de la portion cristalline semiconductrice 10. Notons qu'une couche diélectrique d'isolation optique (non représentée) peut être située entre le guide d'onde 2 et l'électrode supérieure 32 pour limiter les pertes optiques et ainsi améliorer les performances du guide d'onde 2.
- [0058] En variante, comme l'illustre la [Fig.2A], le guide d'onde 2 peut être un guide d'onde intégré situé dans le substrat support 21. Le couplage optique est alors un couplage évanescent, où le mode optique issu de la portion cristalline semiconductrice 10 est couplé tout d'abord à la couche mince structurée 23 sous-jacente puis au guide d'onde intégré 2. Ce type de couplage est similaire à celui décrit dans le document EP3462555A1.
- [0059] Le guide d'onde 2 peut appartenir ou être couplé optiquement à un circuit photonique du dispositif optoélectronique 1, situé par exemple au moins en partie dans le substrat support 21. Le circuit photonique peut comporter des éléments optiques actifs et/ou passifs. En variante ou en complément, le guide d'onde 2 peut être couplé optiquement à une fibre optique externe par le biais d'un réseau de diffraction.
- [0060] Dans cet exemple où le dispositif optoélectronique 1 est une diode laser, deux réflecteurs optiques 3 sont réalisés ici dans la portion cristalline semiconductrice 10, dans des parties d'extrémité 12 situées de part et d'autre de sa partie centrale 11 où se situe le milieu à gain. Les réflecteurs optiques 3 délimitent ainsi la cavité optique suivant l'axe principal X. Aussi, l'un des réflecteurs optiques 3 présente une réflectivité sensiblement égale à 100%, alors que l'autre réflecteur optique 3 (ici situé entre la partie centrale 11 et le guide d'onde 2) présente une réflectivité inférieure à 100%, de manière à autoriser l'émission directive d'un mode optique à la longueur d'onde de la cavité optique (Fabry-Pérot). Dans cet exemple, les réflecteurs optiques 3 sont des structures en coin de cube, comme décrit dans l'article de Zabel et al. intitulé *Top-down method to introduce ultra-high elastic strain*, J. Mater. Res., 2017, 32 (4), 726-736. En variante, ils peuvent être des miroirs de Bragg réalisés par gravure localisée partielle ou totale, suivant l'épaisseur, de la portion cristalline semiconductrice 10, comme décrit par exemple dans le document EP3745473A1 cité pré-

cédemment. Notons par ailleurs qu'il est avantageux que les réflecteurs optiques 3 soient situés dans une partie suspendue de la portion cristalline semiconductrice 10 (c'est-à-dire qui ne soient pas à la perpendiculaire des bras 23.1), de manière à améliorer le confinement du mode dans la cavité optique.

- [0061] Notons que la structure de déformation 20 peut comporter des couches minces supplémentaires. Ainsi, une couche mince de protection 41 s'étend de manière à recouvrir une surface libre des bras 23.1, et s'étend ici sur la face supérieure et des flancs des bras 23.1. Elle s'étend ici sur l'électrode supérieure 32 (mais elle peut être située entre la face supérieure de chaque bras 23.1 et l'électrode supérieure 32). Elle est réalisée en un matériau inerte ici à un agent chimique utilisé lors d'une attaque chimique permettant de réaliser la cavité et la suspension des bras 23.2. Elle permet de protéger les bras 23.1 lors de cette attaque chimique, ici à l'acide fluorhydrique (HF) en phase vapeur. Elle peut être réalisée en silicium amorphe d'une épaisseur de 60nm environ, et peut être déposée de manière conforme par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD).
- [0062] Par ailleurs, des couches minces de collage 42 (42.1 et 42.2, cf. [Fig.3D]) peuvent être situées entre et au contact de la portion cristalline semiconductrice 10 et les bras 23.1. Elles peuvent être réalisées en un matériau métallique, par exemple en aluminium, en or Au ou en ses composés, entre autres. Comme décrit plus loin, ces couches minces de collage 42 assurent le collage (ici par thermocompression) de la portion cristalline semiconductrice 10 sur les bras 23.1 de la couche mince structurée 23.
- [0063] Enfin, comme l'illustre la [Fig.3G], une couche mince d'encapsulation 47 peut être déposée de manière à recouvrir la portion cristalline semiconductrice 10 ainsi que la structure de déformation 20. Elle peut être réalisée en silicium amorphe d'une épaisseur de quelques dizaines de nanomètres déposé par PECVD.
- [0064] En fonctionnement, la source électrique génère un signal électrique de commande, ici une tension de polarisation entre les deux électrodes inférieure 31 et supérieure 32. Un champ électrique est alors généré au sein des bras 23.1 de la couche mince structurée 23, dont les lignes de champ s'étendent de manière sensiblement parallèle à l'axe vertical Z. Le champ électrique induit une déformation des bras 23.1 suivant l'axe vertical Z, et également, par effet Poisson, une déformation dans le plan XY et donc suivant l'axe principal X du fait de la forme allongée des bras 23.1 suivant cet axe. La déformation des bras 23.1 suivant l'axe principal X entraîne donc celle de la portion cristalline semiconductrice 10 suivant le même axe. Notons que l'intensité de la déformation est proportionnelle à celle du champ électrique et donc à celle du signal électrique de commande.
- [0065] Aussi, l'actionneur électromécanique est en mesure de déformer la portion cristalline

semiconductrice 10, à la demande (de manière contrôlée et réversible). La gamme de déformation des bras 23.1 et donc de la portion cristalline semiconductrice 10 peut être importante, par exemple de l'ordre de plusieurs pourcents, avec une tension de commande de l'ordre de la dizaine à quelques dizaines de volts, par exemple de l'ordre de 10 à 20V. Le dispositif optoélectronique 1 présente une architecture permettant une intégration élevée des différents éléments sur une surface réduite du substrat support 21. Elle permet également de réaliser un couplage optique efficace entre la portion cristalline semiconductrice 10 et le guide d'onde 2. Tout ceci est obtenu notamment par le fait que la structure de déformation 20 comporte des couches minces réalisées par les techniques classiques de la microélectronique (dépôt, lithographie, gravure...). De plus, comme décrit par la suite, il peut être réalisé à partir de substrat de type silicium sur isolant (SOI) ou de type germanium sur isolant (GeOI), avec éventuellement une étape de report et de collage (ici par thermocompression).

[0066] A titre d'exemple, les bras 23.1 peuvent présenter une largeur l_{b2} constante de $50\mu\text{m}$ sur une longueur de $300\mu\text{m}$ environ. La portion cristalline semiconductrice 10 peut présenter une partie centrale 11 ayant une largeur constante l_{pc} de $1.5\mu\text{m}$ sur une longueur L_{pc} de $8\mu\text{m}$ environ. Les parties d'extrémité 12 qui reposent sur les bras 23.1 peuvent présenter une longueur de $20\mu\text{m}$ environ et une largeur constante de $40\mu\text{m}$ environ. La partie centrale 11 de la portion cristalline semiconductrice 10 peut présenter des contraintes en tension non nulles en l'absence d'une tension de commande appliquée par l'actionneur électromécanique ($U=0\text{V}$), par exemple de l'ordre de -1.5% pour la déformation uniaxiale ϵ_{xx} en raison des contraintes résiduelles présentes dans les matériaux des empilements et qui se trouvent libérées lors de la sous-gravure. Des études par simulation numérique, de type méthode des éléments finis, réalisées à l'aide de l'outil COMSOL Multiphysics montrent que la partie centrale 11 de la portion cristalline semiconductrice 10 peut atteindre des déformations en tension de 3% environ avec des taux de déformation très importants, par exemple ici de l'ordre de 0.2% par volt appliqué.

