

⑤④ Modulateur de phase et procédé de réalisation.

②② Date de dépôt : 13.09.21.

③③ Priorité :

⑥⑥ 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 à caractère industriel et
commercial — FR.*

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 17.03.23 Bulletin 23/11.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 08.09.23 Bulletin 23/36.

⑦② Inventeur(s) : GUERBER Sylvain, FAUGIER-
TOVAR Jonathan et FOWLER David.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦③ Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
*Etablissement public à caractère industriel et
commercial.*

⑦④ Mandataire(s) : CABINET HAUTIER.



Description

Titre de l'invention : Modulateur de phase et procédé de réalisation

Domaine technique

- [0001] Le domaine de l'invention est celui de la photonique intégrée sur puce. L'invention concerne plus particulièrement la réalisation de modulateurs de phase. Ces modulateurs de phase peuvent avantageusement être utilisés dans des circuits de type « réseaux optiques d'antennes phasées » généralement dénommés OPA (acronyme de « Optical Phased Array »), par exemple pour la conception de systèmes de télé-détection par laser appelés LIDAR (acronyme de « laser imaging detection and ranging » soit en français « détection et estimation de la distance par laser »).

ETAT DE LA TECHNIQUE

- [0002] Un système LiDAR peut combiner deux principales fonctions qui sont la mesure de distance par un faisceau laser et le balayage du faisceau dans l'espace. Dans les systèmes actuels, cette dernière fonction est généralement assurée par un jeu de miroirs orientables. Ce type de solution nécessite une mécanique de haute précision et présente plusieurs inconvénients liés notamment à l'encombrement, à la consommation, à la fiabilité et au coût.
- [0003] Une nouvelle génération de LiDARs basée sur des réseaux d'antennes optiques phasées OPA se développe pour pallier les inconvénients cités ci-dessus.
- [0004] De tels réseaux comprennent une série d'antennes optiques séparées par un pas de réseau de l'ordre de la longueur d'onde du faisceau laser. Chaque antenne optique reçoit une partie du faisceau laser et émet un signal optique. Chaque antenne optique comprend un modulateur de phase configuré pour moduler la phase du signal optique. Il est alors possible de contrôler la différence de phase entre les signaux optiques émis d'une antenne à l'autre. En appliquant un gradient de phase linéaire entre les signaux émis par chaque antenne, l'interférence produite prend la forme d'un faisceau dirigé dans une direction donnée. En modifiant la pente de ce gradient de phase, il est ainsi possible de modifier l'angle d'émission de l'OPA.
- [0005] Pour qu'un OPA produise un faisceau unique, les antennes optiques de l'OPA doivent être proches les unes des autres, avec un pas de réseau de l'ordre de la longueur d'onde du faisceau. Cela pose de nombreux problèmes notamment au niveau des modulateurs de phase qui doivent être très proches les uns des autres en évitant les influences mutuelles entre voisins. Il est donc nécessaire d'isoler les modulateurs de phase entre eux tout en concevant une architecture compacte pour chaque modulateur.
- [0006] Parmi les différents types de modulateurs de phase, les modulateurs de phase thermo-optiques – exploitant la dépendance de l'indice de réfraction d'un matériau à la tem-

pérature – sont généralement préférés. Un tel modulateur de phase thermo-optique connu est divulgué dans le document « A Design Study of Efficiency Enhancement in Silicon Photonic Thermo-Optic Phase Shifters,» Francis Smith *et al.*, IEEE, 2019 » et schématiquement illustré à la [Fig.1]. Un élément chauffant 13, par exemple un barreau de TiN, est généralement placé au-dessus du guide d'onde 11 de façon à le chauffer. Des tranchées 21, 22 d'isolation sont généralement formées de part et d'autre du modulateur 1, de façon à confiner la chaleur produite par l'élément chauffant au niveau du guide d'onde. Cela permet d'éviter une diffusion de chaleur dans d'autres modulateurs adjacents. Cela permet également d'augmenter l'efficacité de modulation du modulateur, en augmentant la variation de température au niveau du guide d'onde pour une puissance électrique donnée.

[0007] Pour respecter les tolérances de fabrication, le pas de réseau pr séparant deux modulateurs 1 thermo-optiques adjacents est au minimum de $1,2\ \mu\text{m}$. Pour une longueur d'onde λ de fonctionnement de 905 nm, cela correspond à pr $\approx 1,3\ \lambda$. La compacité de ce modulateur thermo-optique n'est donc pas suffisante, notamment pour certaines applications de type OPA fonctionnant à des longueurs d'onde submicroniques. Par ailleurs, la fréquence de modulation d'un tel modulateur est limitée par les phénomènes de diffusion / dissipation thermique.

[0008] Il existe donc un besoin consistant à améliorer la compacité d'un modulateur de phase thermo-optique et/ou la fréquence de modulation d'un tel modulateur.

[0009] Un objectif de la présente invention est de répondre à ce besoin et de proposer un modulateur de phase thermo-optique qui pallie au moins en partie certains des inconvénients précédemment cités.

[0010] Un autre objet de la présente invention concerne un procédé de réalisation d'un tel modulateur de phase thermo-optique.

RESUME

[0011] Pour atteindre cet objectif, selon un mode de réalisation on prévoit un modulateur de phase thermo-optique comprenant un empilement selon une première direction z, ledit empilement comprenant un guide d'onde configuré pour guider un faisceau lumineux de longueur d'onde λ selon une deuxième direction x, une couche d'encapsulation surmontant le guide d'onde et un élément dit chauffant configuré pour chauffer le guide d'onde, ledit élément chauffant surmontant la couche d'encapsulation. Le modulateur comprend en outre des première et deuxième tranchées s'étendant de part et d'autre de l'empilement.

[0012] Avantageusement, le guide d'onde, la couche d'encapsulation et l'élément chauffant présentent chacun des premiers et deuxièmes flancs tels que les premiers flancs du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant forment au moins en partie un flanc de la première tranchée, et les deuxièmes flancs du guide d'onde, de

la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant forment au moins en partie un flanc de la deuxième tranchée.

- [0013] Les flancs du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant débouchent ainsi directement dans les tranchées bordant le modulateur.
- [0014] Le modulateur présente donc un encombrement en largeur réduit par rapport au modulateur connu illustré à la [Fig.1]. La compacité du modulateur est augmentée. Cela permet de rapprocher les modulateurs entre eux, par exemple dans le cas d'un système optique de type OPA.
- [0015] Par ailleurs, le guide d'onde est directement au contact de l'air circulant dans les tranchées. Cela permet d'améliorer le confinement thermique au sein du guide d'onde. La puissance nécessaire pour chauffer le guide d'onde est diminuée. L'efficacité du modulateur est ainsi améliorée.
- [0016] En outre, l'air circulant dans les tranchées présente un faible indice de réfraction. Cela augmente le confinement optique du faisceau dans le guide d'onde, par contraste d'indices.
- [0017] Dans l'architecture connue et illustrée à la [Fig.1], un espace résiduel, typiquement de l'ordre de 150nm, est nécessairement prévu entre les flancs du guide et ceux de la tranchée. Cet espace résiduel sert notamment à tolérer les erreurs d'alignement entre les étapes de lithographie des guides d'onde et des tranchées, lors de la fabrication du modulateur.
- [0018] Selon un autre aspect de la présente invention, un procédé de réalisation du modulateur tel que décrit dans le mode de réalisation ci-dessus est proposé.
- [0019] Selon un mode de réalisation on prévoit un procédé de réalisation d'au moins un modulateur de phase thermo-optique comprenant un empilement selon une première direction z , ledit empilement comprenant un guide d'onde configuré pour guider un faisceau lumineux de longueur d'onde λ selon une deuxième direction x , une couche d'encapsulation surmontant le guide d'onde, un élément dit chauffant configuré pour chauffer le guide d'onde et surmontant la couche d'encapsulation, ledit modulateur comprenant en outre des première et deuxième tranchées s'étendant de part et d'autre de l'empilement.
- [0020] Le procédé comprend :
 - Une formation d'un empilement de base comprenant, selon la première direction z , un motif de guide d'onde, une couche d'encapsulation initiale surmontant le motif de guide d'onde, et l'élément chauffant surmontant la couche d'encapsulation initiale,
 - Une gravure de l'empilement de base selon la première direction z , configurée pour former les première et deuxième tranchées et l'empilement bordé par lesdites première et deuxième tranchées, le guide d'onde étant obtenu à partir

du motif de guide d'onde, et la couche d'encapsulation étant obtenue à partir de la couche d'encapsulation initiale.

- [0021] Avantageusement, l'élément chauffant forme un masque de gravure lors de la formation par gravure des première et deuxième tranchées, de sorte que le guide d'onde, la couche d'encapsulation et l'élément chauffant présentent chacun des premiers et deuxièmes flancs tels que les premiers flancs du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant forment au moins en partie un flanc de la première tranchée, et les deuxièmes flancs du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant forment au moins en partie un flanc de la deuxième tranchée.
- [0022] L'élément chauffant présente ainsi des flancs formant en partie des flancs des première et deuxième tranchées.
- [0023] Ainsi, il n'est plus nécessaire de prévoir un espace résiduel pour tolérer un désalignement entre l'élément chauffant et un masque de gravure externe pour la gravure des tranchées, puisque l'élément chauffant lui-même sert de masque de gravure pour la formation des tranchées.
- [0024] La gravure des tranchées est dès lors auto-alignée avec l'élément chauffant. Les première et deuxième tranchées sont rapprochées l'une de l'autre. Cela permet de réduire l'encombrement en largeur du modulateur.
- [0025] Par ailleurs, l'utilisation de l'élément chauffant en tant que masque de gravure permet d'éviter de recourir à un masque de gravure supplémentaire. Le nombre d'étapes du procédé est diminué.
- [0026] De façon préférée, lors de la formation de l'empilement, le motif de guide d'onde est défini de sorte à présenter, en projection selon la première direction z , une zone dite élargie destinée à former une zone de modulation du guide d'onde et présentant une largeur L prise selon une troisième direction y , et l'élément chauffant est défini de sorte à présenter une largeur L_c selon la troisième direction y , telle que $L_c < L$ de sorte que, lors de la formation par gravure des première et deuxième tranchées, la zone élargie du motif de guide d'onde soit au moins en partie gravée selon la première direction z . Le guide d'onde, au niveau de sa zone de modulation, présente ainsi des flancs formant en partie des flancs des première et deuxième tranchées. L'élément chauffant est alors auto-aligné avec le guide d'onde.
- [0027] L'utilisation d'une zone élargie permet avantageusement de tolérer les erreurs d'alignement entre l'élément chauffant et le motif de guide d'onde sous-jacent. La contrainte sur l'alignement est ainsi relâchée. Des équipements standards de lithographie peuvent être utilisés. Le coût du procédé est diminué.
- [0028] Un autre aspect de l'invention concerne un réseau d'antennes optiques phasées (OPA) comprenant une pluralité de modulateurs de phase thermo-optiques tels que

décrits ci-dessus, séparés par un pas de réseau p_r . Le pas de réseau p_r est environ égal à une longueur d'onde λ d'un faisceau lumineux se propageant dans les guides d'onde du réseau, en fonctionnement. Le pas de réseau p_r est de préférence inférieur à $1\ \mu\text{m}$. Une application avantageuse concerne la fabrication d'OPA compact fonctionnant à une longueur d'onde de l'ordre de $905\ \text{nm}$.