[0067] Dans le cas ici où le dispositif optoélectronique 1 est une diode laser, la modification à la demande de l'état de contraintes mécaniques de la portion cristalline semiconductrice 10, et en particulier celui de la partie centrale 11, permet d'accorder de manière contrôlée le gap du matériau et donc la longueur d'onde de la bande d'émission. Il est alors possible de décaler la zone de gain optique sur une plage importante de longueur d'onde et donc d'accorder ou désaccorder celle-ci avec la distribution spectrale des modes permis de la cavité. Par ailleurs, l'apport des porteurs libres dans le milieu à gain peut être effectué par pompage optique ou par pompage électrique. Dans ce dernier cas, la partie centrale 11 comporte une jonction semiconductrice, par exemple de type pin, et des électrodes sont en contact électrique avec

celle-ci.

- [0068] Dans le cas où le dispositif optoélectronique 1 est un photodétecteur, la partie centrale 11 de la portion cristalline semiconductrice 10 comporte une jonction semiconductrice, par exemple de type pin. Sa déformation par l'actionneur électromécanique permet de moduler de manière contrôlée la longueur d'onde de coupure. Du fait de son architecture, le dispositif optoélectronique 1 peut occuper une surface très réduite, par exemple sur un substrat de silicium, bien inférieure à celle des spectromètres classiques macroscopiques. Il est alors possible de retrouver la forme du spectre du rayonnement incident sur la base de la mesure de la photoconductivité de la portion cristalline semiconductrice 10 éclairé et sous traction mécanique croissante. Le dispositif optoélectronique 1 forme alors un spectromètre d'une technologie différente de celles de type FTIR (analyse dans l'espace réciproque du spectre) ou de type réseau (diffraction dans l'espace réel des composantes de la lumière suivant leur fréquence).
- [0069] Notons enfin que le dispositif optoélectronique 1 peut être un modulateur optique. Le matériau de la portion cristalline semiconductrice 10 peut être rendu opaque à la longueur d'onde du mode guidé, du fait d'une diminution de son énergie de bande interdite du fait d'une déformation suffisante au moyen de l'actionneur électromécanique. Le modulateur optique peut se comporter, à titre d'exemple, comme un interrupteur optique, commandable par actuation de la déformation des bras 23.1 et donc de la portion cristalline semiconductrice 10.
- [0070] Les figures 2A et 2B sont des vues schématiques et partielles, en coupe transversale ([Fig.2A]) et en vue de dessus ([Fig.2B]), d'un dispositif optoélectronique 1 selon le deuxième mode de réalisation, où la déformation de la portion cristalline semiconductrice 10 est induite par une dilatation thermique des bras 23.1 contrôlée par l'actionneur électromécanique. La [Fig.2C] est une vue en perspective du dispositif optoélectronique 1 où certains éléments sont omis par souci de clarté.
- [0071] Dans cet exemple, le dispositif optoélectronique 1 est également une diode laser, mais le guide d'onde 2 est un guide intégré situé dans le substrat support 21. Il appartient à un circuit photonique intégré comportant des guides d'onde et éventuellement des éléments optiques actifs et/ou passifs.
- [0072] Ici, la structure de déformation 20 est similaire à celle du premier mode de réalisation en ce qu'il comporte également un substrat support 21, une couche mince intercalaire 22 délimitant une cavité dans le plan XY, et une couche mince structurée 23 comportant les bras 23.1 suspendus au-dessus de la cavité.
- [0073] Le substrat support 21 est similaire à celui de la [Fig.1A] et s'en distingue en ce qu'il comporte le guide d'onde intégré 2. Celui-ci peut être réalisé à partir d'une couche mince de silicium, de préférence monocristallin et présentant une tension résiduelle. Il est entouré d'une gaine réalisée en un oxyde de silicium. Le substrat support 21 peut

ainsi être formé à partir d'un substrat SOI en contrainte (*Strained SOI*). Par ailleurs, la couche mince intercalaire 22 est ici identique à celle de la [Fig.1A]. L'empilement 21, 22 et 23 peut également être réalisé à partir d'un substrat GeOI.

- [0074] La couche mince structurée 23 est ici réalisée en un matériau dont le coefficient de dilatation thermique est suffisant pour imposer une déformation voulue de la portion cristalline semiconductrice 10. De plus, il présente des propriétés optiques, par exemple en termes d'indice de réfraction à la longueur d'onde du mode optique, permettant le couplage optique entre la portion cristalline semiconductrice 10 et le guide d'onde intégré 2. Il peut aussi être adapté à réaliser la portion cristalline semiconductrice 10 par épitaxie. Ainsi, dans cet exemple, la portion cristalline semiconductrice 10 est réalisée par épitaxie à partir du matériau de la couche mince structurée 23. Celle-ci peut ainsi être en germanium Ge, et la portion cristalline semiconductrice 10 peut être en germanium étain GeSn.
- [0075] L'actionneur électromécanique est ici adapté à générer une dilatation thermique des bras 23.1, et donc une déformation de ces derniers suivant l'axe principal X, ce qui induit en conséquence une déformation de la portion cristalline semiconductrice 10 suivant le même axe principal X.
- [0076] Pour cela, la source électrique est ici adaptée à générer un courant électrique de commande, et le circuit électrique comporte ici des pistes métalliques 35 s'étendant sur et en contact thermique avec les bras 23.1. Ces pistes métalliques 35 sont réalisées en un matériau métallique, par exemple en Pt ou en TiN d'une épaisseur de 200 nm, et sont connectés à la source électrique par des plots de contact 36. Une couche mince 24 est située entre la couche mince structurée 23 d'une part, et les pistes métalliques 35 et les électrodes 36 d'autre part. Elle est réalisée en un matériau isolant électrique et conducteur thermique, par exemple de l'AlN. La portion cristalline semiconductrice 10 peut être recouverte par celle-ci. La circulation du courant électrique de commande dans les pistes métalliques 35 se traduit par un échauffement de celles-ci par effet Joule, et donc des bras 23.1, ce qui entraîne leur dilatation thermique suivant, notamment, l'axe principal X. Autrement dit, la circulation du courant électrique de commande génère un champ de température dans les bras 23.1 qui induit une dilatation thermique de ces derniers. La dilatation thermique des bras 23.1 suivant l'axe principal X entraîne donc la déformation de la portion cristalline semiconductrice 10 suivant le même axe.
- [0077] Aussi, en fonctionnement, l'actionneur électromécanique permet d'imposer une déformation à la demande, de manière contrôlée et réversible, à la portion cristalline semiconductrice 10 suivant l'axe principal X. L'arrêt de la circulation du courant électrique de commande conduit à un retour à la température initiale des bras 23.1, et donc à leur contrainte mécanique initiale, annulant ainsi la déformation de la portion

cristalline semiconductrice 10 imposée par l'actionneur électromécanique.