[0029] Les autres objets, caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à l'examen de la description suivante et des dessins d'accompagnement. Il est entendu que d'autres avantages peuvent être incorporés. En particulier, certaines caractéristiques et certains avantages du modulateur peuvent s'appliquer *mutatis mutandis* au système optique de type OPA et/ou au procédé de fabrication de ce modulateur, et réciproquement.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0030] Les buts, objets, ainsi que les caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront mieux de la description détaillée de modes de réalisation de cette dernière qui sont illustrés par les dessins d'accompagnement suivants dans lesquels :

[0031] [Fig.1] La [Fig.1] illustre schématiquement en coupe transverse un modulateur de phase thermo-optique selon l'art antérieur.

[0032] [Fig.2] La [Fig.2] illustre schématiquement en coupe transverse un modulateur de phase thermo-optique selon un mode de réalisation de la présente invention.

[0033] [Fig.3A] Les figures nA ($n=3\dots 8$) illustrent schématiquement en vue de dessus une étape de réalisation d'un modulateur de phase thermo-optique selon un mode de réalisation de la présente invention.

[0034] [Fig.3B] Les figures nB ($n=3\dots 8$) illustrent schématiquement en coupe transverse selon le plan C-C l'étape de réalisation d'un modulateur de phase thermo-optique illustrée à la figure nA correspondante, selon un mode de réalisation de la présente invention.

[0035] [Fig.4A]

[0036] [Fig.4B]

[0037] [Fig.5A]

[0038] [Fig.5B]

[0039] [Fig.6A]

[0040] [Fig.6B]

[0041] [Fig.7A]

[0042] [Fig.7B]

[0043] [Fig.8A]

[0044] [Fig.8B]

[0045] Les dessins sont donnés à titre d'exemples et ne sont pas limitatifs de l'invention. Ils

constituent des représentations schématiques de principe destinées à faciliter la compréhension de l'invention et ne sont pas nécessairement à l'échelle des applications pratiques. En particulier, sur les schémas de principe, les dimensions des différents éléments (guide d'onde, élément chauffant, zones d'injection, de transition, de modulation...) ne sont pas représentatives de la réalité.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE

- [0046] Avant d'entamer une revue détaillée de modes de réalisation de l'invention, sont énoncées ci-après des caractéristiques optionnelles qui peuvent éventuellement être utilisées en association ou alternativement :
- [0047] Selon un exemple, les premiers flancs du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant débouchent directement dans la première tranchée. Selon un exemple, les deuxièmes flancs du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant débouchent directement dans la deuxième tranchée.
- [0048] Selon un exemple, les premiers flancs du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant sont sensiblement compris dans un même premier plan. Selon un exemple, les deuxièmes flancs du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant sont sensiblement compris dans un même deuxième plan.
- [0049] Selon un exemple, l'élément chauffant présente un sommet exposé à l'air.
- [0050] Selon un exemple, l'élément chauffant s'étend au-delà des tranchées selon la deuxième direction x .
- [0051] Selon un exemple, le guide d'onde comprend une zone de modulation et au moins une zone de transition. Selon un exemple, les tranchées s'étendent tout le long de la zone de modulation et au-delà de l'au moins une zone de transition, selon la deuxième direction x .
- [0052] Selon un exemple, l'élément chauffant est à base de TiN. Selon un exemple, le guide d'onde est à base de SiN ou de Si.
- [0053] Selon un exemple, chaque modulateur est configuré pour moduler une phase d'un faisceau lumineux de longueur d'onde λ se propageant au sein du guide d'onde selon une deuxième direction x . Selon un exemple, deux modulateurs adjacents du réseau d'antennes optiques phasées sont séparés par une tranchée prise parmi les première et deuxième tranchées. Selon un exemple, lesdits modulateurs sont disposés selon une troisième direction y selon un pas du réseau p sensiblement égal à la longueur d'onde λ du faisceau lumineux.
- [0054] Selon un exemple, la longueur d'onde λ et le pas du réseau p sont inférieurs à $1\ \mu\text{m}$.
- [0055] Selon un exemple, lors de la formation par gravure des première et deuxième tranchées, des flancs du guide d'onde sont formés sensiblement au droit des flancs de l'élément chauffant, lesdits flancs du guide d'onde formant au moins en partie les

flancs des première et deuxième tranchées.

- [0056] Selon un exemple, lors de la formation de l'empilement de base, le motif de guide d'onde est défini de sorte à présenter, en projection selon la première direction z , une zone $Z1$ dite élargie destinée à former une zone de modulation du guide d'onde, ladite zone élargie $Z1$ présentant une largeur L prise selon une troisième direction y . Selon un exemple, l'élément chauffant est défini de sorte à présenter une largeur L_c selon la troisième direction y , telle que $L_c < L$, de sorte que, lors de la formation par gravure des première et deuxième tranchées, la zone élargie $Z1$ du motif de guide d'onde soit au moins en partie gravée selon la première direction z .
- [0057] Selon un exemple, le motif de guide d'onde est défini de sorte à présenter, en projection selon la première direction z , une zone d'injection $Z3$ de largeur l selon la troisième direction y telle que $l < L_c < L$, et une zone de transition $Z2$ intercalée entre la zone d'injection $Z3$ et la zone élargie $Z1$, de sorte que les flancs de l'élément chauffant interceptent des bords de la zone de transition $Z2$, en projection selon la première direction z .
- [0058] Selon un exemple, l'élément chauffant recouvre, en projection selon la première direction z , une partie de la zone de transition $Z2$ et une partie de la zone d'injection $Z3$, de sorte que les première et deuxième tranchées s'étendent au-delà de la zone de transition $Z2$ selon la deuxième direction x .
- [0059] Selon un exemple, la gravure de l'empilement de base se fait au travers d'une ouverture d'un masque à base de résine au-dessus de l'élément chauffant, ladite ouverture présentant une première dimension l_{31} selon la deuxième direction x inférieure à une longueur l_c de l'élément chauffant 13 selon ladite deuxième direction x , et une deuxième dimension L_{31} selon une troisième direction y supérieure à une largeur L_c de l'élément chauffant selon ladite troisième direction y .
- [0060] Selon un exemple, la formation par gravure des première et deuxième tranchées comprend au moins une première gravure configurée pour graver la couche d'encapsulation initiale et au moins une deuxième gravure configurée pour graver le motif de guide d'onde.
- [0061] Selon un exemple, l'au moins un modulateur comprend un premier modulateur et un deuxième modulateur séparés par une tranchée prise parmi les première et deuxième tranchées. Selon un exemple, le premier modulateur comprend un premier élément chauffant et le deuxième modulateur comprend un deuxième élément chauffant, lesdits premier et deuxième éléments chauffants (13) étant séparés par un pas de réseau p_r inférieur à $1\ \mu\text{m}$, pris selon la troisième direction y .
- [0062] Selon un exemple, la formation de l'empilement de base comprend une définition de premier et deuxième motifs de guide d'onde présentant respectivement des première et deuxième zones élargies $Z1$ continues entre elles.

- [0063] Sauf incompatibilité, des caractéristiques techniques décrites en détail pour un mode de réalisation donné peuvent être combinées aux caractéristiques techniques décrites dans le contexte d'autres modes de réalisation décrits à titre exemplaire et non limitatif, de manière à former un autre mode de réalisation qui n'est pas nécessairement illustré ou décrit. Un tel mode de réalisation n'est évidemment pas exclu de l'invention.
- [0064] Dans le cadre de la présente invention, le guide d'onde est destiné à assurer la propagation d'un faisceau lumineux selon une direction principale de propagation, prise selon l'axe x dans les dessins d'accompagnement. Le faisceau lumineux est de préférence cohérent, monochromatique, et de longueur d'onde λ . Il se propage de préférence selon un unique mode de propagation optique, typiquement le mode optique fondamental. Le faisceau lumineux est alors dit « monomode ».
- [0065] Il est précisé que, dans le cadre de la présente invention, les termes « sur », « surmonte », « recouvre », « sous-jacent », en « vis-à-vis » et leurs équivalents ne signifient pas forcément « au contact de ». Ainsi par exemple, le dépôt d'une première couche sur une deuxième couche, ne signifie pas obligatoirement que les deux couches sont directement au contact l'une de l'autre, mais signifie que la première couche recouvre au moins partiellement la deuxième couche en étant soit directement à son contact, soit en étant séparée d'elle par au moins une autre couche ou au moins un autre élément.
- [0066] Une couche peut par ailleurs être composée de plusieurs sous-couches d'un même matériau ou de matériaux différents.
- [0067] On entend par un substrat, un élément, une couche, « à base » d'un matériau A, un substrat, un élément, une couche comprenant ce matériau A uniquement ou ce matériau A et éventuellement d'autres matériaux, par exemple des éléments d'alliage et/ou des éléments dopants. Ainsi, un guide d'onde à base de nitrure de silicium SiN peut par exemple comprendre du nitrure de silicium non stœchiométrique (Si_xN_x), ou du nitrure de silicium stœchiométrique (Si_3N_4).
- [0068] On entend par « gravure sélective vis-à-vis de » ou « gravure présentant une sélectivité vis-à-vis de » une gravure configurée pour enlever un matériau A ou une couche A vis-à-vis d'un matériau B ou d'une couche B, et présentant une vitesse de gravure du matériau A supérieure à la vitesse de gravure du matériau B. La sélectivité est le rapport entre la vitesse de gravure du matériau A sur la vitesse de gravure du matériau B.
- [0069] Un repère de préférence orthonormé, comprenant les axes x, y, z est représenté sur les figures annexées. Lorsqu'un seul repère est représenté sur une même planche de figures, ce repère s'applique à toutes les figures de cette planche.
- [0070] Sauf mention contraire, les largeurs sont prises selon la direction y du repère annexé. Lorsque les flancs ne sont pas parfaitement parallèles entre eux, par exemple à cause

des imperfections liées aux procédés de fabrication, la largeur retenue peut être la valeur de largeur mesurée la plus élevée, ou la valeur moyenne de largeur le long de la hauteur des flancs. Par exemple, la largeur d'un guide d'onde peut être mesurée au niveau de son sommet. La largeur d'une tranchée peut être mesurée entre les sommets de deux guides d'onde adjacents. La propagation du faisceau lumineux se fait typiquement selon x.

- [0071] Les termes relatifs tels que « sur », « surmonte », « sous », « sous-jacent », « au-dessus », « en-dessous » se réfèrent à des positions prises selon la direction z. Cette liste de termes n'est pas exhaustive. D'autres termes relatifs pourront être facilement précisés au besoin, en se référant aux dessins d'accompagnement.
- [0072] Dans la présente demande de brevet, la hauteur et la profondeur sont prises selon z.
- [0073] Les termes « vertical », « verticalement » se réfèrent à une direction selon z. Les termes « horizontal », « horizontalement » se réfèrent à une direction dans le plan xy. Le terme « latéral », lorsqu'il s'agit d'un déplacement ou d'un positionnement, se réfère également à une direction dans le plan xy, typiquement la direction y.
- [0074] Un élément situé « à l'aplomb » ou « au droit d' » un autre élément signifie que ces deux éléments sont situés tous deux sur une même ligne orientée verticalement sur les figures.
- [0075] La [Fig.2] illustre un modulateur 1 de phase thermo-optique selon un mode de réalisation de la présente invention. Le modulateur 1 comprend en empilement selon z un guide d'onde 11, une couche d'encapsulation 12, et un élément chauffant 13. Le guide d'onde 11 repose typiquement sur une base 14 en un matériau pouvant présenter un indice de réfraction proche de celui de la couche d'encapsulation 12. De préférence, la couche d'encapsulation 12 et la base 14 sont en un même matériau. La base 14 et la couche d'encapsulation 12 permettent typiquement de confiner le faisceau lumineux au sein du guide d'onde 11 par contraste d'indices. Ainsi, l'indice de réfraction du matériau de guide d'onde 11 est typiquement supérieur aux indices de réfraction des matériaux de la base 14 de la couche d'encapsulation 12. Selon un exemple, le guide d'onde 11 est à base de nitrure de silicium et la base 14 et la couche d'encapsulation 12 sont à base d'oxyde de silicium. Selon un autre exemple, les guides d'onde 11 est à base de silicium et la base 14 et la couche d'encapsulation 12 sont à base d'oxyde de silicium. La base 14 repose typiquement sur un substrat, par exemple un substrat massif à base de silicium.
- [0076] Le modulateur 1 est bordé par des tranchées 21, 22 de largeur L_t selon y, et de profondeur d_p selon z. La largeur L_t est de préférence comprise entre 200 nm et 1 μ m, typiquement de l'ordre de 300 nm. La profondeur d_p est de préférence comprise entre quelques centaines de nanomètres et quelques microns. Les tranchées 21, 22 s'étendent de préférence selon z jusqu'au sein de la couche formant la base 14, voire jusqu'à

l'interface entre la base 14 et le substrat. Le substrat peut servir de couche d'arrêt pour la gravure des tranchées 21, 22. L'empilement 10 repose ainsi sur une partie 14s en saillie de la base 14 ou du substrat. Cette partie 14s en saillie peut présenter une hauteur de quelques centaines de nanomètres. Cela permet d'augmenter le confinement thermique au sein du guide d'onde 11. Selon une possibilité alternative, l'empilement 10 repose sur une base 14 sous forme de couche plane. Dans ce cas, les tranchées 21, 22 s'arrêtent sensiblement dans le plan de l'interface 141 entre le guide d'onde 11 et la base 14. Selon une autre possibilité, les tranchées 21, 22 s'arrêtent au-dessus du plan de l'interface 141. Dans ce dernier cas, la section du guide d'onde 11 dans le plan yz peut présenter une forme en T inversé. Une telle géométrie correspond à un guide d'onde en arête.

- [0077] Le guide d'onde 11 présente des flancs 111, 112 débouchant chacun dans les tranchées 21, 22. Les flancs 111, 112 ne sont pas couverts par un matériau d'encapsulation. Ils forment ainsi directement une partie des flancs 210, 220 des tranchées correspondantes 21, 22. Une fine couche dite *liner*, de l'ordre de quelques nanomètres d'épaisseur, typiquement d'épaisseur inférieure à 10 nm, peut éventuellement couvrir les flancs 111, 112 du guide d'onde 11.
- [0078] La couche d'encapsulation 12 présente des flancs 121, 122 débouchant chacun dans les tranchées 21, 22. Les flancs 121, 122 sont sensiblement dans le prolongement des flancs 111, 112, respectivement.
- [0079] L'élément chauffant 13 surmonte la couche d'encapsulation 12. Il est typiquement à base de TiN. Il peut comprendre d'autres couches, par exemple une couche d'accroche en Ti. Selon un exemple, l'élément chauffant 13 comprend une couche d'accroche en Ti de 10 nm surmontée par une couche en TiN de 100 nm. L'élément chauffant 13 permet typiquement de chauffer par effet Joule le guide d'onde 11. L'élément chauffant 13 présente une largeur L_c selon y typiquement comprise entre 300 nm et 1000 nm, par exemple de l'ordre de 600 nm. L'élément chauffant 13 présentent des flancs 131, 132 débouchant chacun dans les tranchées 21, 22. Les flancs 131, 132 ne sont pas couverts par un matériau d'encapsulation. Ils forment ainsi directement une partie des flancs 210, 220 des tranchées correspondantes 21, 22. Les flancs 131, 132 sont sensiblement dans le prolongement des flancs 121, 122, respectivement. L'élément chauffant 13 présente un sommet 133 de préférence non couvert par un matériau d'encapsulation. Le sommet 133 peut être exposé à l'air.
- [0080] Les flancs 111, 121, 131 forment au moins en partie un flanc 210 de la tranchée 21. Ils sont de préférence sensiblement compris dans un même plan P1. Les flancs 112, 122, 132 forment au moins en partie un flanc 220 de la tranchée 22. Ils sont de préférence sensiblement compris dans un même plan P2. Les plans P1, P2 sont de préférence idéalement verticaux et parallèles entre eux. En pratique, ces plans P1, P2

peuvent présenter un angle de quelques degrés par rapport à la verticale. Les flancs 210, 220 présentent dès lors une légère pente, typiquement due à la gravure des tranchées 21, 22. Les tranchées 21, 22 sont ainsi disposées au plus près de l'empilement 10. Cela permet de réduire l'encombrement latéral du modulateur 1. Cela permet également de réduire le volume total à chauffer par l'élément chauffant 13. Le chauffage du guide d'onde 11 se fait donc de manière plus efficace. Cela réduit la consommation d'énergie du modulateur 1.

- [0081] Les tranchées 21, 22 sont de préférence remplies d'air. Cela permet de confiner efficacement la chaleur produite dans le guide d'onde 11, lors d'une modulation par effet thermo-optique. La fréquence de modulation peut ainsi être augmentée. Cela permet également de confiner efficacement le faisceau lumineux au sein du guide d'onde 11, par contraste d'indice entre le guide d'onde 11 et l'air. Selon une possibilité, les tranchées 21, 22 peuvent être remplies par un matériau de remplissage.
- [0082] Comme illustré à la [Fig.2], plusieurs modulateurs 1 peuvent être disposés les uns à côté des autres, selon un pas de réseau pr minimisé. Un réseau 2 d'antennes optiques phasées compact peut ainsi être obtenu. En particulier, un pas de réseau pr inférieur au micron, par exemple de l'ordre de 900 nm, peut être réalisé. Cela permet de réaliser des OPA 2 fonctionnant pour des longueurs d'onde submicroniques, typiquement à une longueur d'onde $\lambda \approx 905$ nm.
- [0083] Les figures 3A à 8B illustrent un procédé de fabrication d'un modulateur 1 et/ou d'un réseau 2 d'antennes optiques phasées. Les figures nA, nB (n=3...8) illustrent respectivement en vue de dessus et en coupe transverse selon le plan C-C, une étape du procédé.
- [0084] Comme illustré aux figures 3A, 3B, lors de la formation de l'empilement de base, un motif 110 de guide d'onde est d'abord défini. Deux motifs 110 de guide d'onde sont illustrés à la [Fig.3A]. Chaque motif 110 comprend de préférence une zone élargie Z1 de largeur L, et de préférence une zone d'injection Z3 de largeur l, et de préférence une zone de transition Z2 intercalée entre la zone élargie Z1 et la zone d'injection Z3. La largeur l de la zone d'injection Z3 est de préférence comprise entre 300 nm et 600 nm. La largeur L de la zone élargie Z1 est strictement supérieure à la largeur l. Elle est de préférence comprise entre 600 nm et 2 μ m.
- [0085] La zone élargie Z1 est destinée à former une zone de modulation du modulateur 1. La zone d'injection Z3 est destinée à injecter le faisceau lumineux, de préférence de façon monomode, dans la zone de modulation. La zone de transition Z2, également dénommée *taper* en anglais, est destinée à guider le faisceau lumineux depuis la zone d'injection Z3 vers la zone de modulation. Cette zone de transition Z2 présente ainsi typiquement une forme tronconique, ou d'hexaèdre à deux faces parallèles trapézoïdales, vue de dessus. De façon symétrique, des zones Z2', Z3' sont de préférence

prévues sur le côté opposé du modulateur, en sortie de la zone de modulation. Sur les figures 3A, 3B, les motifs 110 de guide d'onde sont continus entre eux par l'intermédiaire de leurs zones élargies Z1 respectives. Selon une autre possibilité, les motifs 110 de guide d'onde peuvent être disjoints.