- [0078] Dans cet exemple, le dispositif optoélectronique 1 étant une diode laser, la partie centrale 11 (milieu à gain) de la portion cristalline semiconductrice 10 est située dans une cavité optique délimitée par deux réflecteurs optiques 3. Ces derniers peuvent être des miroirs de Bragg (non représentés) formés dans le guide d'onde intégré 2. Le mode optique (cf. flèche en pointillé sur la [Fig.2A]) est formé dans le milieu à gain et oscille dans la cavité optique, i.e. dans la portion cristalline semiconductrice 10, puis est émis hors de la cavité optique pour circuler dans le guide d'onde intégré 2.
- [0079] Ici, le matériau à base de germanium de la couche mince structurée 23 peut ne pas être sensible à l'agent de gravure chimique utilisé pour graver partiellement la couche mince intercalaire 22 et former la cavité. Aussi, une couche mince de protection 41 recouvrant la surface libre de la couche mince structurée 23 (des bras 23.1 en particulier) n'est pas nécessaire.
- [0080] Les figures 3A à 3G illustrent des étapes d'un exemple d'un procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique 1 selon le premier mode de réalisation (déformation par effet piézoélectrique inverse) similaire à celui des [Fig.1A] à 1C. Ce procédé est ici donné à titre d'exemple et plusieurs modifications peuvent être faites.
- [0081] En référence à la [Fig.3A], on réalise un premier empilement de couches minces continues à partir du substrat support 21. On part ici d'un substrat SOI, formé d'un substrat de silicium (substrat support 21) de plusieurs centaines de microns d'épaisseur, d'une couche d'oxyde enterré (couche mince intercalaire 22), et d'une couche mince de silicium 43 (facultative). On dépose ensuite une couche mince conductrice 31c destinée à former l'électrode inférieure 31, par exemple en CrAu, Pt, ou Pt/TiO₂, d'une épaisseur de 100 nm environ, puis une couche mince piézoélectrique 23c destinée à former la couche mince structurée 23, par exemple en PZT d'une épaisseur de quelques microns, et enfin une couche mince conductrice 32c destinée à former l'électrode supérieure 32.
- [0082] La couche mince de silicium 43, bien que facultative, est avantageuse dans la mesure où elle permet d'améliorer la symétrie des couches minces de part et d'autre de la couche mince piézoélectrique 23, et en particulier des bras 23.1 lorsqu'ils seront réalisés et suspendus. En effet, ils comporteront la couche mince de silicium 43 au niveau de leur face inférieure, et une couche mince de protection 41, ici réalisée en silicium amorphe, au niveau de leur face supérieure (cf. [Fig.3B]). De préférence, ces deux couches minces en silicium 41, 43 présentent une épaisseur sensiblement identique, par exemple de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, par exemple 60nm.
- [0083] En référence à la [Fig.3B], on réalise une ouverture traversante débouchant sur la couche mince intercalaire 22, par gravure localisée de la couche mince conductrice su-

périeure 32c (formant ainsi l'électrode supérieure 32), de la couche mince piézo-électrique 23c (formant ainsi la couche mince structurée 23 avec les bras 23.1), de la couche mince conductrice inférieure 31c (formant ainsi l'électrode inférieure 31), et ici de la couche mince de silicium 43.

- [0084] On dépose ici de manière conforme la couche mince de protection 41, par PECVD, en silicium amorphe de 60nm d'épaisseur, de manière à recouvrir les bras 23.1 et en particulier les flancs de ces derniers. Cette couche mince de protection 41 assurera une protection du matériau piézoélectrique lors de la gravure chimique d'une partie de la couche mince intercalaire 22 lors de la réalisation de la cavité et de la suspension des bras 23.1. On supprime la partie de la couche mince de protection 41 située au contact de la couche mince intercalaire 22. Ensuite, on réalise un dépôt conforme pleine plaque d'une couche mince de collage 42.1, ici un matériau métallique comme de l'aluminium.
- [0085] En référence à la [Fig.3C], on réalise un deuxième empilement comportant un substrat tampon 44, une couche mince de germination 45, par exemple ici en germanium d'une épaisseur de quelques microns, ici de 2.5µm environ, épitaxié à partir du substrat tampon 44, puis une couche mince 46 destinée à former la portion cristalline semiconductrice 10, ici en germanium étain d'une épaisseur comprise entre quelques dizaines de microns à quelques microns, par exemple ici de 500nm environ, épitaxié à partir de la couche mince de germination 45. On dépose une couche mince de collage 42.2, ici un matériau métallique comme de l'aluminium.
- [0086] En référence à la [Fig.3D], on reporte le deuxième empilement pour mettre les deux couches minces de collage 42.1, 42.2 en contact l'une de l'autre. L'assemblage des deux empilements est ici effectué par thermocompression, par exemple à une température de 300°C environ et une pression de 5MPa pendant 30min. Un autre type de collage reste possible, par exemple un collage moléculaire de type oxyde/oxyde.
- [0087] En référence à la [Fig.3E], on retire le substrat tampon 44, par exemple par meulage (*grinding* en anglais), de manière à rendre libre la couche mince de germination 45. Le meulage comporte une étape de polissage mécanique suivi d'une gravure sélective humide ou sèche. On supprime ensuite la couche mince de germination 45, par gravure sélective avec arrêt de gravure sur la couche mince cristalline semiconductrice 46. On structure ensuite cette dernière pour former la portion cristalline semiconductrice 10 (cf. [Fig.1B]), avec la partie centrale 11 et les parties d'extrémité 12, ainsi que, ici, le guide d'onde 2. Une partie latérale des couches minces de collage, notée ici 42, située autour de la portion cristalline semiconductrice 10 et du guide d'onde 2, est alors rendue libre. Cette partie est ensuite supprimée, ce qui rend libre la partie latérale de la couche mince de protection 41 non recouverte par la portion cristalline semiconductrice 10, ainsi que la partie de la couche mince intercalaire 22 située dans la cavité.

- [0088] En référence à la [Fig.3F], on grave une partie de la couche mince intercalaire 22, ici par attaque chimique à l'HF en phase vapeur de manière à former la cavité. Cette gravure partielle entraîne la suspension des bras 23.1. La cavité est délimitée suivant la direction -Z par le substrat support 21 et dans le plan XY par la couche mince intercalaire 22 non gravée. La portion cristalline semiconductrice 10, et en particulier sa partie centrale 11, présente un premier état de contraintes mécaniques. Elle peut être relaxée, ou, comme ici, présenter une légère tension résiduelle.
- [0089] En référence à la [Fig.3G], on réalise les réflecteurs optiques 3 (lesquels peuvent avoir été réalisés plus tôt), ici des coins de cube, puis on dépose de manière conforme une couche mince d'encapsulation 47 (facultative), par exemple un oxyde, venant recouvrir la portion cristalline semiconductrice 10. Enfin, on réalise les plots de contact pour chacun des bras 23.1, avec un premier plot de contact 33 qui vient au contact de l'électrode supérieure 32, et un deuxième plot de contact 34 qui vient au contact de l'électrode inférieure 31. Les plots de contact 33, 34 sont connectés à la source électrique. On obtient ainsi un dispositif optoélectronique 1 présentant une architecture intégrée, ici en technologie silicium, comportant un actionneur électromécanique (ici de type piézoélectrique) permettant de déformer la portion cristalline semiconductrice 10 à la demande, de manière contrôlée et réversible, sur une grande plage de déformation.
- [0090] Les figures 4A à 4F illustrent des étapes d'un procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique 1 selon le deuxième mode de réalisation (déformation par effet thermique) identique ou similaire à celui des [Fig.2A] à 2C. Ce procédé est ici donné à titre d'exemple et plusieurs modifications peuvent être faites.
- [0091] En référence à la [Fig.4A], on réalise un empilement formé d'un substrat support 21, d'une couche mince intercalaire 22, d'une couche mince de germination 23c destinée à former la couche mince structurée 23, et d'une couche mince 46 destinée à former la portion cristalline semiconductrice 10. Le substrat support 21 comporte ici un guide d'onde intégré 2, qui appartient à un circuit photonique intégré. Ce substrat support 21 peut avoir été réalisé à partir d'un substrat SOI, où le guide d'onde 2 a été formé à partir de la couche mince de silicium du SOI. La couche mince intercalaire 22 est ici une couche en un oxyde de silicium, la couche mince de germination 23c est ici en germanium, et la couche cristalline semiconductrice 46 est en germanium étain.
- [0092] En référence à la [Fig.4B], on structure tout d'abord la couche mince 46 de manière à former un masque destiné à la réalisation des bras 23.1 de la couche mince structurée 23. Pour cela, on grave localement la couche mince 46, de manière anisotrope, avec un arrêt de gravure sélectif sur la couche 23c de Ge (ou une gravure au temps). Les réflecteurs optique (non représentés ici) peuvent être réalisés lors de cette étape. Notons que la partie droite de la [Fig.4B] est une vue de dessus de l'empilement, et que la

partie gauche est une vue en coupe transversale suivant la ligne AA.