[0086] Comme illustré aux figures 4A, 4B, après définition des motifs 110 et formation de la couche d'encapsulation initiale 12a, le ou les éléments chauffants 13 sont formés. Le ou les empilements de base 10a sont ainsi obtenus. Chaque élément chauffant 13 présente une longueur l_c et une largeur L_c avec $L_c < L$, et de préférence $L_c > l$. La largeur L_c de l'élément chauffant 13 est de préférence comprise entre 300 nm et 900 nm, par exemple 600 nm. Avantagusement, la définition d'une zone élargie Z1 de largeur L strictement supérieure à la largeur L_c de l'élément chauffant 13 permet de tolérer une erreur de positionnement selon y de l'élément chauffant 13 vis-à-vis de la zone de modulation du modulateur. Ainsi, même si un décalage de quelques dizaines de nanomètres selon y survient lors de la formation de l'élément chauffant 13, ce dernier couvre toujours sur toute sa largeur L_c une partie sous-jacente de la zone élargie Z1 du motif 110 de guide d'onde. Ainsi, après gravure, les flancs de la zone de modulation du guide d'onde se trouvent toujours sensiblement à l'aplomb des flancs de l'élément chauffant 13.

[0087] L'élément chauffant 13 s'étend de préférence selon x au-delà des zones de transition Z2, Z2', de préférence jusqu'aux zones d'injection Z3, Z3'. L'élément chauffant 13 intercepte ainsi, en projection selon z , les bords 230 de la zone de transition sous-jacente. La zone de transition Z2 permet également de tolérer un décentrage selon y de l'élément chauffant 13 vis-à-vis de la zone d'injection Z3. Le faisceau lumineux peut ainsi rester monomode lors de son injection dans la zone de modulation. Cela permet en particulier d'éviter des pertes d'insertion dans la zone de modulation. La formation de l'élément chauffant 13 peut se faire de façon classique par dépôt/lithographie/gravure ou par « lift off » (décollement en français).

[0088] Comme illustré aux figures 5A, 5B, après formation du ou des éléments chauffants 13, des contacts électriques 14, 14' peuvent être formés de part et d'autre de chaque élément chauffant 13. Les contacts 14, 14' peuvent être formés directement sur l'élément chauffant 13, ou être connectés de façon classique par des vias 140, comme illustré sur la [Fig.5B]. Une couche d'encapsulation, typiquement à base du même matériau que la couche d'encapsulation 12, est de préférence formée sur et autour des éléments chauffants 13, et planarisée.

[0089] Comme illustré aux figures 6A, 6B, un masque de gravure 30, typiquement à base de résine photosensible, est ensuite formé au-dessus des éléments chauffants 13, par exemple à la surface de la couche d'encapsulation entourant les éléments chauffants. Le masque de gravure 30 comprend une ouverture 31 plus large ($L_{31} > L_c$) et moins

longue ($l_{31} < l_c$) que les éléments chauffants 13. Cette ouverture 31 est également plus large et plus longue que la ou les zones élargies Z1 sous-jacentes. Cela permet ensuite de graver les parties des zones élargies Z1 non couvertes par les éléments chauffants 13. Cette ouverture 31 s'étend de préférence selon x au-delà de la zone de transition Z2, et de préférence jusqu'à la zone d'injection Z3.

[0090] Comme illustré aux figures 7A, 7B, des tranchées 21, 22 sont ensuite formées par gravure au travers de l'ouverture 31 du masque de gravure 30. Les éléments chauffants 13 forment avantageusement un masque de gravure complémentaire au masque 30. Ainsi, lors de la gravure, les matériaux situés au-dessus des éléments chauffants, et les matériaux situés entre les éléments chauffants, en projection selon z, sont au moins en partie retirés. A l'issue de la gravure, les tranchées sont formées sur une profondeur d_p et les éléments chauffants sont exposés, sous l'ouverture 31. Le haut des tranchées se trouve au niveau du sommet de l'élément chauffant, et le fond des tranchées se trouve typiquement dans la couche de base sous le niveau du guide d'onde. La profondeur d_p des tranchées 21, 22 est ainsi limitée par rapport à celle du modulateur connu illustré à la [Fig.1]. Cela permet de mieux maîtriser le profil de gravure. Selon une possibilité, la gravure des tranchées 21, 22 se fait selon une seule et même étape de gravure.

[0091] Selon une possibilité préférée, la gravure des tranchées 21, 22 se fait en plusieurs étapes de gravure successives. Ainsi, une première gravure est configurée pour graver de façon anisotrope selon z le matériau de la ou des couches d'encapsulation. Cette première gravure est de préférence sélective vis-à-vis du matériau de l'élément chauffant 13. Pour une couche d'encapsulation à base de SiO_2 , la première gravure est par exemple effectuée par plasma à base d'une chimie fluorée CF_4 et CHF_3 . Cette première gravure est de préférence configurée pour s'arrêter sur le motif 110 de guide d'onde. Une deuxième gravure peut ensuite être effectuée pour graver de façon anisotrope selon z le motif 110 de guide d'onde. Pour un motif 110 à base de SiN , cette deuxième gravure peut être effectuée par plasma à base d'une chimie Ar/O_2 . Cela permet de limiter la rugosité des flancs 111, 112 du guide d'onde 11. De façon préférée, la deuxième gravure est arrêtée après que le motif 110 ait été gravé sur toute sa hauteur. Selon une autre possibilité, par exemple pour former un guide d'onde en arête, la deuxième gravure est arrêtée avant que le motif 110 ait été gravé sur toute sa hauteur. Optionnellement, une troisième gravure peut être effectuée pour graver au moins en partie la couche de base 14 sur laquelle repose l'empilement. Pour une couche de base 14 à base de SiO_2 , cette troisième gravure peut être effectuée avec les mêmes paramètres que la première gravure. L'utilisation de gravures spécifiques en fonction des différents matériaux à graver permet de mieux maîtriser le profil de gravure des tranchées. Les flancs 210, 220 des tranchées 21, 22 peuvent dès lors être sensiblement plans.

- [0092] Comme illustré aux figures 8A, 8B, après formation des tranchées 21, 22, le masque de gravure 30 est retiré. Un modulateur 1 de phase thermo-optique et/ou un réseau OPA sont ainsi obtenus. Ce procédé est parfaitement compatible avec les technologies classiques de la microélectronique. Il limite éventuellement le nombre d'étapes nécessaires par rapport à un procédé de fabrication classique.
- [0093] L'invention n'est pas limitée aux modes de réalisations précédemment décrits. Par exemple, le guide 11 n'est pas forcément rectiligne. Le guide 11 peut être un anneau. La zone d'injection Z3 peut se situer dans un plan inférieur à celui de la zone de modulation du guide d'onde 11, avec un couplage vertical entre lesdites zones. Une telle géométrie peut être envisagée avec ou sans *taper* sur l'un ou l'autre des niveaux.

Revendications

- [Revendication 1] Modulateur (1) de phase thermo-optique comprenant un empilement (10) selon une première direction (z), ledit empilement (10) comprenant un guide d'onde (11) configuré pour guider un faisceau lumineux de longueur d'onde λ selon une deuxième direction (x), une couche d'encapsulation (12) surmontant le guide d'onde (11) et un élément (13) dit chauffant configuré pour chauffer le guide d'onde (11), ledit élément chauffant (13) surmontant la couche d'encapsulation (12), ledit modulateur (1) comprenant en outre des première et deuxième tranchées (21, 22) s'étendant de part et d'autre de l'empilement (10), le modulateur (1) étant caractérisé en ce que le guide d'onde (11), la couche d'encapsulation (12) et l'élément chauffant (13) présentent chacun des premiers et deuxièmes flancs (111, 112, 121, 122, 131, 132) tels que les premiers flancs (111, 121, 131) du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant forment au moins en partie un flanc (210) de la première tranchée (21), et les deuxièmes flancs (112, 122, 132) du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant forment au moins en partie un flanc (220) de la deuxième tranchée (22).
- [Revendication 2] Modulateur (1) selon la revendication précédente dans lequel les premiers flancs (111, 121, 131) du guide d'onde (11), de la couche d'encapsulation (12) et de l'élément chauffant (13) débouchent directement dans la première tranchée (21) et dans lequel les deuxièmes flancs (112, 122, 132) du guide d'onde (11), de la couche d'encapsulation (12) et de l'élément chauffant (13) débouchent directement dans la deuxième tranchée (22).
- [Revendication 3] Modulateur (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel les premiers flancs (111, 121, 131) du guide d'onde (11), de la couche d'encapsulation (12) et de l'élément chauffant (13) sont sensiblement compris dans un même premier plan (P1), et dans lequel les deuxièmes flancs (112, 122, 132) du guide d'onde (11), de la couche d'encapsulation (12) et de l'élément chauffant (13) sont sensiblement compris dans un même deuxième plan (P2).
- [Revendication 4] Modulateur (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel l'élément chauffant (13) s'étend au-delà des tranchées (21, 22) selon la deuxième direction (x).
- [Revendication 5] Modulateur (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes

dans lequel le guide d'onde (11) comprend une zone de modulation et au moins une zone de transition (Z2, Z2'), et dans lequel les tranchées (21, 22) s'étendent tout le long de la zone de modulation et au-delà de l'au moins une zone de transition (Z2, Z2'), selon la deuxième direction (x).