- [0093] En référence à la [Fig.4C], on grave localement la couche 23c sur toute son épaisseur, sélectivement au GeSn, par une gravure sèche isotrope. La sous-gravure du Ge est illustré sur la partie droite de la [Fig.4C] par des traits pointillés. On obtient ainsi la couche mince structurée 23 qui présente des bras 23.1.
- [0094] En référence à la [Fig.4D], on réalise ensuite la portion cristalline semiconductrice 10, par gravure localisée anisotrope de la couche 46 sur toute son épaisseur de manière sélective au Ge. On obtient ainsi la portion cristalline semiconductrice 10 en GeSn qui repose sur les extrémités des bras 23.1 en Ge. Les réflecteurs optiques (le cas échéant) peuvent être situés dans une partie de la portion cristalline semiconductrice 10 qui ne repose pas directement sur les bras 23.1, améliorant ainsi le confinement du mode optique dans la cavité optique.
- [0095] En référence à la [Fig.4E], on réalise les plots de contact 36 ainsi que les pistes métalliques 35 sur la couche mince 24 (ici en AlN). Les plots de contact 36 sont connectés à la source électrique et les pistes métalliques sont en contact thermique avec les bras 23.1.
- [0096] En référence à la [Fig.4F], on grave une partie de la couche mince intercalaire 22, ici par attaque chimique à l'HF en phase vapeur. Cette gravure partielle entraîne la suspension des bras 23.1 au-dessus d'une cavité délimitée suivant la direction -Z par le substrat support 21 et dans le plan XY par la couche mince intercalaire 22 non gravée. La portion cristalline semiconductrice 10, et en particulier sa partie centrale 11, présente un premier état de contraintes mécaniques. Elle peut être relaxée, ou, comme ici, présenter une légère tension résiduelle.
- [0097] Ainsi, on obtient un dispositif optoélectronique 1 présentant une architecture intégrée, ici en technologie silicium, comportant un actionneur électromécanique (ici de type thermique) permettant de déformer la portion cristalline semiconductrice 10 à la demande, de manière contrôlée et réversible, sur une grande plage de déformation.
- [0098] Des modes de réalisation particuliers viennent d'être décrits. Différentes variantes et modifications apparaîtront à l'homme du métier.

Revendications

[Revendication 1]

Dispositif optoélectronique (1), comportant :

- une structure de déformation (20) d'une portion cristalline semiconductrice (10), comportant un empilement de :
 - un substrat support (21) ; puis
 - une couche mince intercalaire (22) délimitant une cavité dans un plan parallèle à celui du substrat support (21) ; puis
 - une couche mince structurée (23), reposant sur la couche mince intercalaire (22), comportant au moins deux bras (23.1) suspendus au-dessus de la cavité, s'étendant longitudinalement suivant un même axe principal ;
- la portion cristalline semiconductrice (10), reposant sur les deux bras (23.1), et s'étendant longitudinalement suivant l'axe principal ;
- un guide d'onde (2), couplé optiquement à la portion cristalline semiconductrice (10) ;
- caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif électrique de déformation, adapté à déformer à la demande la portion cristalline semiconductrice (10) suivant l'axe principal, comportant :
 - une source électrique, adaptée à générer un signal électrique de commande ;
 - un circuit électrique (31, 32, 33, 34 ; 35, 36), connecté à la source électrique, et adapté à générer dans les bras (23.1), en réponse au signal électrique de commande, un champ électrique ou un champ de température, induisant une déformation, suivant l'axe principal, des bras (23.1) et donc de la portion cristalline semiconductrice (10).

[Revendication 2]

Dispositif optoélectronique (1) selon la revendication 1, dans lequel la portion cristalline semiconductrice (10) présente une partie centrale (11) située entre deux parties d'extrémité (12) qui reposent sur les bras (23.1), la partie centrale (11) présentant une largeur moyenne inférieure

- à celle des parties d'extrémité (12).
- [Revendication 3] Dispositif optoélectronique (1) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la portion cristalline semiconductrice (10) présente une partie centrale (11) située entre deux parties d'extrémité (12) qui reposent sur les bras (23.1), la partie centrale (11) présentant une largeur moyenne inférieure à celle des bras (23.1).
- [Revendication 4] Dispositif optoélectronique (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le substrat support (21) est réalisé à base de silicium, et la portion cristalline semiconductrice (10) est réalisée à base de germanium.
- [Revendication 5] Dispositif optoélectronique (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel la couche mince structurée (23) est réalisée en un matériau piézoélectrique, et dans lequel le circuit électrique comporte deux électrodes inférieure (31) et supérieure (32), en forme de couches minces, situées de part et d'autre des bras (23.1) suivant un axe d'épaisseur de la couche mince structurée (23), et connectées à la source électrique pour générer, en réponse au signal électrique de commande, un champ électrique dans les bras (23.1) induisant une déformation de ces derniers par effet piézoélectrique inverse.
- [Revendication 6] Dispositif optoélectronique (1) selon la revendication 5, comportant une couche mince de protection (41), réalisée en un matériau inerte à un acide fluorhydrique, recouvrant une surface libre des bras (23.1).
- [Revendication 7] Dispositif optoélectronique (1) selon la revendication 5 ou 6, comportant deux couches minces de collage (42.1, 42.2), réalisées à base d'un matériau métallique, en contact l'une de l'autre, et situées entre la portion cristalline semiconductrice (10) et les bras (23.1).
- [Revendication 8] Dispositif optoélectronique (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel le circuit électrique comporte des pistes métalliques (35), reposant sur et au contact thermique des bras (23.1), et connectées à la source électrique pour générer, en réponse au signal électrique de commande, un champ de température dans les bras (23.1) induisant une déformation de ces derniers par dilatation thermique.
- [Revendication 9] Dispositif optoélectronique (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel le guide d'onde (2) repose sur les bras (23.1), est réalisé en le même matériau que celui de la portion cristalline semiconductrice (10) et est en continuité physique avec celle-ci ; ou dans lequel le guide d'onde (2) est intégré dans le substrat support (21).
- [Revendication 10] Procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique (1) selon l'une

quelconque des revendications 5 à 7, comportant les étapes suivantes :

- réalisation d'un premier empilement comportant la couche mince structurée (23) recouverte par une première couche mince de collage (42.1) ;
- réalisation d'un deuxième empilement comportant une couche mince cristalline semiconductrice (46) destinée à former la portion cristalline semiconductrice (10) et recouverte par une deuxième couche mince de collage (42.2) ;
- report et collage du deuxième empilement sur le premier empilement, par mise en contact des première et deuxième couches minces de collage (42.1, 42.2).

[Revendication 11] Procédé de fabrication selon la revendication 10, comportant les étapes suivantes :

- préalablement à l'étape de report, structuration d'une couche mince de déformation (23c) du premier empilement pour former la couche mince structurée (23) et les bras (23.1) ;
- dépôt d'une couche mince de protection (41), réalisée en un matériau inerte à un agent de gravure utilisé lors d'une étape ultérieure de suspension des bras (23.1), de manière à recouvrir une surface libre des bras (23.1).