[Revendication 6] Modulateur (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel le guide d'onde (11) est à base de SiN ou de Si.

[Revendication 7] Réseau (2) d'antennes optiques phasées comprenant une pluralité de modulateurs (1) de phase thermo-optiques selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel deux modulateurs (1) adjacents sont séparés par une tranchée (22) prise parmi les première et deuxième tranchées (21, 22), lesdits modulateurs (1) étant disposés selon une troisième direction (y) selon un pas du réseau pr sensiblement égal à la longueur d'onde λ du faisceau lumineux.

[Revendication 8] Réseau (2) d'antennes optiques phasées selon la revendication précédente dans lequel la longueur d'onde λ et le pas du réseau pr sont inférieurs à 1 μm .

[Revendication 9] Procédé de réalisation d'au moins un modulateur (1) de phase thermo-optique comprenant un empilement (10) selon une première direction (z), ledit empilement (10) comprenant un guide d'onde (11) configuré pour guider un faisceau lumineux de longueur d'onde λ selon une deuxième direction (x), une couche d'encapsulation (12) surmontant le guide d'onde (11), un élément (13) dit chauffant configuré pour chauffer le guide d'onde et surmontant la couche d'encapsulation (12), ledit modulateur (1) comprenant en outre des première et deuxième tranchées (21, 22) s'étendant de part et d'autre de l'empilement (10), le procédé comprenant :

- Une formation d'un empilement de base (10a) comprenant, selon la première direction (z), un motif (110) de guide d'onde, une couche d'encapsulation initiale (12a) surmontant le motif (110) de guide d'onde, et l'élément chauffant (13) surmontant la couche d'encapsulation initiale (12a),
- Une gravure de l'empilement de base selon la première direction (z), configurée pour former les première et deuxième tranchées (21, 22) et l'empilement (10) bordé par lesdites première et deuxième tranchées (21, 22), le guide d'onde (11) étant obtenu à partir du motif de guide d'onde (110), et la

couche d'encapsulation (12) étant obtenue à partir de la couche d'encapsulation initiale (12a),

Le procédé étant caractérisé en ce que l'élément chauffant (13) forme un masque de gravure lors de la formation par gravure des première et deuxième tranchées (21, 22), de sorte que le guide d'onde (11), la couche d'encapsulation (12) et l'élément chauffant (13) présentent chacun des premiers et deuxièmes flancs (111, 112, 121, 122, 131, 132) tels que les premiers flancs (111, 121, 131) du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant forment au moins en partie un flanc (210) de la première tranchée (21), et les deuxièmes flancs (112, 122, 132) du guide d'onde, de la couche d'encapsulation et de l'élément chauffant forment au moins en partie un flanc (220) de la deuxième tranchée (22).

[Revendication 10] Procédé selon la revendication précédente dans lequel, lors de la formation de l'empilement de base (10a), le motif (110) de guide d'onde est défini de sorte à présenter, en projection selon la première direction (z), une zone (Z1) dite élargie destinée à former une zone de modulation du guide d'onde (11) et présentant une largeur L prise selon une troisième direction (y), et l'élément chauffant (13) est défini de sorte à présenter une largeur L_c selon la troisième direction (y), telle que $L_c < L$, de sorte que, lors de la formation par gravure des première et deuxième tranchées (21, 22), la zone élargie (Z1) du motif (110) de guide d'onde soit au moins en partie gravée selon la première direction (z).

[Revendication 11] Procédé selon la revendication précédente dans lequel le motif (110) de guide d'onde est défini de sorte à présenter, en projection selon la première direction (z), une zone d'injection (Z3) de largeur l selon la troisième direction (y) telle que $l < L_c < L$, et une zone de transition (Z2) intercalée entre la zone d'injection (Z3) et la zone élargie (Z1), de sorte que les flancs (131, 132) de l'élément chauffant (13) interceptent des bords (230) de la zone de transition (Z2), en projection selon la première direction (z).

[Revendication 12] Procédé selon la revendication précédente dans lequel l'élément chauffant (13) recouvre, en projection selon la première direction (z), une partie de la zone de transition (Z2) et une partie de la zone d'injection (Z3), de sorte que les première et deuxième tranchées (21,

22) s'étendent au-delà de la zone de transition (Z2) selon la deuxième direction (x).

- [Revendication 13] Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 à 12 dans lequel la formation par gravure des première et deuxième tranchées (21, 22) comprend au moins une première gravure configurée pour graver la couche d'encapsulation initiale (12a) et au moins une deuxième gravure configurée pour graver le motif de guide d'onde (110).
- [Revendication 14] Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 à 13 dans lequel la gravure de l'empilement de base se fait au travers d'une ouverture (31) d'un masque (30) à base de résine au-dessus de l'élément chauffant (13), ladite ouverture (31) présentant une première dimension l31 selon la deuxième direction (x) inférieure à une longueur lc de l'élément chauffant (13) selon ladite deuxième direction (x), et une deuxième dimension L31 selon une troisième direction (y) supérieure à une largeur Lc de l'élément chauffant (13) selon ladite troisième direction (y).
- [Revendication 15] Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 à 14 dans lequel l'au moins un modulateur (1) comprend un premier modulateur et un deuxième modulateur séparés par une tranchée (22) prise parmi les première et deuxième tranchées (21, 22), le premier modulateur comprenant un premier élément chauffant et le deuxième modulateur comprenant un deuxième élément chauffant (13), lesdits premier et deuxième éléments chauffants (13) étant séparés par un pas de réseau pr inférieur à 1 μm , pris selon une troisième direction (y).
- [Revendication 16] Procédé selon la revendication précédente dans lequel la formation de l'empilement de base comprend une définition de premier et deuxième motifs de guide d'onde (110) présentant respectivement des première et deuxième zones élargies (Z1) continues entre elles.

[Fig. 1]

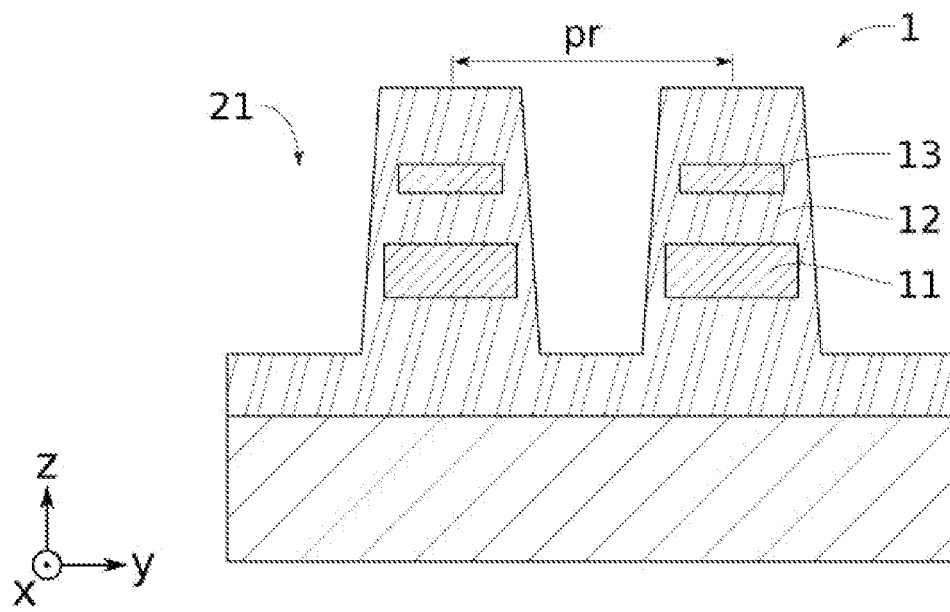


FIG. 1

[Fig. 2]

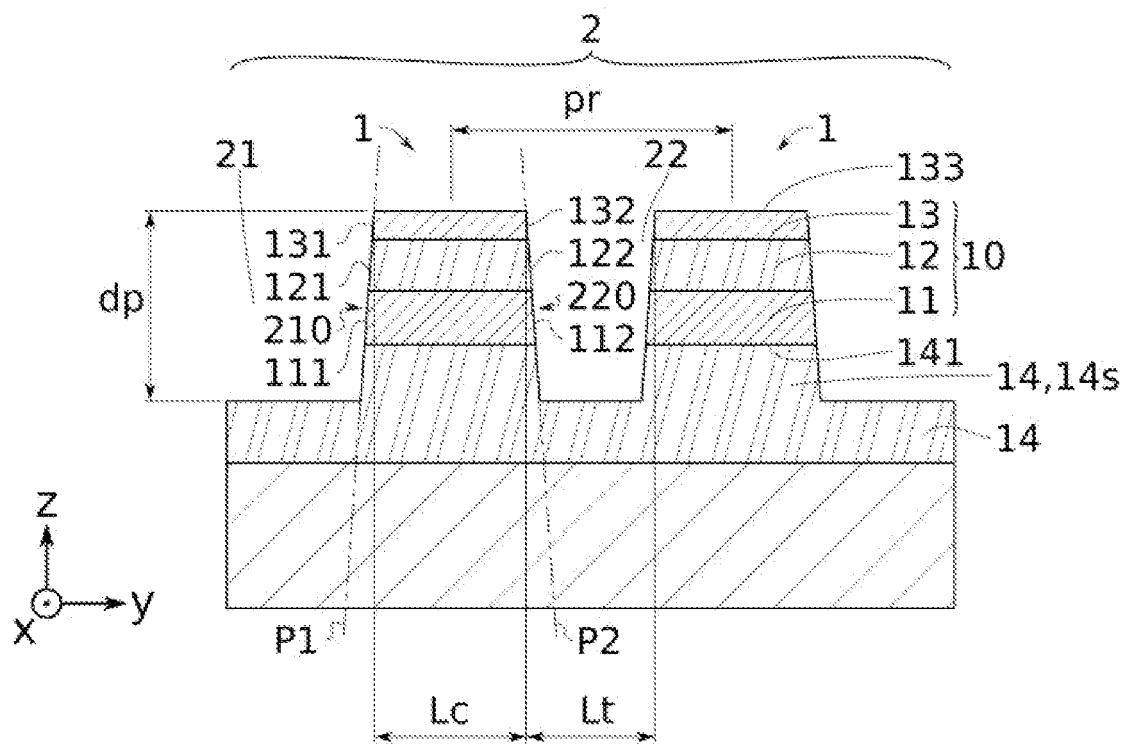


FIG. 2

[Fig. 3A]

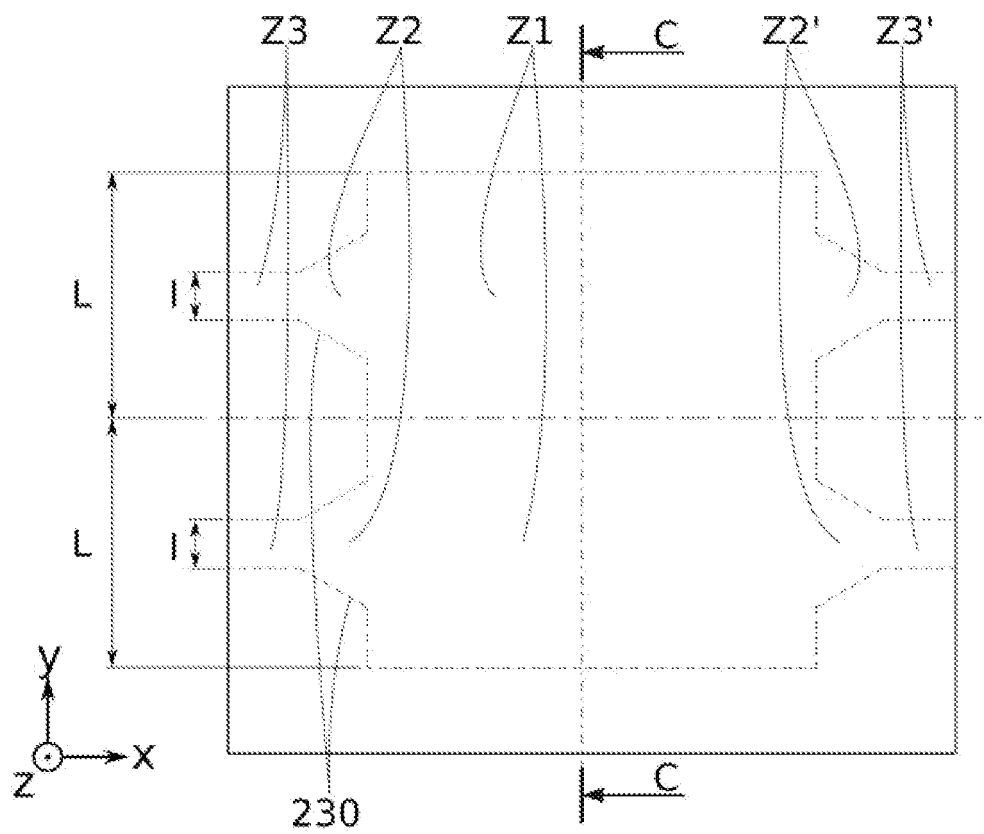


FIG. 3A

[Fig. 3B]

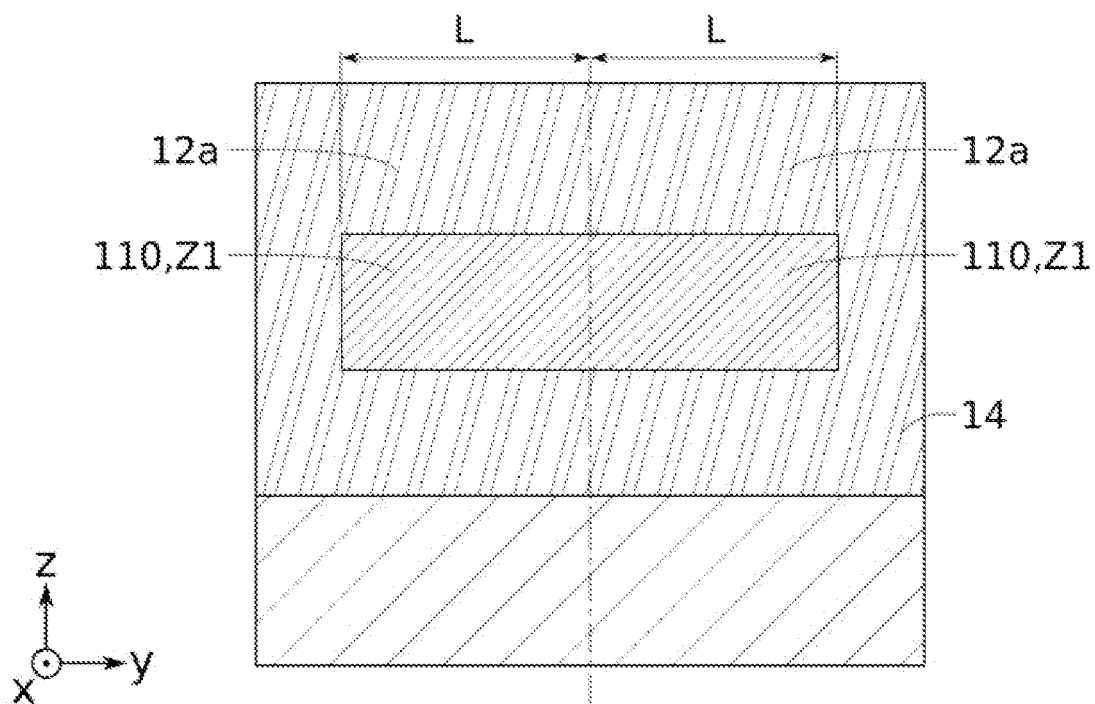


FIG. 3B

[Fig. 4A]

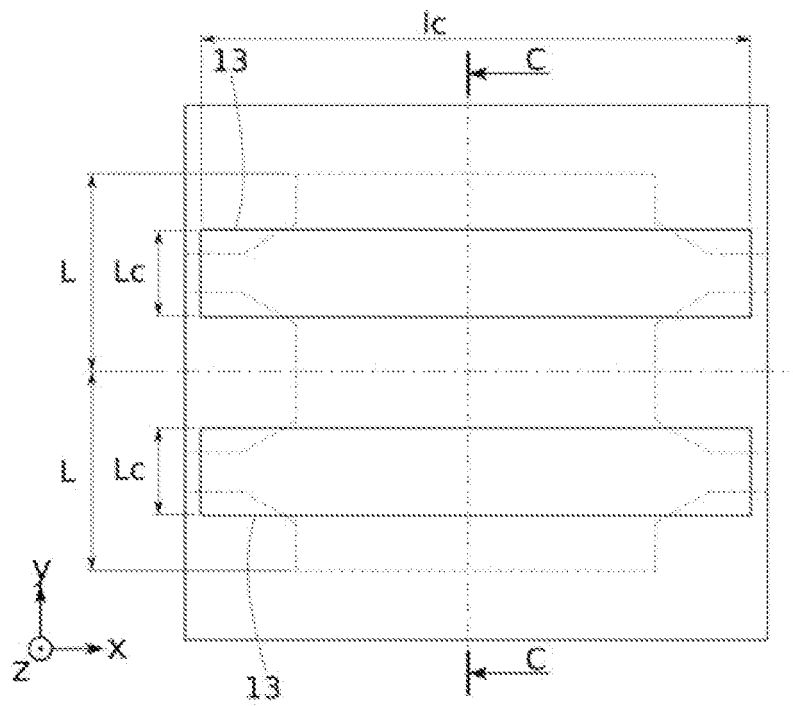


FIG. 4A

[Fig. 4B]

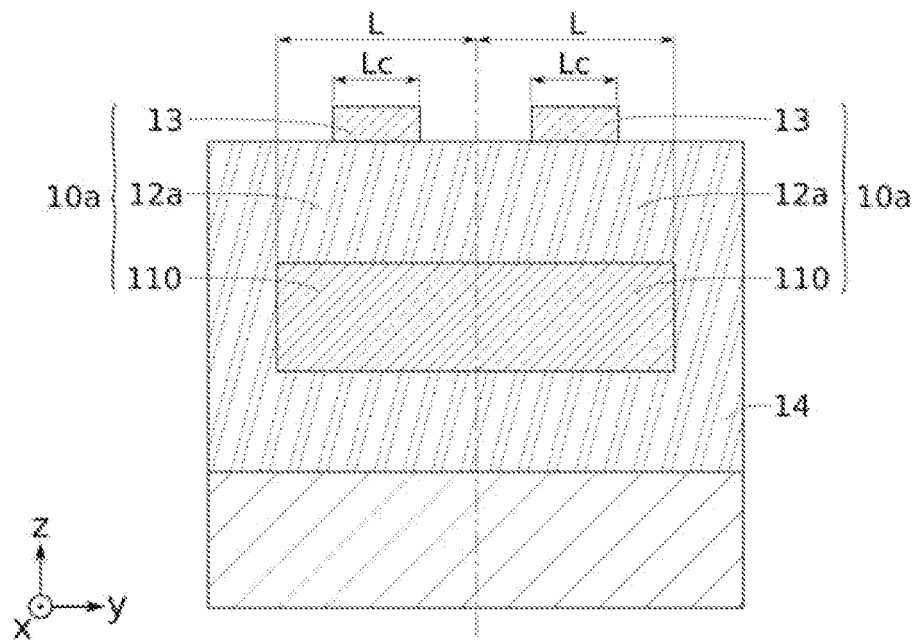


FIG. 4B

[Fig. 5A]