[Revendication 12] Procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique (1) selon l'une quelconque des revendications 8, comportant l'étape suivante :

- réalisation d'un empilement formé du substrat support (21), puis de la couche mince intercalaire (22), puis d'une couche mince de déformation (23c) destinée à former la couche mince structurée (23), puis d'une couche mince semiconductrice (46) destinée à former la portion cristalline semiconductrice (10), la couche mince semiconductrice (46) étant réalisée par épitaxie à partir de la couche mince de déformation (23c).

[Revendication 13] Procédé de fabrication d'un dispositif optoélectronique (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, comportant les étapes suivantes :

- réalisation d'un empilement formé du substrat support (21),

puis de la couche mince intercalaire (22), puis de la couche mince structurée (23), puis de la portion cristalline semiconductrice (10) ;

- gravure chimique d'une partie de la couche mince intercalaire (22) située sous les bras (23.1), de manière à réaliser une cavité au-dessus de laquelle les bras sont suspendus.

[Fig. 1A]

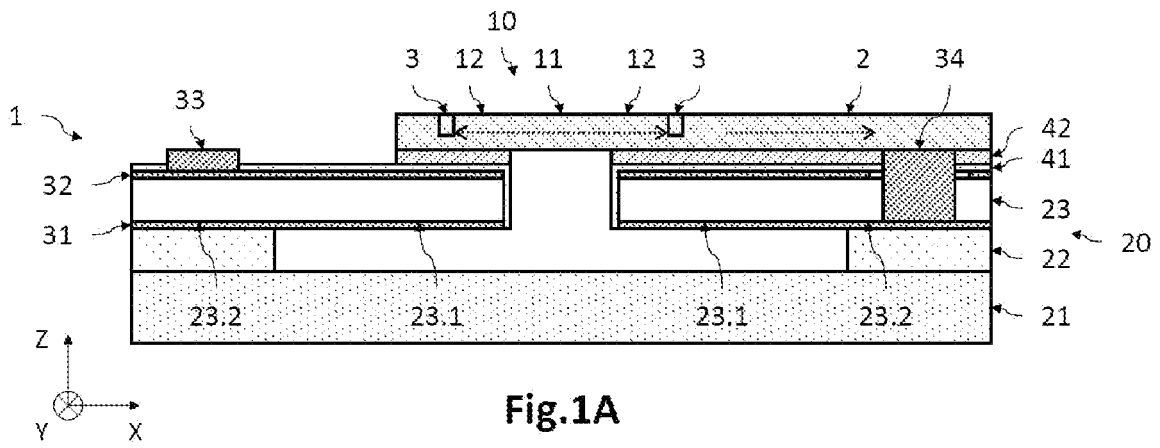


Fig.1A

[Fig. 1B]

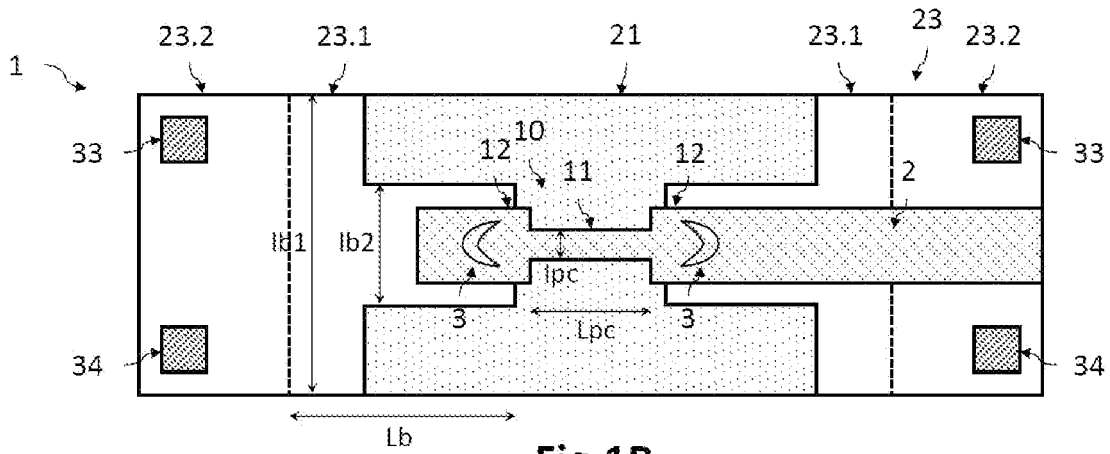


Fig.1B

[Fig. 1C]

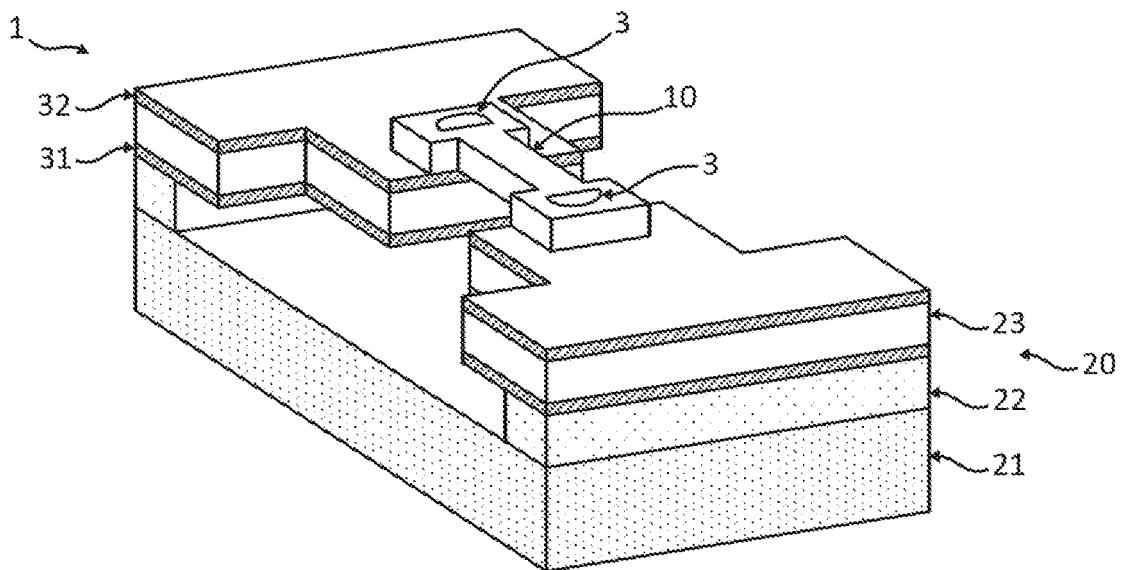


Fig.1C

[Fig. 2A]

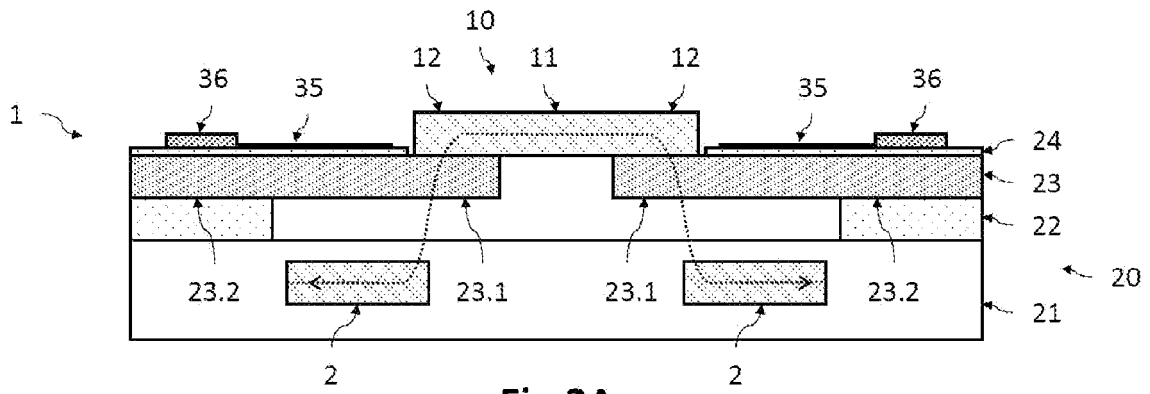


Fig.2A

[Fig. 2B]

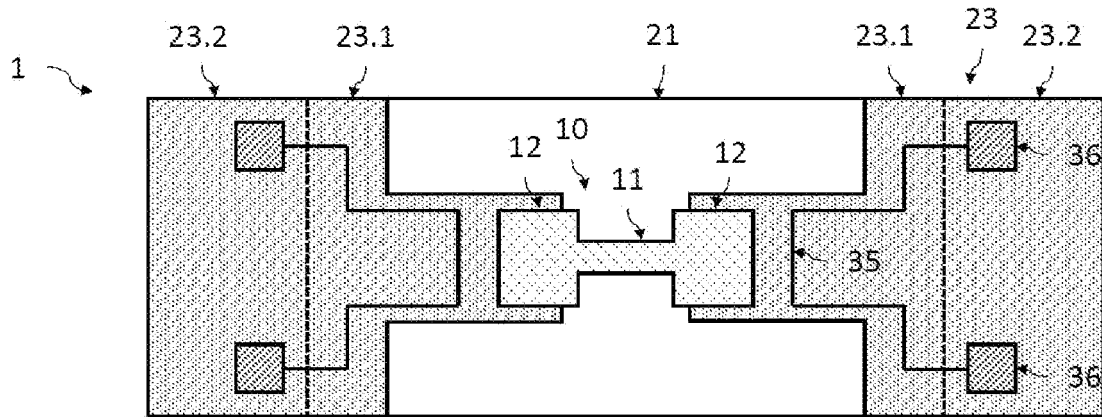


Fig.2B

[Fig. 2C]

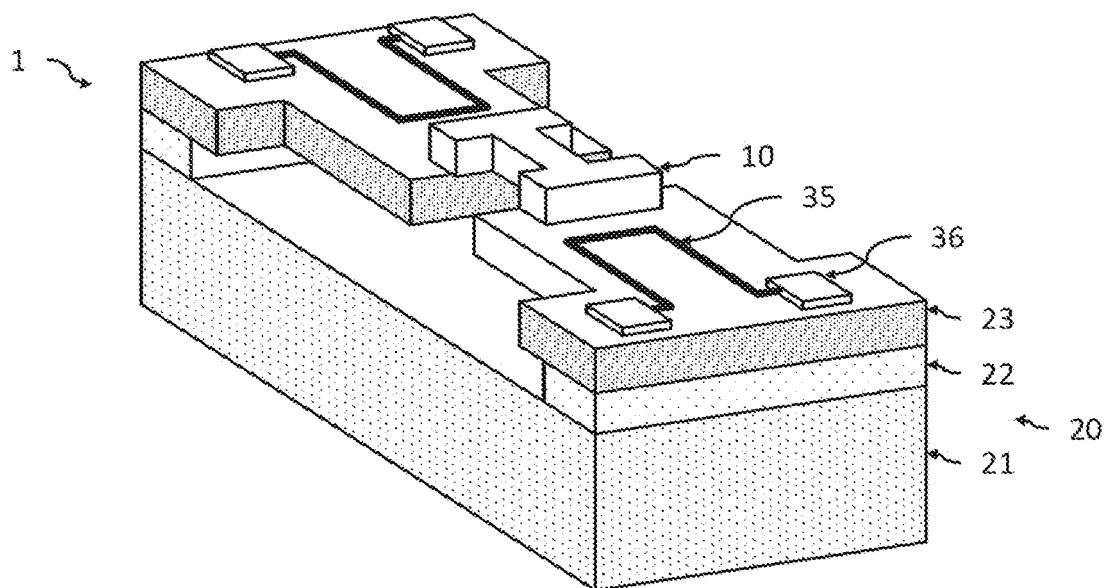


Fig.2C

[Fig. 3A]

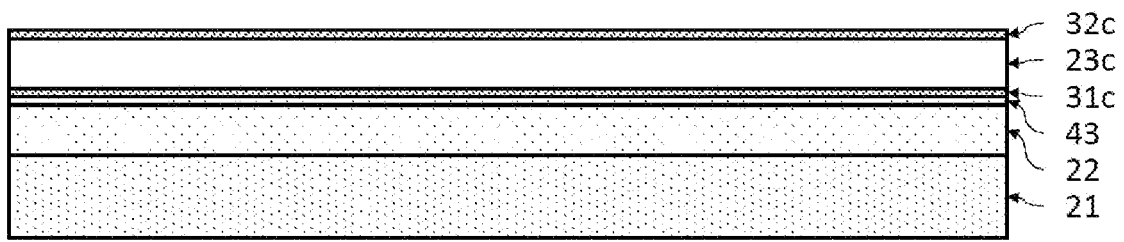


Fig.3A

[Fig. 3B]

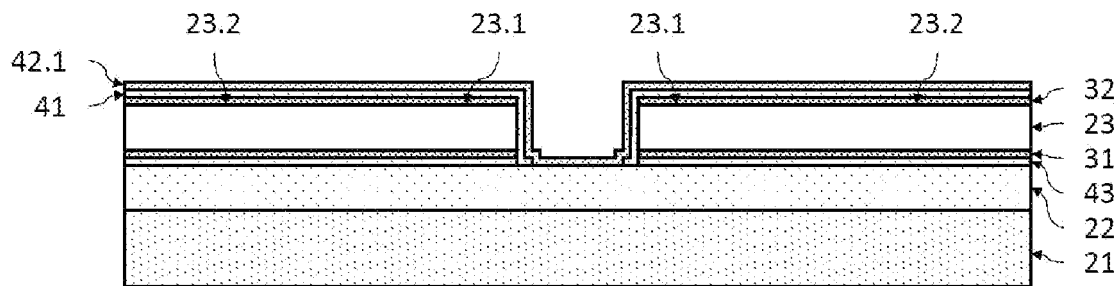


Fig.3B

[Fig. 3C]

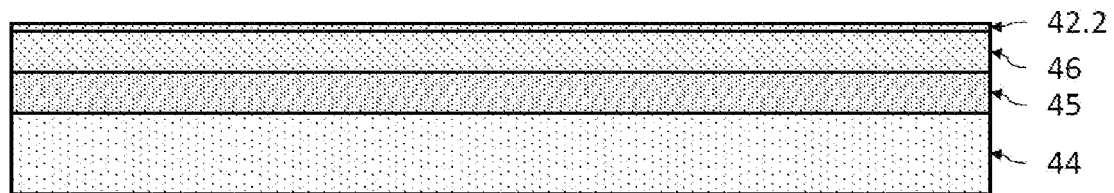


Fig.3C

[Fig. 3D]

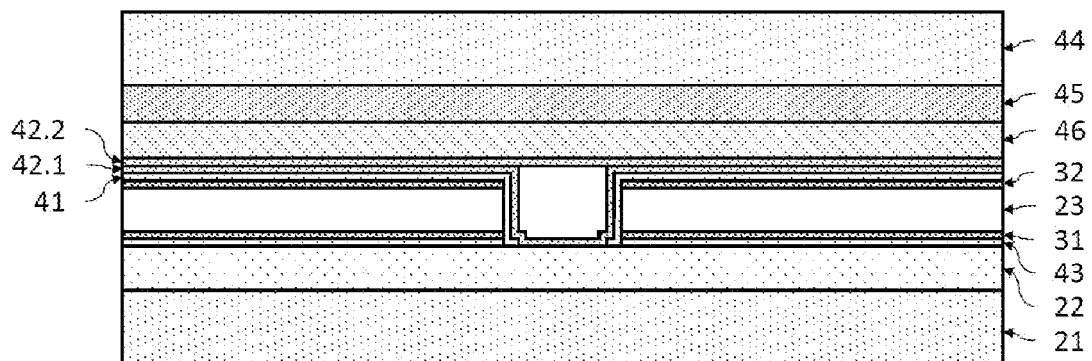


Fig.3D

[Fig. 3E]

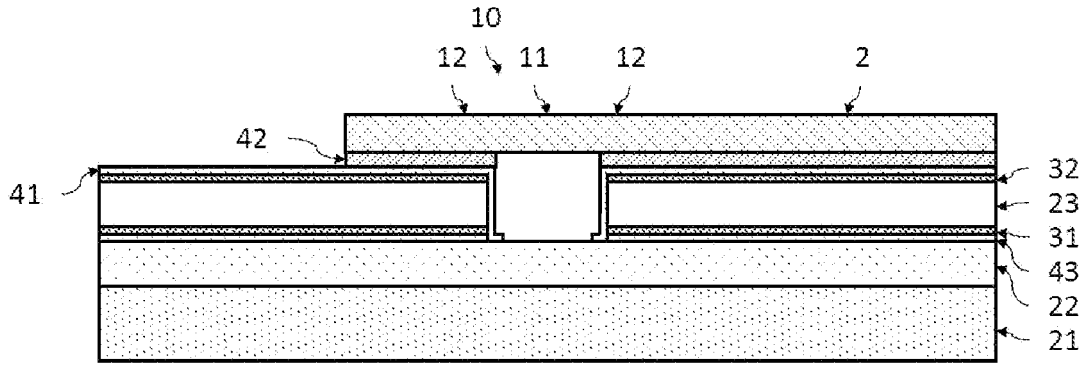


Fig.3E

[Fig. 3F]

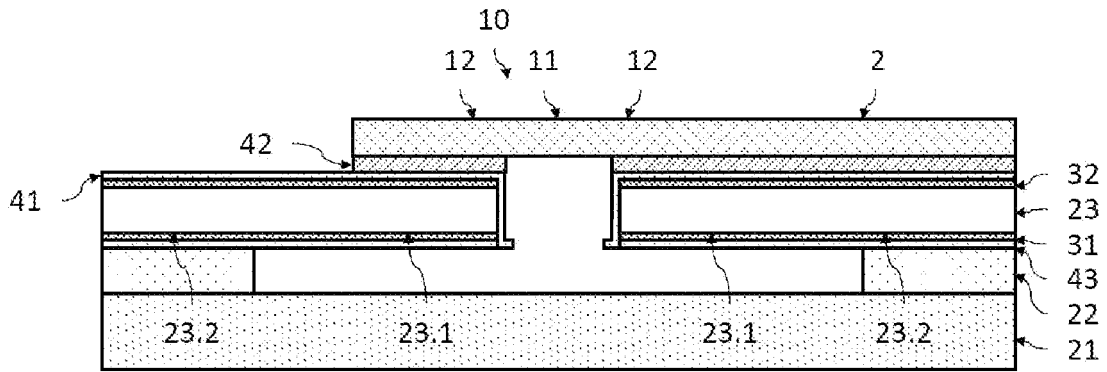


Fig.3F

[Fig. 3G]

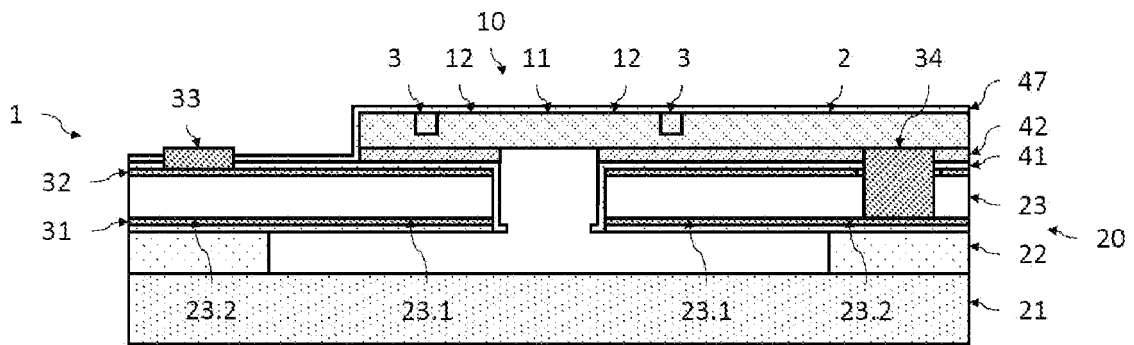


Fig.3G

[Fig. 4A]

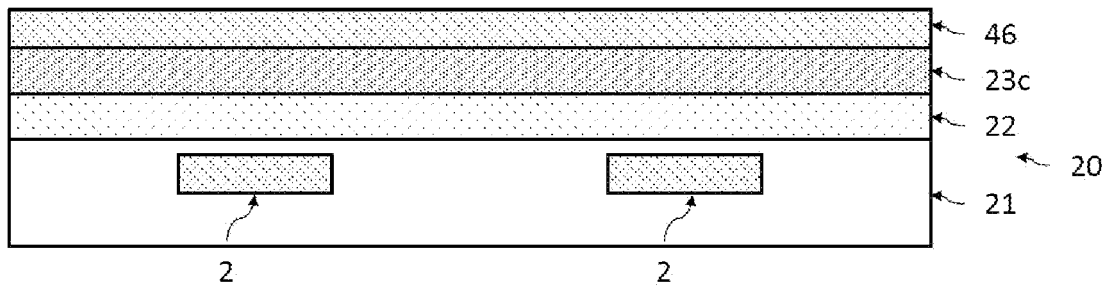


Fig.4A

[Fig. 4B]

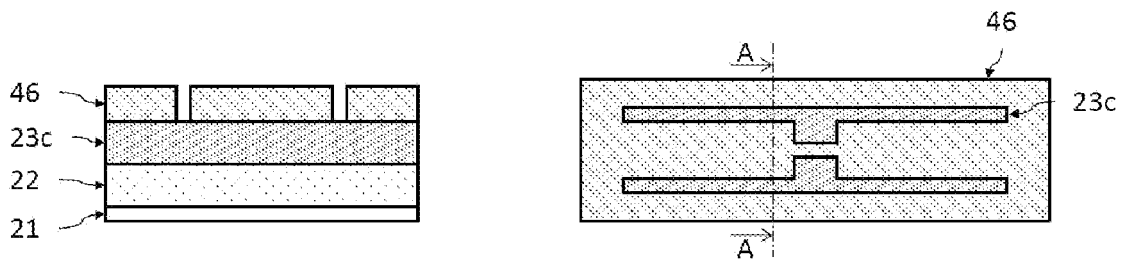


Fig.4B

[Fig. 4C]

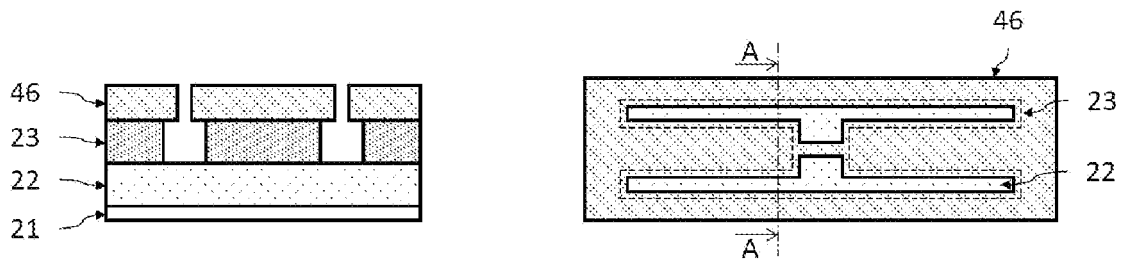


Fig.4C

[Fig. 4D]

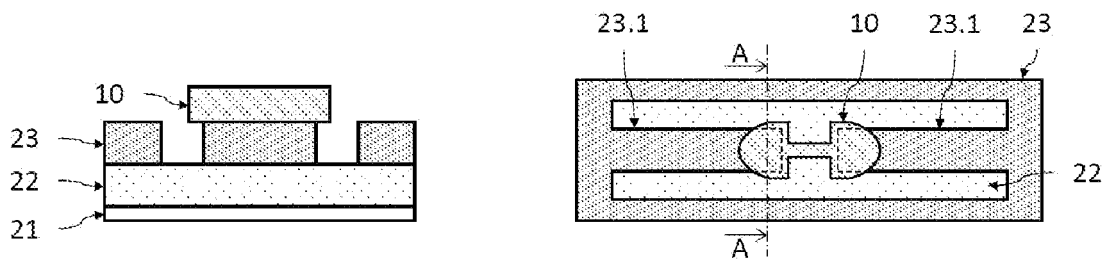


Fig.4D

[Fig. 4E]

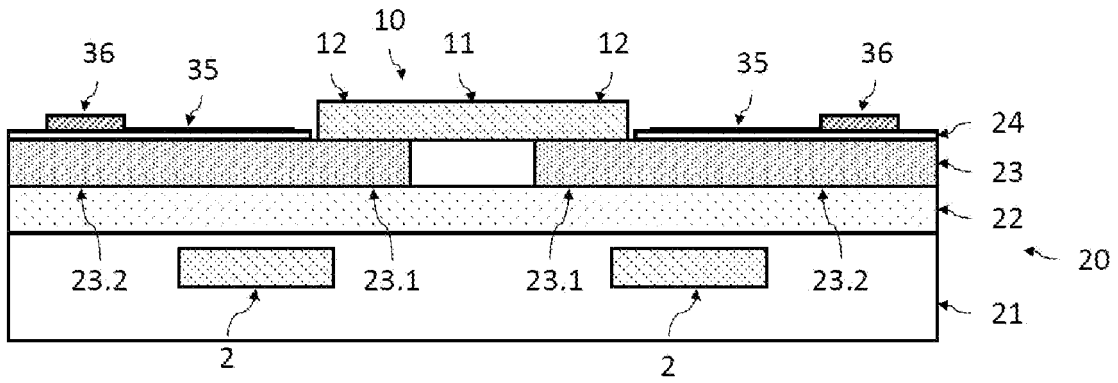


Fig.4E

[Fig. 4F]

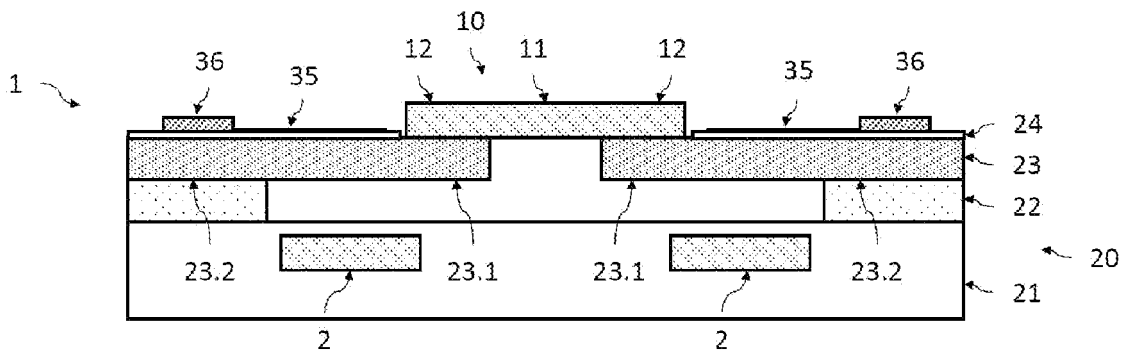


Fig.4F

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

**FA 919613
FR 2304614**

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, D	US 10 490 976 B2 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 26 novembre 2019 (2019-11-26)	1-4, 9-13	G02F 1/025 H01L 31/036 H01L 33/12
Y	* abrégé; figures 2, 3 * * colonne 9, lignes 21-32 * * colonne 5, lignes 1-20 * * colonne 5, ligne 63 - colonne 6, ligne 11 *	5-8, 11-13	
Y	----- JAVIER MARTIN-SANCHEZ ET AL: "Strain-Tuning of the Optical Properties of Semiconductor Nanomaterials by Integration onto Piezoelectric Actuators", ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 20 octobre 2017 (2017-10-20), XP081296386, DOI: 10.1088/1361-6641/AA9B53 * le document en entier *	5-8, 11-13	
A, D	EP 3 745 473 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 2 décembre 2020 (2020-12-02) * abrégé; figures 1-3 * * alinéas [0002] - [0008], [0023] - [0033] *	1-13	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H01S H01L G02F
A	----- JIALIN JIANG ET AL: "Strain-Induced Enhancement of Electroluminescence from Highly Strained Germanium Light-Emitting Diodes", ACS PHOTONICS, vol. 6, no. 4, 20 mars 2019 (2019-03-20), pages 915-923, XP055655555, ISSN: 2330-4022, DOI: 10.1021/acsp Photonics.8b01553 * le document en entier *	1-13	
		----- -/--	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
6 décembre 2023		Beugin, Anne	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
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		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	

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 919613
FR 2304614

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		
A	US 2004/076198 A1 (SPOONHOWER JOHN P [US] ET AL) 22 avril 2004 (2004-04-22) * abrégé; figure 18 * * alinéas [0077] - [0084] * -----	1-13	
A	US 10 411 434 B2 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 10 septembre 2019 (2019-09-10) * abrégé; figures 1a,1b,5a * * colonne 4, ligne 47 - colonne 7, ligne 19 * -----	1-13	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
6 décembre 2023		Beugin, Anne	
<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>			

1
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2304614 FA 919613**

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 **06-12-2023**
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 10490976	B2	26-11-2019	EP 3462555 A1	03-04-2019
			FR 3071676 A1	29-03-2019
			US 2019097391 A1	28-03-2019

EP 3745473	A1	02-12-2020	EP 3745473 A1	02-12-2020
			FR 3095893 A1	13-11-2020
			US 2020358254 A1	12-11-2020

US 2004076198	A1	22-04-2004	CN 1497808 A	19-05-2004
			EP 1411606 A2	21-04-2004
			JP 2004140371 A	13-05-2004
			US 2004076198 A1	22-04-2004

US 10411434	B2	10-09-2019	EP 3447549 A1	27-02-2019
			FR 3070505 A1	01-03-2019
			US 2019067904 A1	28-02-2019