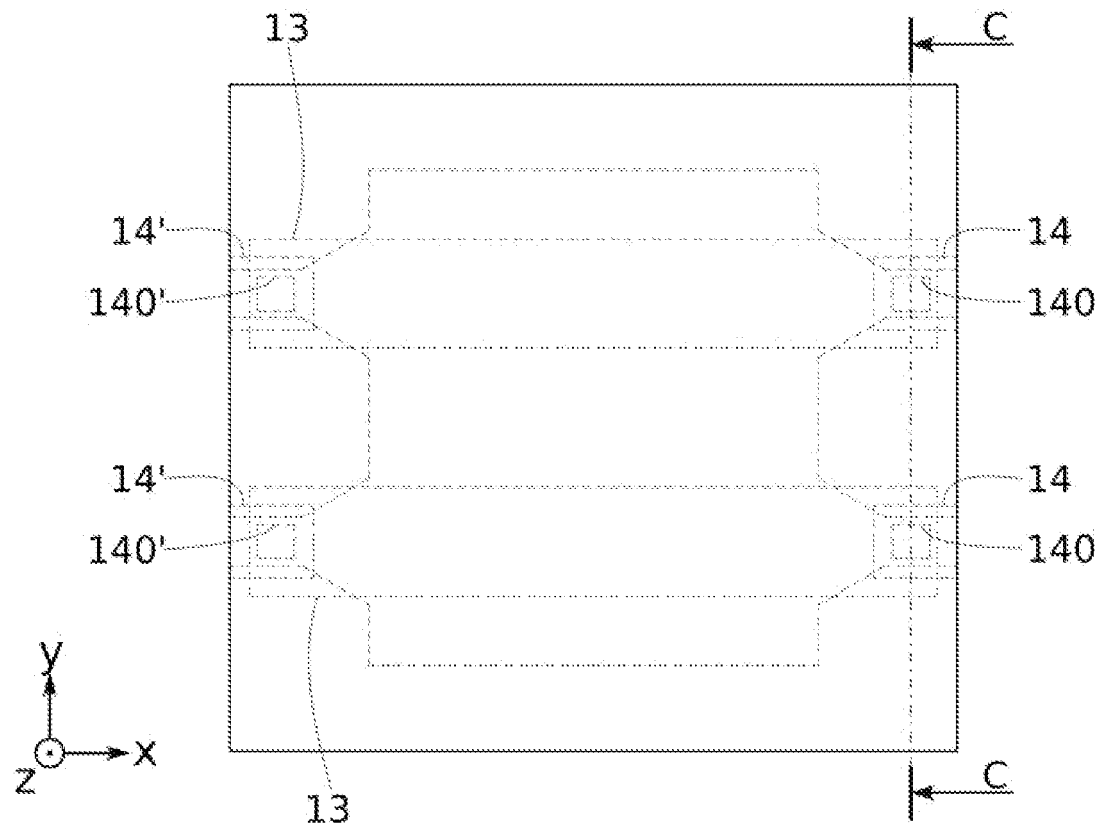


FIG. 5A

[Fig. 5B]

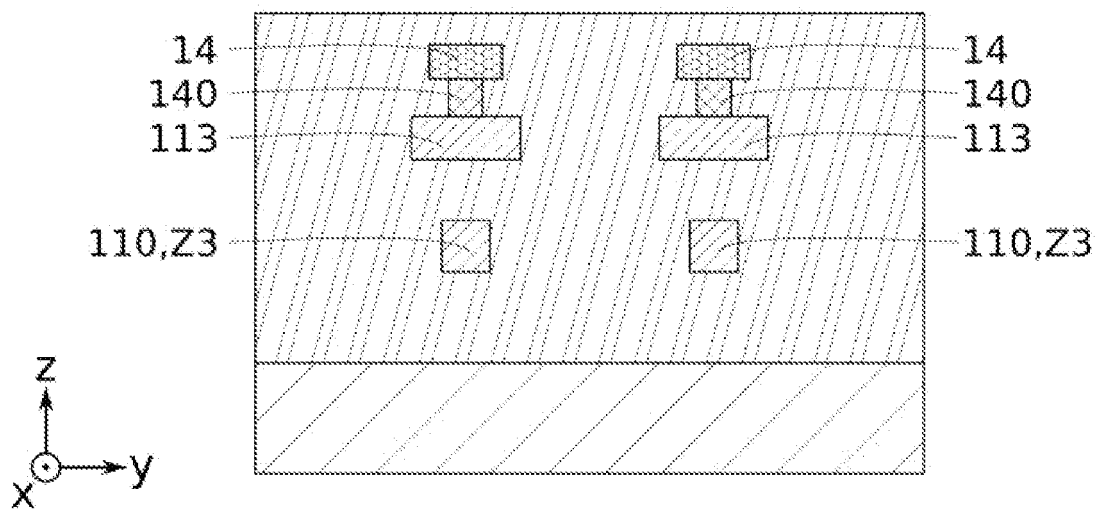


FIG. 5B

[Fig. 6A]

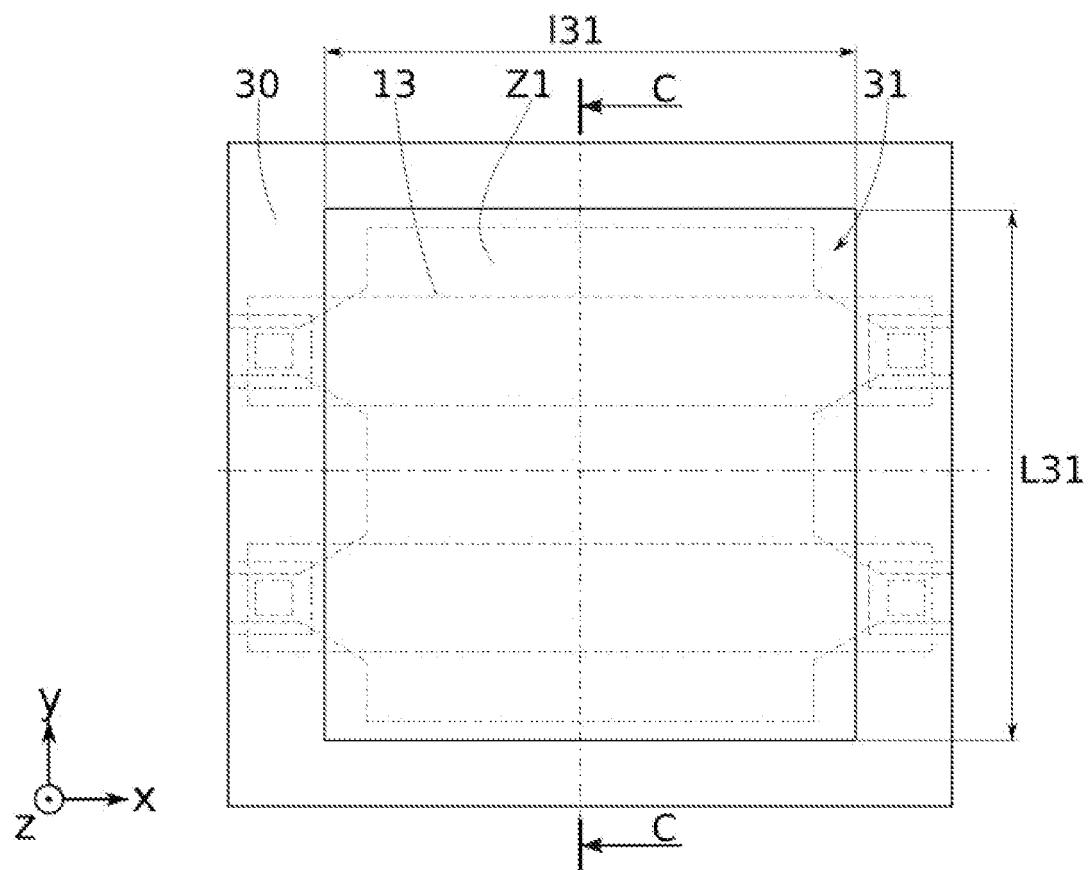


FIG. 6A

[Fig. 6B]

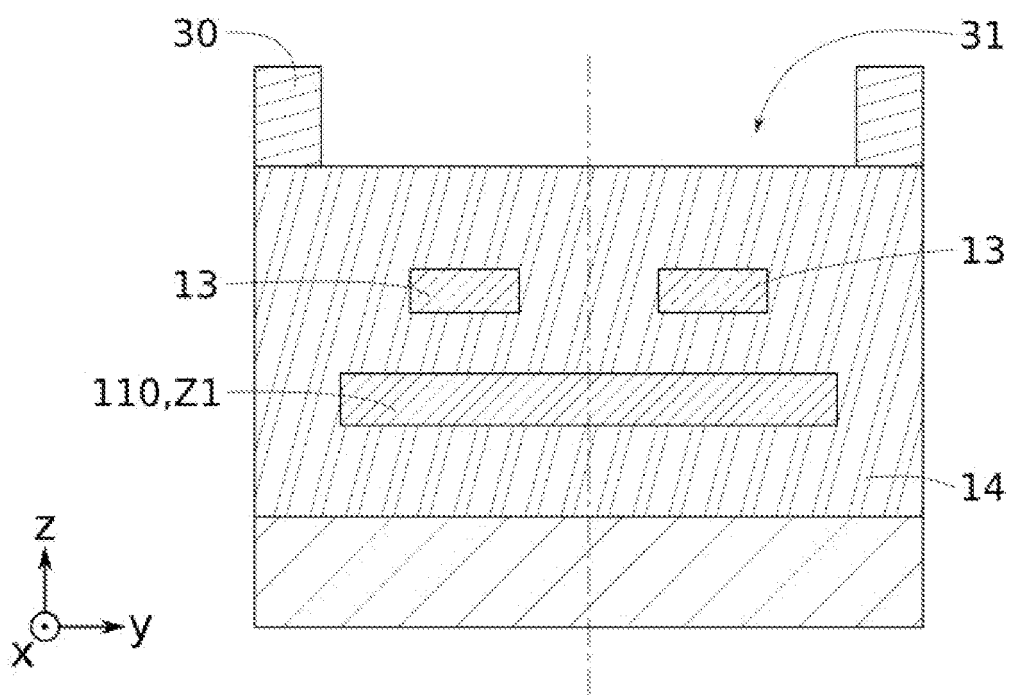


FIG. 6B

[Fig. 7A]

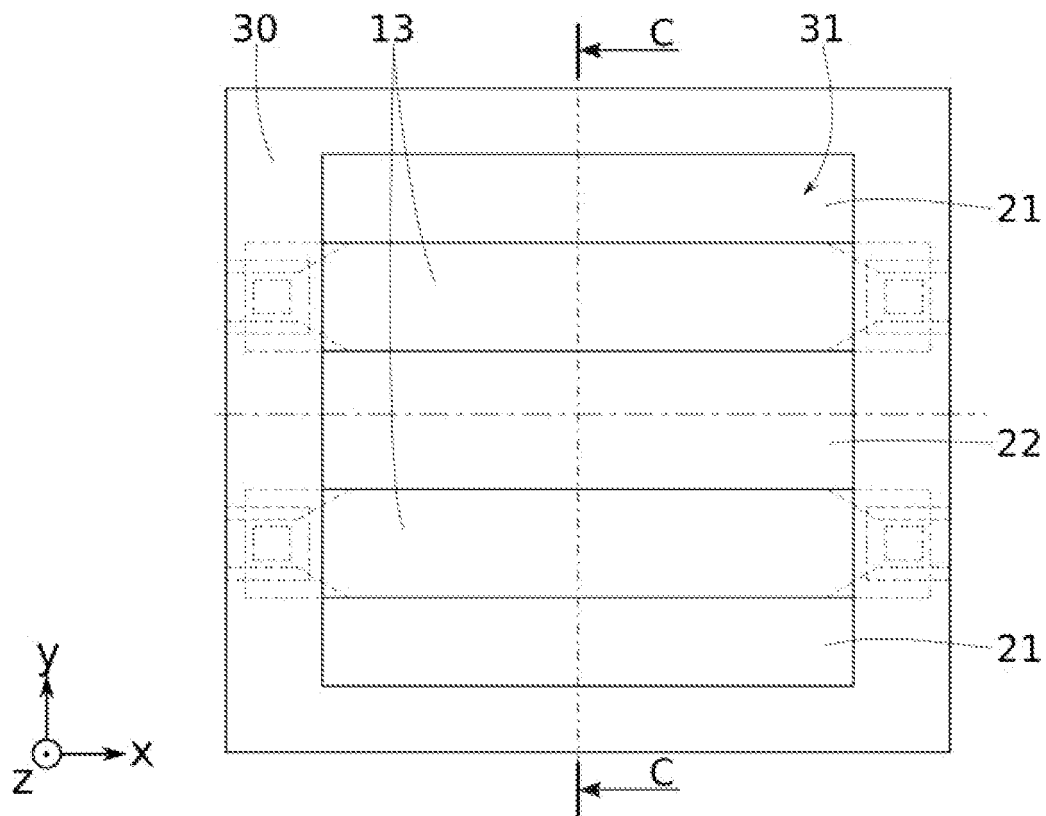


FIG. 7A

[Fig. 7B]

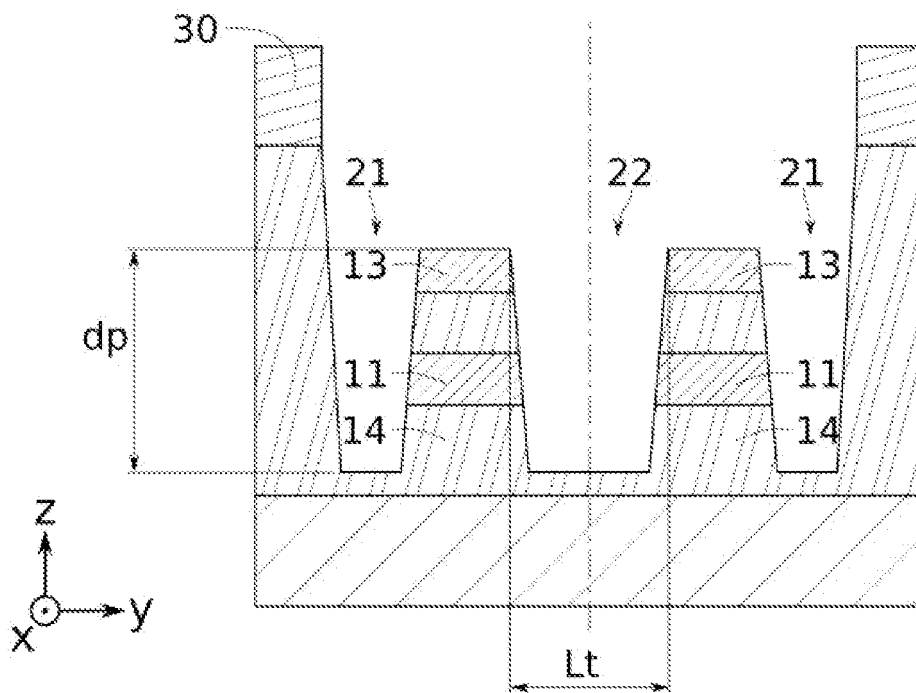


FIG. 7B

[Fig. 8A]

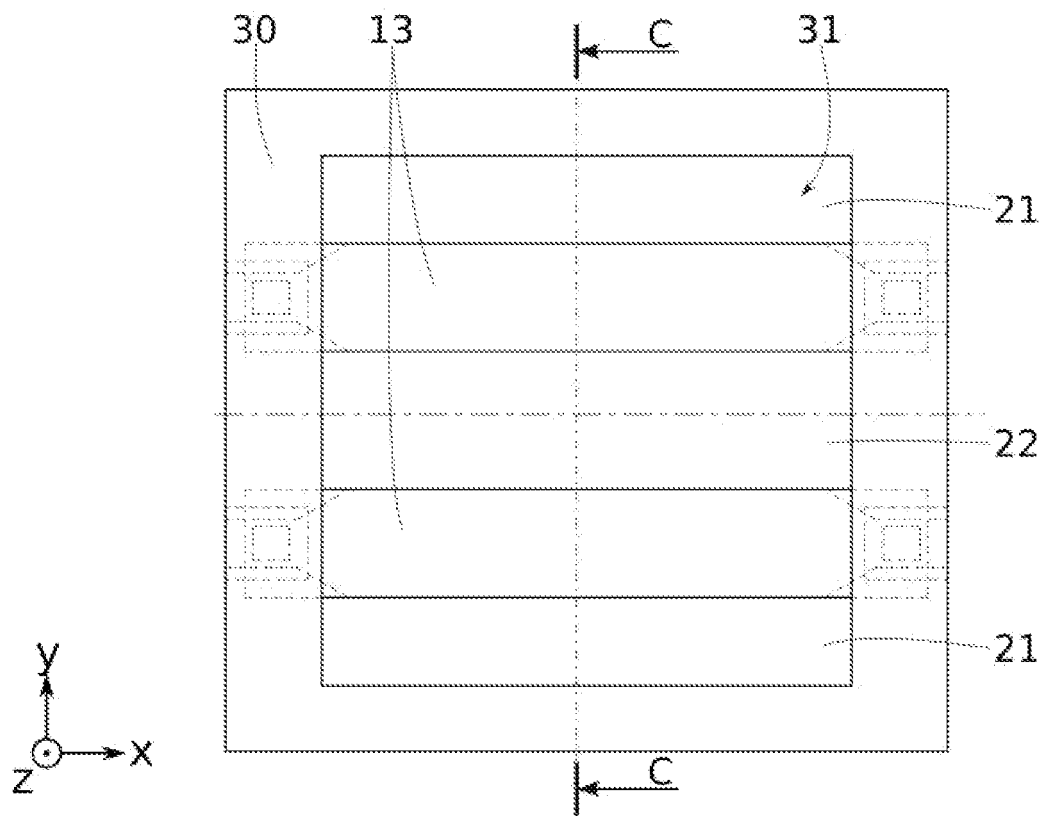


FIG. 8A

[Fig. 8B]

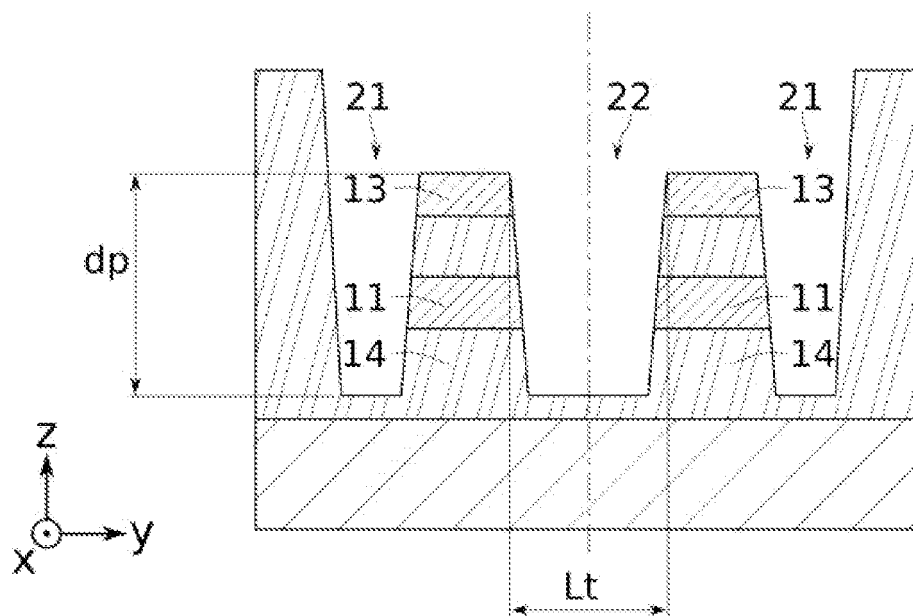


FIG. 8B

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☐ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

US 2019/339549 A1 (WATANABE DAICHI [JP] ET AL) 7 novembre 2019 (2019-11-07)

SMITH FRANCIS ET AL: "A Design Study of Efficiency Enhancement in Silicon Photonic Thermo-Optic Phase Shifters",
2019 IEEE OPTICAL INTERCONNECTS CONFERENCE (OI), IEEE,
24 avril 2019 (2019-04-24), pages 1-2,
XP033550382,
DOI: 10.1109/OIC.2019.8714481
[extrait le 2019-05-14]

US 2020/393547 A1 (NODA KEIICHI [JP] ET AL) 17 décembre 2020 (2020-12-17)

CA 2 130 605 A1 (AKZO NOBEL NV [NL])
25 février 1995 (1995-02-25)

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT