

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

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

3 009 628

②1 N° d'enregistrement national : 13 57947

⑤1 Int Cl⁸ : G 02 B 5/18 (2013.01), G 02 B 6/122, 5/26, H 01 L 33/10, H 01 S 5/183

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 09.08.13.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 13.02.15 Bulletin 15/07.

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) : ECOLE CENTRALE DE LYON — FR, UNIVERSITE LYON 1 CLAUDE BERNARD — FR, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON — FR et CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE — FR.

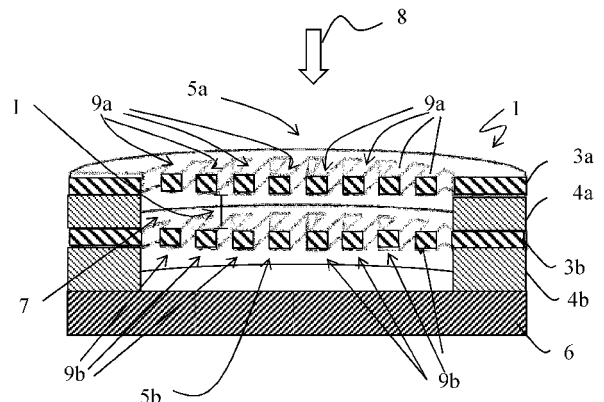
⑦2 Inventeur(s) : VIKTOROVITCH PIERRE, SCIANCALEPORE CORRADO, LETARTRE XAVIER et LECLERCQ JEAN-LOUIS.

⑦3 Titulaire(s) : ECOLE CENTRALE DE LYON, UNIVERSITE LYON 1 CLAUDE BERNARD, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public.

⑦4 Mandataire(s) : INNOVINCIA CPI.

⑤4 REFLECTEUR OPTIQUE ACCORDABLE EN LONGUEUR D'ONDE.

⑤7 L'invention concerne un réflecteur optique accordable (1) en longueur d'onde comprenant deux membranes (3a, 3b) de guides diélectriques en vis-à-vis dont l'interstice (I) peut être ajusté pour accorder la réflectivité du réflecteur optique (1) en longueur d'onde, chaque membrane (3a, 3b) comportant un cristal photonique formant un réseau périodique ou quasipériodique (5a, 5b) et le contraste entre l'indice de réfraction des membranes (3a, 3b) d'une part et le milieu contenu dans l'interstice (I) étant élevé.



FR 3 009 628 - A1



Réflecteur optique accordable en longueur d'onde

La présente invention concerne un réflecteur optique accordable en longueur d'onde.

Les différentes fonctionnalités photoniques sur puce micro-nano-
5 électronique nécessitent un ensemble de briques de base performantes pour l'analyse et la gestion des signaux optiques comme des photo-détecteurs, des filtres, des modulateurs, des réseaux de couplage entrée/sortie (I/O), et, bien sûr, des émetteurs laser dans le proche infrarouge pour adresser notamment les principales bandes télécom.

10 L'intégration à large échelle de ces dispositifs sur silicium implique des solutions technologiques ouvrant la voie à la production de dispositifs très compacts, tout en préservant leur efficacité de fonctionnement, gage indispensable d'une consommation de puissance modérée combinée à une très haute vitesse d'opération.

15 L'approche générale utilisée à ces fins consiste à mettre en œuvre des procédures de confinement à la fois spatial et temporel des photons : le confinement spatial permet le contrôle des photons dans un espace restreint, indispensable à la miniaturisation des dispositifs.

Dans ce cadre, l'utilisation de cristaux photoniques est actuellement
20 considérée indispensable pour le confinement spatial des photons. Le confinement temporel signifie le contrôle temporel des photons dans cet espace restreint de manière à réaliser la fonction visée avec l'efficacité requise. Le confinement temporel est réalisé à l'aide de structures optiques résonantes, où les photons dotés d'une longueur d'onde de l'ordre de la
25 longueur d'onde de résonance sont contraints de séjourner durant la période temporelle requise, qui est comme l'inverse de la largeur spectrale de la résonance.

Ainsi le fonctionnement d'un système intégré photonique à grande
échelle implique l'opération d'un grand nombre de résonateurs de
30 longueurs d'onde de résonance variées, dont la valeur de chacune d'entre

elles doit être précisément ajustée.

Cependant, il est en réalité impossible d'ajuster, *ab initio*, au stade de la réalisation technologique, ces diverses longueurs d'onde de résonance et cela notamment pour deux raisons essentielles.

5 La première raison réside dans la nécessité de maîtriser la taille des structures micro-photoniques à l'échelle nanométrique, imposée par les spécifications requises pour les dispositifs photoniques en matière de définition (inférieure au nanomètre) de la longueur d'onde de fonctionnement : une telle maîtrise est hors de portée de la technologie
10 actuelle.

La deuxième est liée au fait que, quand bien même la technologie permettrait d'atteindre la précision nécessaire, les conditions environnementales (notamment la température), qui ne sont pas fixables à l'avance, ont un impact direct sur les longueurs d'onde de résonance.

15 Ces diverses contraintes ne peuvent donc être surmontées qu'en développant des procédés pour l'ajustage final des longueurs d'onde de travail.

On comprend donc qu'il existe un besoin pour pouvoir accorder de façon simple et efficace en longueur d'onde des dispositifs photoniques.
20 Cela implique de pouvoir contrôler activement en temps réel et avec une vitesse suffisante la longueur d'onde de résonance des résonateurs optiques à la base du fonctionnement de la plupart des micro-dispositifs photoniques.

La solution la plus largement répandue pour réaliser l'accordabilité
25 des dispositifs photoniques, et notamment dans les circuits intégrés photoniques, est fondée sur l'effet thermo-optique.

Elle consiste à moduler localement la température à l'aide de « micro-heaters » à effet joule. La modulation de la température entraîne une variation de l'indice optique effectif du résonateur et, par conséquent,
30 de sa longueur d'onde résonance. Cette solution, qui est notamment privilégiée par un groupe du MIT (Marcus S. Dahlem et al, « Reconfigurable

multi-channel second-order silicon microring-resonator filterbanks for onchip WDM systems » *Optics Express*, Vol. 19, No. 1, p. 306 (2011)).

Cependant elle présente les inconvénients d'une vitesse et d'un taux d'accordabilité médiocres (de l'ordre du % de la longueur d'onde nominale), ainsi que de compromettre, au moins en partie, les gains
5 apportés par la photonique en matière de dépense énergétique thermique.

Une autre approche aussi largement utilisée pour l'accordabilité est fondée sur divers effets électro-optiques, consistant à moduler l'indice par l'application d'une polarisation électrique, produisant des effets variés de
10 champ électrique ou l'injection/déplétion de porteurs, à l'origine d'une variation de l'indice optique. Dans ce cas également le taux d'accordabilité est faible (inférieur au % de la longueur d'onde nominale) : ce procédé est d'avantage réservé à la fonction de modulation rapide du signal optique.

Des taux d'accordabilité importants (environ 10% de la longueur
15 d'onde nominale) ont été démontrés par des méthodes de micro-nanofluidique : elles consistent à infiltrer les structures photoniques avec un fluide, conduisant à une modulation locale de l'indice significatif (David Erickson et al, "Nanofluidic tuning of photonic crystal circuits" *Optics Letters*, Vol. 31, p. 59 (2006)). Cette méthode est notamment envisagée
20 pour la reconfiguration dynamique de circuits intégrés photoniques.

Une autre méthode très efficace d'accordabilité consiste à modifier non pas l'indice des matériaux constituant le résonateur, mais sa dimension, se traduisant par une modification du chemin optique cohérent emprunté par les photons à la résonance et donc de la longueur d'onde de
25 résonance. Cette méthode a largement été utilisée pour réaliser l'accordabilité continue de cavités Fabry-Pérot en déplaçant par voie électromécanique l'un des deux miroirs constituant la cavité. Des taux d'accordabilité excédant 10% de la longueur d'onde nominale ont été ainsi réalisés (voir par exemple WO0165301).

30 Le principal inconvénient de cette dernière approche réside dans l'encombrement spatial du dispositif imposé par la taille minimum latérale

de la structure réfléchissante suspendue, requise pour assurer une flexibilité mécanique compatible avec des tensions de commande électrostatique acceptables (dizaine de volts). Ce mode d'accordabilité est plutôt réservé à des composants discrets (filtres, VCSELs) et est difficilement compatible avec l'intégration photonique.

Un autre procédé d'accordabilité a été proposé dans le document A. Fiore et al, "Electromechanical wavelength tuning of double-membrane photonic crystal cavities », Applied Physics Letters Vol. 98, p. 211120 (2011). Ce procédé est fondé sur le couplage évanescent de deux micro-cavités formées dans des membranes semi-conductrices séparées par un « gap » d'air modulable par voie électrostatique. Cette méthode permet d'atteindre des taux d'accordabilité significatifs, de l'ordre de 5% de la longueur d'onde de résonance nominale.

Enfin, le document O. Painter et al, "Optomechanics in an ultrahigh-Q two-dimensional photonic crystal cavity", Applied Physics Letters, Vol. 97, p. 181106 (2010) décrit la réalisation d'une structure résonante accordable consistant en une cavité dans guide à fente (« slotted waveguide ») réalisé dans un cristal photonique membranaire. La fente verticale est inscrite au milieu du guide par lithographie électronique. L'accordabilité significative également (quelques %) est obtenue par modulation électromécanique de la fente, à l'aide d'un système « d'actuation » relativement complexe et encombrant.

La présente invention vise à proposer un réflecteur optique accordable en longueur d'onde de structure simple, peu encombrant et peu onéreux.

A cet effet, l'invention propose un réflecteur optique accordable en longueur d'onde comprenant deux membranes de guides diélectriques en vis-à-vis dont l'interstice peut être ajusté pour accorder la réflectivité du réflecteur optique en longueur d'onde, chaque membrane comportant un cristal photonique formant un réseau périodique ou quasi-périodique et le

contraste entre l'indice de réfraction des membranes d'une part et le milieu contenu dans l'interstice étant élevé.

Du fait que l'interstice entre les deux membranes peut être contrôlé, on peut réaliser un réflecteur d'une grande efficacité dont les caractéristiques spectrales sont adaptables aux besoins techniques d'un système ou d'une installation comportant un tel réflecteur.

De plus, il est possible de modifier dynamiquement les caractéristiques spectrales d'un réflecteur, ce qui peut lui procurer des fonctions diverses, notamment dans un réseau optique de transmission de données / de télécommunications. Le réflecteur selon l'invention permet d'obtenir une accordabilité $\delta\lambda/\delta d$ excédant couramment l'unité (interstice de l'ordre de 100nm) et pouvant atteindre 10 environ pour les interstices les plus faibles (autour de 20nm), soit très supérieur au taux obtenu avec une cavité Fabry-Pérot accordable (couramment de l'ordre de 0,1 et au maximum de l'ordre de 1).

Par ailleurs, par le dimensionnement des membranes comportant des cristaux photoniques, on peut créer un réflecteur accordable en longueur d'onde à largeur spectrale étroite ou à grande largeur spectrale.

Le réflecteur optique accordable peut en outre comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes prises seules ou en combinaison :

Selon un aspect, l'interstice ajustable est inférieur ou égal à 25% de la longueur d'onde de la lumière à réfléchir.

Selon un autre aspect, l'interstice ajustable est supérieur ou égal à 30nm.

Selon un mode de réalisation, le réseau périodique est par exemple formé par un cristal photonique bidimensionnel de trous.

Selon un autre mode de réalisation, le réseau périodique comprend des tiges, les tiges d'une membrane étant disposées en vis-à-vis des tiges de l'autre membrane pour former des paires, l'interstice entre deux tiges

d'une même paire de tiges peut être ajusté pour accorder la réflectivité du réflecteur optique en longueur d'onde, le contraste entre l'indice de réfraction des tiges d'une part et le milieu contenu dans l'interstice étant élevé.

- 5 Les interstices de l'ensemble des paires de tiges peuvent par exemple être ajustés pour accorder la réflectivité du réflecteur optique en longueur d'onde.

On peut aussi prévoir que les interstices de l'ensemble des paires de tiges peuvent être ajustés à des valeurs sensiblement identiques.

- 10 En variante, les interstices de l'ensemble des paires de tiges peuvent être ajustés de façon à varier selon une direction transversale du réflecteur.

- 15 Selon un autre aspect, la périodicité du réseau périodique de paires de tiges est inférieure à la longueur d'onde, de préférence de $2/3$ de la longueur d'onde.

La largeur des tiges peut être comprise entre 40% et 60% de la période du réseau.

Pour un réflecteur, on peut prévoir que le réseau périodique comprend au moins quatre, de préférence huit paires de tiges.

- 20 Le réflecteur peut être configuré pour réfléchir de la lumière pour une plage prédéterminée de longueur d'ondes situé entre $1\ \mu\text{m}$ et $7\ \mu\text{m}$.

Selon encore un autre aspect, le contraste d'indice de réfraction entre des membranes d'une part et le milieu contenu dans l'interstice d'autre part est supérieur à 1,5, de préférence 2.

- 25 L'interstice entre deux tiges peut être ajusté par voie électrostatique ou électrothermique.

L'invention concerne également un composant photonique, notamment sur puce, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un réflecteur tel que défini ci-dessus.

Enfin, l'invention concerne une diode laser à cavité verticale, dans lequel au moins un des réflecteurs est un réflecteur tel que défini ci-dessus.

D'autres avantages et caractéristiques apparaîtront à la lecture de la description de l'invention, ainsi que des figures suivantes parmi lesquelles :

- 10 - la figure 1 montre une vue schématique en perspective et en coupe d'un réflecteur selon un mode de réalisation de l'invention,
- la figure 2 montre une vue de dessus d'une membrane de guide diélectrique selon le mode de réalisation de la figure 1,
- la figure 3 montre une vue schématique en coupe du réflecteur de
15 la figure 1 selon une première configuration de fonctionnement,
- la figure 4 montre une vue schématique en coupe du réflecteur de la figure 1 selon une deuxième configuration de fonctionnement,
- la figure 5 montre un premier diagramme montrant la réflectivité d'un réflecteur selon l'invention pour différents interstices selon
20 un premier mode de réalisation,
- la figure 6 montre un second diagramme montrant la réflectivité d'un réflecteur selon l'invention pour différents interstices selon un second mode de réalisation,

- la figure 7 montre une vue schématique en coupe du réflecteur de la figure 1 selon une autre configuration de fonctionnement,
- la figure 8 montre une vue schématique en coupe du réflecteur de la figure 1 selon encore une autre configuration de fonctionnement,
- la figure 9 montre une vue de dessus d'une membrane de guide diélectrique selon un autre mode de réalisation,
- la figure 10 montre une vue en coupe longitudinale d'un réflecteur selon un autre mode de réalisation de l'invention,
- la figure 11 montre un exemple d'un VCSEL équipé d'un réflecteur selon l'invention,
- la figure 12 montre un diagramme montrant la transmission d'un réflecteur selon l'invention pour différents interstices dans le cadre d'une utilisation comme réflecteur dans un VCSEL, et
- la figure 13 montre un réflecteur accordable selon l'invention suivant un autre mode de réalisation.

Sur toutes les figures, les mêmes éléments sont référencés par les mêmes numéros de référence.

La figure 1 montre une vue schématique en perspective et en coupe d'un réflecteur accordable 1 selon un mode de réalisation de l'invention, la figure 2 montre une vue de dessus d'une membrane de guide diélectrique selon le mode de réalisation de la figure 1 et la figure 3 montre une vue schématique en coupe du réflecteur 1 de la figure 1.

Ce réflecteur optique accordable en longueur d'onde 1 comprend deux membranes 3a et 3b de guides diélectriques en vis-à-vis dont l'interstice I, c'est-à-dire la distance séparant les membranes 3a, 3b, peut être ajusté pour accorder la réflectivité du réflecteur optique 1 en longueur
5 d'onde.

Les deux membranes 3a et 3b de guides diélectriques sont séparées l'une de l'autre par un premier espaceur 4a qui peut avoir dans ce mode de réalisation la forme d'une couronne.

Cet ensemble repose sur un second espaceur 4b, par exemple
10 également en forme de couronne qui repose sur un substrat semi-conducteur 6, dans le présent cas par exemple sous forme d'un disque.

L'interstice I ajustable est inférieur ou égal à 25% de la longueur d'onde de la lumière à réfléchir et à titre d'exemple supérieur ou égal à 30nm.

15 Les membranes 3a et 3b de guides diélectriques sont sensiblement identiques et chaque membrane 3a et 3b comporte un cristal photonique formant respectivement un réseau périodique 5a et 5b. La figure 2 montre une vue de dessus d'une membrane 3a ou 3b de la figure 1.

Comme on le voit sur le mode de réalisation des figures 1 et 2, le
20 réseau périodique 5a, 5b de chaque membrane 3a, 3b comprend des tiges 9a et 9b parallèles les unes par rapport aux autres.

Le contraste entre l'indice de réfraction du matériau formant des membranes de guides diélectriques 3a, 3b d'une part et le milieu 7 (par exemple l'air ou un autre fluide)) contenu dans l'interstice I est élevé et
25 typiquement supérieur à 200%, l'indice de réfraction du milieu 7 entre les tiges 9a, 9b étant bien entendu inférieur à l'indice de réfraction du matériau formant les tiges 9a, 9b.

Comme on le voit sur la figure 1, les tiges 9a ou 9b d'une membrane 3a ou 3b sont disposées en vis-à-vis des tiges 9b ou 9a de l'autre membrane 3b ou 3a pour former des paires.

Du fait des espaceurs 4a et 4b, les tiges 9a et 9b des membranes 3a et 3b de guides diélectriques sont donc suspendues librement.

L'interstice I entre deux tiges 9a, 9b d'une même paire de tiges peut être ajusté pour accorder la réflectivité du réflecteur optique en longueur d'onde.

Plus précisément l'interstice I peut être ajustée pour les membranes dans leur ensemble ou l'interstice de chaque paire de tiges 9a, 9b peut être ajustée individuellement pour accorder la réflectivité du réflecteur optique 1 en longueur d'onde. Dans ce cas, chaque tige d'une paire de tiges est par exemple reliée à une électrode de sorte que l'application d'une polarisation permet le rapprochement des tiges par un effet électrostatique. Les tiges 9a, 9b ainsi que les membranes dans leur ensemble 3a, 3b sont par exemple en un matériau semi-conducteur tel que le silicium ou de tout matériau adapté à la ou aux longueurs d'ondes à réfléchir et de préférence compatible avec des technologies CMOS.

La lumière incidente à réfléchir, indiquée par une flèche, 8 frappe les membranes par exemple de préférence verticalement, mais un angle d'incidence oblique peut aussi être envisagé, ceci depuis le côté opposé au substrat semi-conducteur 6.

Sur les figures 1 à 3, les tiges 9a, 9b ont à titre d'exemple une section rectangulaire / carré qui peut être typiquement de $0,5\mu\text{m} \times 0,5\mu\text{m}$. D'autres formes de section transversales, comme des formes circulaires, elliptiques ou polygonales peuvent être envisagées ainsi que d'autres dimensions en fonction des longueurs d'ondes à réfléchir.

Le réseau périodique 5a, 5b possède par exemple pour une plage de longueurs d'ondes comprise entre $1,1\mu\text{m}$ et $1,5\mu\text{m}$ une période de $1\mu\text{m}$, en supposant que les tiges 9a, 9b sont réalisées en silicium qui a un indice de réfraction de 3,5 et l'interstice I est rempli d'air d'indice égal à 1.

5 De façon plus générale, la périodicité du réseau périodique 5a, 5b de paires de tiges 9a, 9b est inférieure à la longueur d'onde, de préférence environ $2/3$ de la longueur d'onde.

La période est définie pour une plage de longueur d'onde donnée et pour une configuration de tiges (matériau) donnée par les conditions de
10 diffraction conduisant à un couplage résonant entre un mode optique dans un espace libre et un mode optique guidé dans le réflecteur accordable.

La largeur des tiges 9a, 9b, c'est-à-dire l'extension des tiges dans un plan sensiblement parallèle au réseau périodique 5a, 5b ou plus exactement le facteur de remplissage latéral des tiges 9a, 9b, la période du
15 réseau périodique 5a, 5b et l'épaisseur des tiges 9a, 9b permettent de contrôler la réponse spectrale du réflecteur 1 en particulier la longueur d'onde centrale et la bande passante.

La largeur des tiges est comprise généralement entre 40% et 60% de la période du réseau, par exemple entre $0,4\mu\text{m}$ et $0,6\mu\text{m}$, de préférence $0,5$
20 μm .

Comme on le voit sur la figure 1, le réflecteur accordable 1 comprend huit paires de tiges, mais quatre paires de tiges sont suffisantes, notamment pour des réflecteurs large bande.

L'interstice I entre deux tiges 9a, 9b d'une même paire de tiges peut
25 varier en fonction des propriétés spectrales pratiquement entre 30nm et plus de 50nm . On a constaté qu'une variation de l'interstice I entre toutes

les paires de tiges 9a, 9b des deux membranes 3a, 3b de seulement 10nm permet d'obtenir une accordabilité d'environ 50nm en longueur d'onde dans le domaine spectral pour une longueur d'onde d'environ 1,5 μ m.

L'ajustement de l'interstice I peut être réalisé par une actuation électrostatique, c'est-à-dire en appliquant une polarisation et un potentiel choisi entre les deux membranes 3a et 3b dans leur ensemble. Pour cela, chaque membrane 3a, 3b de guide diélectrique est relié à une électrode de contact (non représentée). En appliquant une polarisation, les interstices de l'ensemble des paires de tiges 9a, 9b peuvent être réduits et donc ajustés, pour accorder la réflectivité du réflecteur optique 1 en longueur d'onde. En fonction de la géométrie des membranes et des tiges, des valeurs identiques d'interstice peuvent être obtenues pour l'ensemble des paires de tiges 9a, 9b.

La figure 3 montre donc une vue en coupe du réflecteur accordable 1 de la figure 1. On voit que les membranes 3a, 3b et donc les tiges 9a, 9b sont espacés par l'espaceur 4a. Ces espaceurs 4a sont formés au niveau des extrémités des tiges 9a et 9b de sorte que les tiges 9a et 9b soient séparées par l'interstice, par exemple rempli d'air.

Les espaceurs 4a, 4b peuvent être réalisés dans des matériaux semi-conducteurs, et de préférence dans des matériaux semi-conducteurs de type III-V. Il s'agira, par exemple, d'arséniure de gallium (GaAs) ou de phosphore d'indium (InP), ou bien d'hétérostructures de type InGaAs/InP ou InAlAs/InGaAlAs déposées sur un substrat d'InP, ou de type AlAs/GaAs déposées sur un substrat GaAs, ou encore de type InGaP/GaAs déposées sur un substrat GaAs.

Bien entendu, ces matériaux ne constituent que des exemples préférentiels.

La membrane 3a est par exemple dopée P tandis que la membrane 3b est dopée de façon inverse, c'est-à-dire N. Les espaceurs 4a, 4b eux sont non intentionnellement dopés (de type I).

On voit donc qu'une paire de tiges 9a, 9b ensemble avec l'espaceur 4a associé forme une jonction PIN (ou NIP pour une disposition inverse).

Selon une variante, l'ajustement de l'interstice I entre une ou plusieurs paires de tiges 9a, 9b peut être réalisé par une actuation électrostatique, c'est-à-dire en appliquant une polarisation et un potentiel choisi, entre deux tiges 9a, 9b d'une même paire ou pour plusieurs paires à des degrés identiques ou différents.

En effet, en absence d'une polarisation appliquée, les tiges 9a, 9b se trouvent dans une position de repos avec un interstice I dont la valeur a été choisie d'avance, par exemple pour que le réflecteur accordable 1 en position de repos soit réfléchissant à une longueur d'onde donnée.

Lorsque l'on applique des polarisations différentes aux tiges 9a, 9b, les tiges 9a et 9b sont attirées l'une vers l'autre sur une distance choisie dépendant des potentiels appliqués à la paire de tiges 9a, 9b individuellement ou aux membranes 3a, 3b dans leur ensemble, comme on le voit sur la figure 4 où l'interstice I entre les tiges 9a, 9b est réduit en comparaison à la figure 3.

La figure 5 montre un diagramme montrant la réflectivité d'un réflecteur accordable 1 selon l'invention pour différentes valeurs d'interstice I selon un premier mode de réalisation.

Il s'agit d'un réflecteur accordable résonant à bande spectrale étroite pour lequel les paires de tiges 9a, 9b des membranes 3a et 3b sont déplacées dans leur ensemble.

Le diagramme montre la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour six valeurs d'interstice entre les tiges 9a, 9b. La courbe 101 montre la réflectivité pour un interstice de 20nm, la courbe 102 pour un interstice de 40nm, la courbe 103 pour un interstice de 60nm, la courbe 104 pour un interstice de 80nm, la courbe 105 pour un interstice de 100nm et la courbe 106 pour un interstice de 130nm.

On y voit bien que le pic de réflectivité est déplacé d'une longueur d'onde d'environ 1,51 μ m dans le cas d'un interstice de 130nm, à environ 1,67 μ m pour un interstice de 20nm. On voit donc bien qu'en diminuant l'interstice par le rapprochement des tiges 9a, 9b, on décale le pic de réflectivité vers les longueurs d'ondes plus longues.

La figure 6 montre un second diagramme similaire à celui de la figure 5 pour un réflecteur accordable 1 de large bande montrant la réflectivité d'un réflecteur selon l'invention pour différentes valeurs d'interstice / épaisseurs de fente selon un second mode de réalisation.

Le diagramme montre la réflectivité en fonction de la longueur d'onde pour quatre valeurs d'interstice entre les tiges 9a, 9b. La courbe 111 montre la réflectivité pour un interstice de 50nm, la courbe 112 pour un interstice de 60nm, la courbe 113 pour un interstice de 80nm et la courbe 114 pour un interstice de 100nm.

On constate donc qu'une diminution de l'interstice I dans ce cas entre les tiges 9a, 9b décale la réponse spectrale vers des longueurs d'ondes plus courtes.

La figure 7 montre une vue schématique en coupe du réflecteur accordable de la figure 1 selon une autre configuration de fonctionnement,

Dans cette configuration, l'interstice I_c de deux paires de tiges centrales 9a, 9b est plus petit que l'interstice I_e des paires de tiges 9a, 9b à l'extérieur. Ceci peut être obtenu par le fait qu'une polarisation n'est appliquée qu'à ces deux paires de tiges centrales 9a, 9b, alors que les
5 autres paires de tiges restent dans leur position initiale.

Dans ce cas, pour la modulation, on se limite à la variation de l'interstice I_c pour deux paires centrales de tiges. Une modulation de l'interstice I_c pour une seule autre paire de tiges 9a, 9b est aussi envisageable.

10 Il résulte de la diminution du nombre de paires de tiges dont l'interstice I_c est modulé que le taux d'accordabilité est naturellement réduit par rapport à la situation précédente pour laquelle toutes les tiges sont déplacées verticalement. En revanche, la mise en œuvre de l'accordabilité est très simplifiée, le coût énergétique et la rapidité sont
15 améliorés : cette approche est bien adaptée aux cas où on se limite à un simple ajustage fin de la longueur d'onde (« trimming »). De plus, dans ce mode opératoire, on peut aussi envisager de confiner, « piéger », latéralement les photons.

Une autre possibilité d'ajustement de l'interstice consiste à prévoir
20 une actuation électrothermique, par exemple en faisant circuler un courant dans les tiges 9a, 9b qui s'échauffent par effet Joule. La dilatation résultant de l'échauffement tend alors à écarter les tiges 9a, 9b.

On constate donc qu'une accordabilité du réflecteur selon l'invention est réalisée en prévoyant, au sein et dans le plan deux membranes 3a, 3b
25 un interstice I de dimensions d nanométrique (inférieur à 150nm) modulable par voie électromécanique. Des taux d'accordabilité record $\delta\lambda / \delta d \geq 10$ peuvent ainsi être obtenus, en particulier si on met en œuvre

des modes guidés TM pour lesquels le champ électrique, étant principalement perpendiculaire à la membrane, est discontinu à l'interface entre diélectrique et fente et atteint une valeur relative très forte au sein de cette dernière.

5 La figure 8 montre encore un autre mode de fonctionnement possible du réflecteur accordable selon l'invention. Dans ce cas, l'interstice I_i ($i = 1$ à 8) de chaque paire de tiges 9a, 9b peut être commandé individuellement de façon à varier l'interstice I_i selon une direction transversale du réflecteur 1, par exemple sous forme d'une vague, d'une
10 parabole etc.

Dans ce cas, on peut contrôler à volonté le front de l'onde réfléchi et transmise par le réflecteur selon l'invention en fixant localement, à l'échelle de la période (de l'ordre de la longueur d'onde) du réseau périodique 5a, 5b, la phase de la fonction de transfert. En effet, si
15 l'interstice I_i varie d'une paire de tiges 9a, 9b à l'autre, on impose localement la phase de la fonction de transfert ce qui permet le pilotage actif du front d'onde du faisceau transmis et réfléchi : on peut donc envisager la mise en forme de faisceaux optiques selon les scénarios les plus variés (balayage, focalisation de faisceaux...).

20 Le réflecteur accordable 1 selon l'invention ne permet donc pas uniquement l'accordabilité dans le seul domaine spectral, mais aussi le contrôle actif des caractéristiques spatiales des faisceaux optiques générés ou manipulés.

La figure 9 montre une vue de dessus d'un autre exemple de
25 réalisation d'une membrane 3a, 3b de guide diélectrique de forme carrée ou rectangulaire où toutes les tiges 9a, 9b possèdent la même longueur et sont tenues par un cadre 12 de forme générale rectangulaire.

La figure 10 montre une vue en coupe selon le sens longitudinal des tiges 9a et 9b de deux membranes 3a, 3b de guide diélectrique comme montrées sur la figure 9.

Dans le présent exemple, la longueur de la membrane 3a dans le sens longitudinal des tiges 9a est plus courte que celle de la membrane 3b avec les tiges 9b, ce qui permet un montage en superposition et en escalier aux extrémités.

Au niveau des extrémités au niveau de l'escalier est déposée une couche isolante 14a, 14b et sur cette couche isolante est déposée une couche conductrice par exemple en métal 16a, 16b.

Comme on voit sur la figure 10, la couche métallique 16a est reliée électriquement à la membrane de dessus 3a tandis que la membrane de dessous 3b est connectée électriquement à la couche métallique 16b en ménageant un trou dans la couche isolante 14a, 14b par lequel la couche métallique 16a, 16b vient au contact avec les tiges respectivement 9a ou 9b.

Ainsi, on peut connecter électriquement chaque tige 9a ou 9b à un conducteur / une électrode ce qui permet de polariser individuellement chaque paire de tiges 9a, 9b.

La figure 11 montre une possible application du réflecteur selon l'invention.

En effet, la figure 11 montre une vue schématique en coupe d'une diode laser à cavité verticale émettant par la surface (généralement abrégé VCSEL) 30.

Vu sur la figure du bas vers le haut, ce VCSEL comprend un premier réflecteur d'extrémité 32 qui peut être réalisé sous forme d'un miroir métallique, d'un réflecteur de Bragg distribué (« distributed bragg reflector - DBR » en anglais) ou d'un cristal photonique.

5 Sur ce miroir 32 sont posées deux couches semi-conductrices III-V 34 et 36 prenant en sandwich la région active 38.

Puis, l'autre réflecteur 40 du VCSEL est réalisé sous forme d'un réflecteur accordable 1 tel qu'il a été décrit dans sa généralité en relation avec l'une quelconque des figures 1 à 7. Une flèche 42 indique la direction
10 de sortie de la lumière. Le VCSEL de l'invention ne se distingue donc que par son réflecteur accordable de sortie.

Le réflecteur accordable selon l'invention 1 permet de faire varier la longueur centrale de résonance du réflecteur, ce qui revient pour une longueur d'onde fixée, à moduler sa phase à la réflexion, ce qui permet de
15 moduler la longueur d'onde de résonance du VCSEL lui-même. Cette approche d'accordabilité est très attractive en terme de taux d'accordabilité amélioré et donc en terme de réduction de l'encombrement du dispositif ainsi que des tensions de commande électrostatiques requises (au moins un ordre de grandeur plus faible que celles connues où
20 on fait varier la longueur de la cavité pour moduler la longueur d'onde du VCSEL).

La figure 12 montre sur un diagramme la transmission d'un réflecteur selon l'invention en fonction de la longueur d'onde pour différents interstices I dans le cadre d'une utilisation comme réflecteur
25 accordable dans un VCSEL.

La courbe de résonance 121 pour laquelle l'interstice est de 45nm possède un pic de résonance à environ 1,452 μ m, la courbe de résonance

122 pour laquelle l'interstice est de 50nm possède un pic de résonance à 1,427 μ m, la courbe de résonance 123 pour laquelle l'interstice est de 55nm possède un pic de résonance à 1,425 μ m, la courbe de résonance 124 pour laquelle l'interstice est de 60nm possède un pic de résonance à 1,422 μ m, et la courbe de résonance 125 pour laquelle l'interstice est de 65nm possède un pic de résonance à 1,42 μ m.

En diminuant l'interstice I, on décale le pic de résonance du VCSEL vers les longueurs d'ondes plus longues.

On voit donc que l'on peut ainsi contrôler la longueur d'onde de résonance de la cavité optique d'un VCSEL

La figure 13 montre schématiquement en perspective et en coupe un réflecteur dans lequel chaque membrane 3a, 3b de guide diélectrique comprend un réseau périodique formé par un réseau bidimensionnel de trous 50. Sur cette figure, pour une meilleure compréhension, on ne montre que les membranes 3a, 3b sans les écarteurs 4a, 4b et le substrat qui serait disposés de manière analogue à la façon du mode de réalisation des figures 1 à 4.

On comprend donc que le réflecteur accordable 1 selon l'invention est très compact et peu consommateur d'énergie. Il peut être utilisé dans de nombreuses applications comme par exemple des capteurs optiques ou dans des applications télécom sur puce, très porteuses.

Notamment pour les télécommunications, le réflecteur accordable selon l'invention peut être utilisé pour commuter ou filtrer des signaux optiques.

La fabrication des dispositifs VCSELs dotés de réflecteurs membranaires est parfaitement compatible avec les procédés de la technologie silicium CMOS, notamment en raison de la compacité du

dispositif qu'il autorise. Il est donc envisageable de produire par exemple des matrices de VCSELs accordables, en limitant la gamme d'accordabilité exigée pour chaque composant : on peut ainsi explorer une large gamme spectrale d'émission en se contentant d'ajuster la longueur d'onde
5 d'émission sur une plage de l'ordre de quelques nm (simplement supérieure à l'écart spectral nominal entre deux émetteurs adjacents dans le domaine spectral). On peut ainsi relaxer significativement les conditions imposées pour réaliser le taux d'accordabilité requis, par exemple en réduisant les tensions de commande électrostatique, tout en opérant avec
10 des dispositifs compacts, c'est-à-dire dont les parties mobiles du réflecteur accordable sont plus rigides. Ces caractéristiques électromécaniques remarquables - compacité donc faible inertie des parties mobiles (pouvant se réduire à une seule tige de silicium de quelques μm de longueur et d'une fraction de μm de section), rigidité de ces dernières, faible tension
15 de commandes en raison du très fort taux d'accordabilité du procédé proposé, comme indiqué plus haut - permettent d'envisager la réalisation de très grandes vitesses d'accordabilité.

Des scénarios de mise en œuvre de matrices de VCSELs accordables pour le multiplexage optique dense (DWDM) sur puce en optique guidée
20 sur très courtes distances (à l'échelle du millimètre) sont ainsi possibles.

REVENDEICATIONS

1. Réflecteur optique accordable (1) en longueur d'onde comprenant deux membranes (3a, 3b) de guides diélectriques en vis-à-vis dont l'interstice (I) peut être ajusté pour accorder la réflectivité du réflecteur optique (1) en longueur d'onde, chaque membrane (3a, 3b) comportant un cristal photonique formant un réseau périodique ou quasi-périodique (5a, 5b) et le contraste entre l'indice de réfraction des membranes (3a, 3b) d'une part et le milieu contenu dans l'interstice (I) étant élevé.

2. Réflecteur selon la revendication 1, dans lequel l'interstice (I) ajustable est inférieur ou égal à 25% de la longueur d'onde de la lumière à réfléchir.

3. Réflecteur selon la revendication 2, dans lequel l'interstice (I) ajustable est supérieur ou égal à 30nm.

4. Réflecteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le réseau périodique (5a, 5b) est formé par un cristal photonique bidimensionnel de trous.

5. Réflecteur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le réseau périodique (3a, 3b) comprend des tiges (9a, 9b), les tiges (9a, 9b) d'une membrane (3a, 3b) étant disposées en vis-à-vis des tiges (3b, 3a) de l'autre membrane (3b, 3a) pour former des paires, l'interstice (I) entre deux tiges (9a, 9b) d'une même paire de tiges peut être ajusté pour accorder la réflectivité du réflecteur optique en longueur d'onde, le contraste entre l'indice de réfraction des tiges d'une part et le milieu contenu dans l'interstice (I) étant élevé.

6. Réflecteur optique selon la revendication 5, dans lequel les interstices (I) de l'ensemble des paires de tiges peuvent être

ajustés pour accorder la réflectivité du réflecteur optique en longueur d'onde.

5 7. Réflecteur selon la revendication 6, dans lequel les interstices (I) de l'ensemble des paires de tiges peuvent être ajustés à des valeurs sensiblement identiques.

8. Réflecteur selon la revendication 5, dans lequel les interstices (I) de l'ensemble des paires de tiges peuvent être ajustés de façon de à varier selon une direction transversale du réflecteur.

10 9. Réflecteur selon l'une quelconque des revendications 5 à 8, dans lequel la périodicité du réseau périodique (5a, 5b) de paires de tiges (9a, 9b) est inférieure à la longueur d'onde, de préférence de $2/3$ de la longueur d'onde.

15 10. Réflecteur selon l'une quelconque des revendications 5 à 9, dans lequel la largeur des tiges (9a, 9b) est comprise entre 40% et 60% de la période du réseau.

11. Réflecteur selon l'une quelconque des revendications 5 à 10, dans lequel le réseau périodique (5a, 5b) comprend au moins quatre, de préférence huit paires de tiges.

20 12. Réflecteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel il est configuré pour réfléchir de la lumière pour une plage prédéterminée de longueur d'ondes situé entre $1\ \mu\text{m}$ et $7\ \mu\text{m}$.

25 13. Réflecteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le contraste d'indice de réfraction entre des membranes (3a, 3b) d'une part et le milieu (7) contenu dans l'interstice (I) d'autre part est supérieur à 1,5, de préférence 2.

14. Réflecteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'interstice (I) entre deux tiges peut être ajusté par voie électrostatique ou électrothermique.

15. Composant photonique, notamment sur puce, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un réflecteur (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes.

5 16. Diode laser à cavité verticale (30), dans lequel au moins un des réflecteurs (40) est un réflecteur selon l'une quelconque des revendications précédentes.

1/7

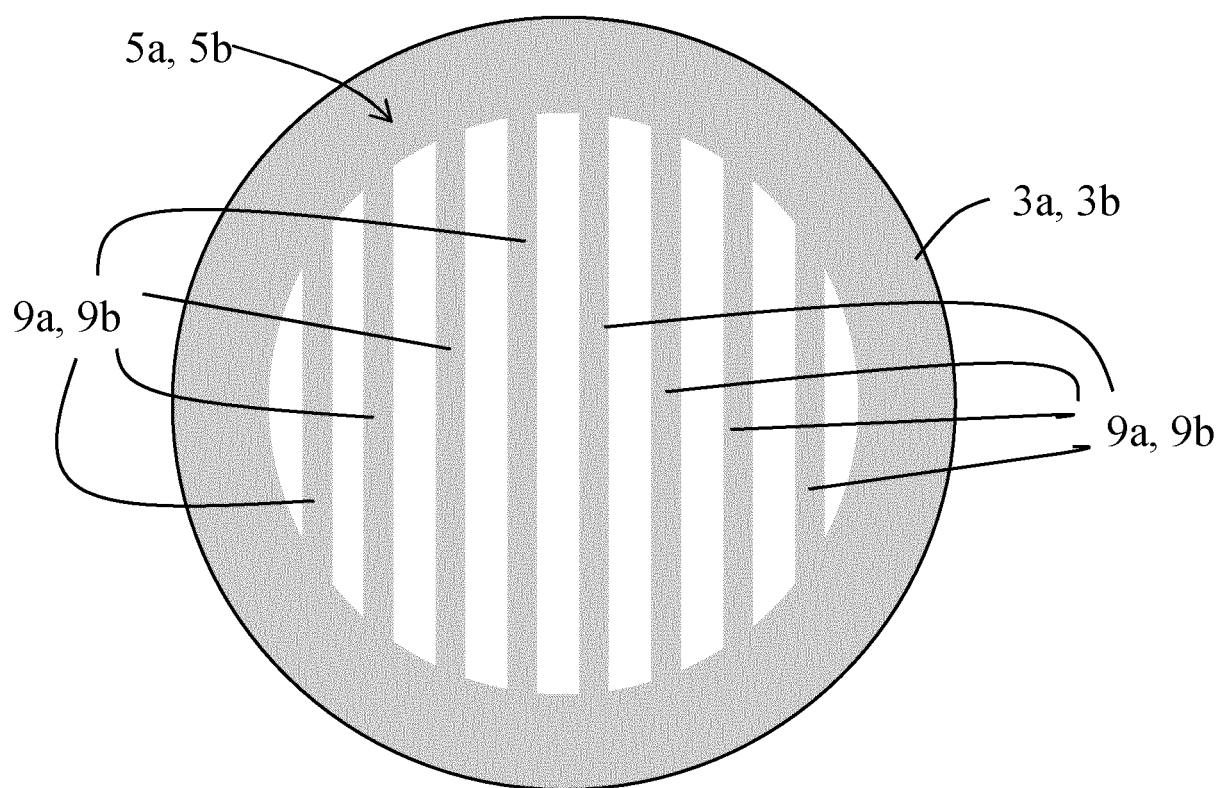
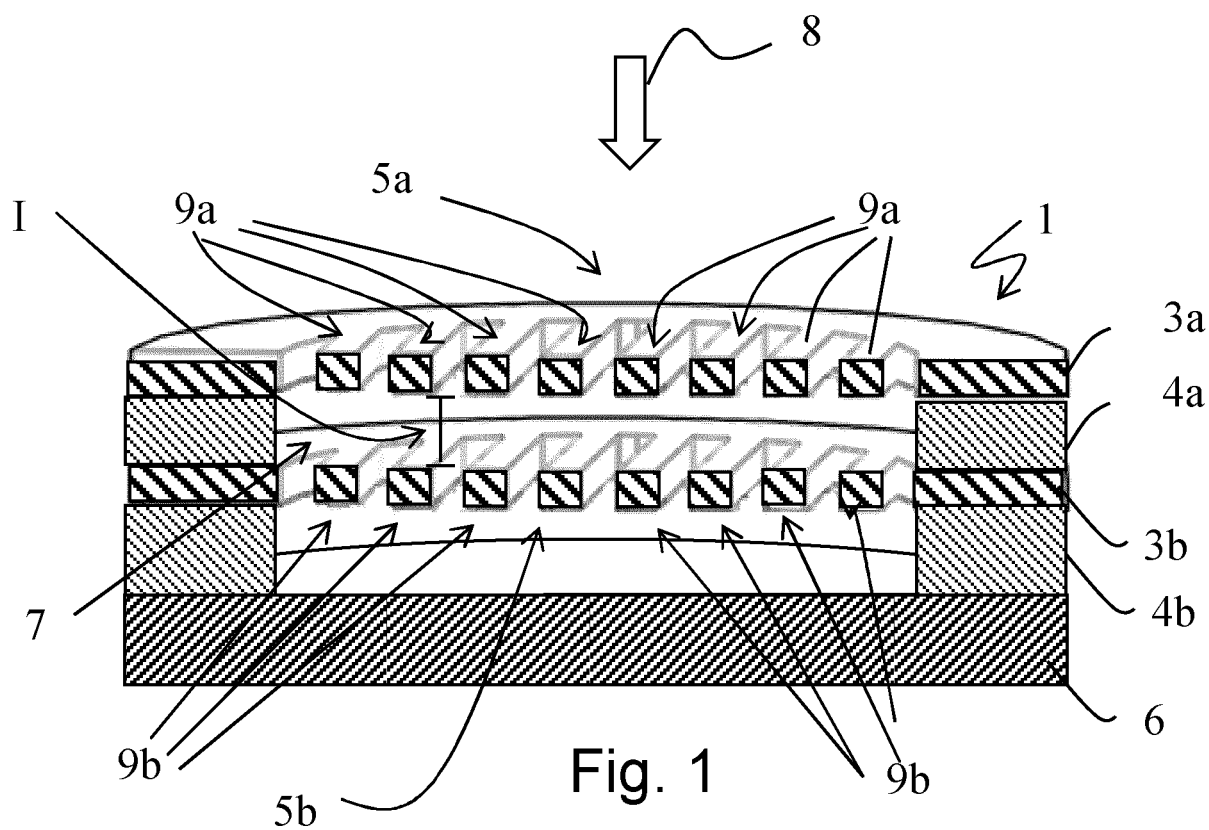
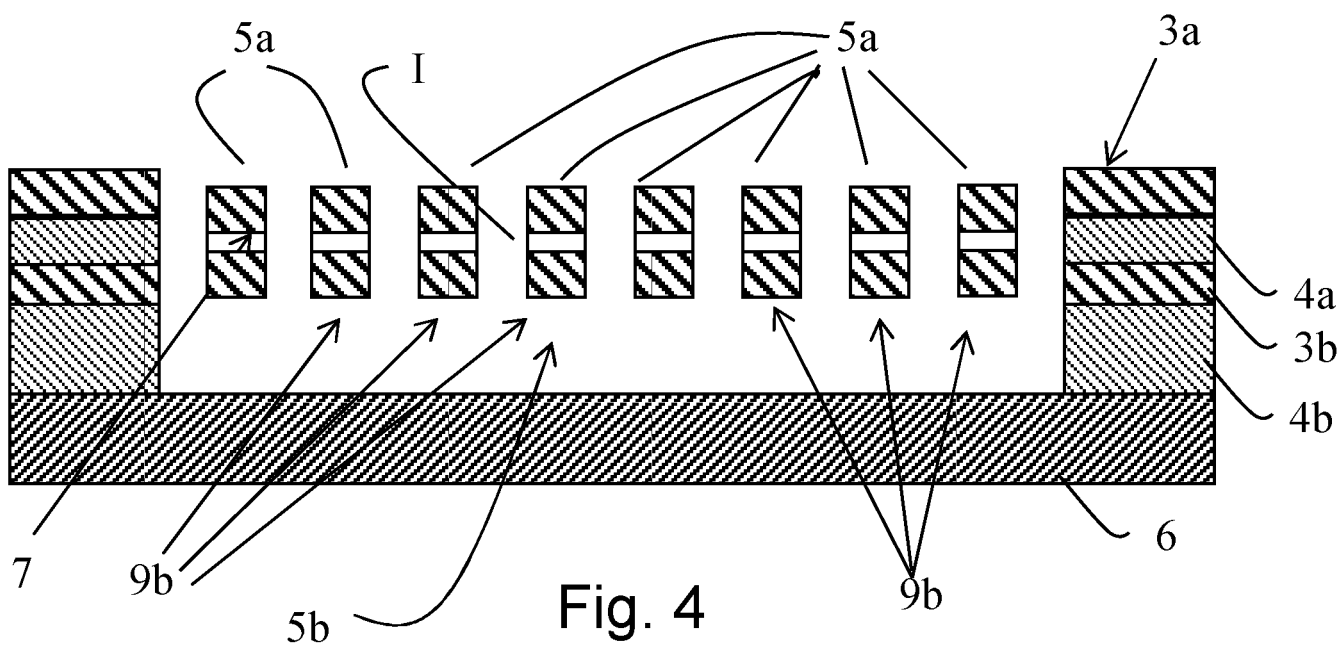
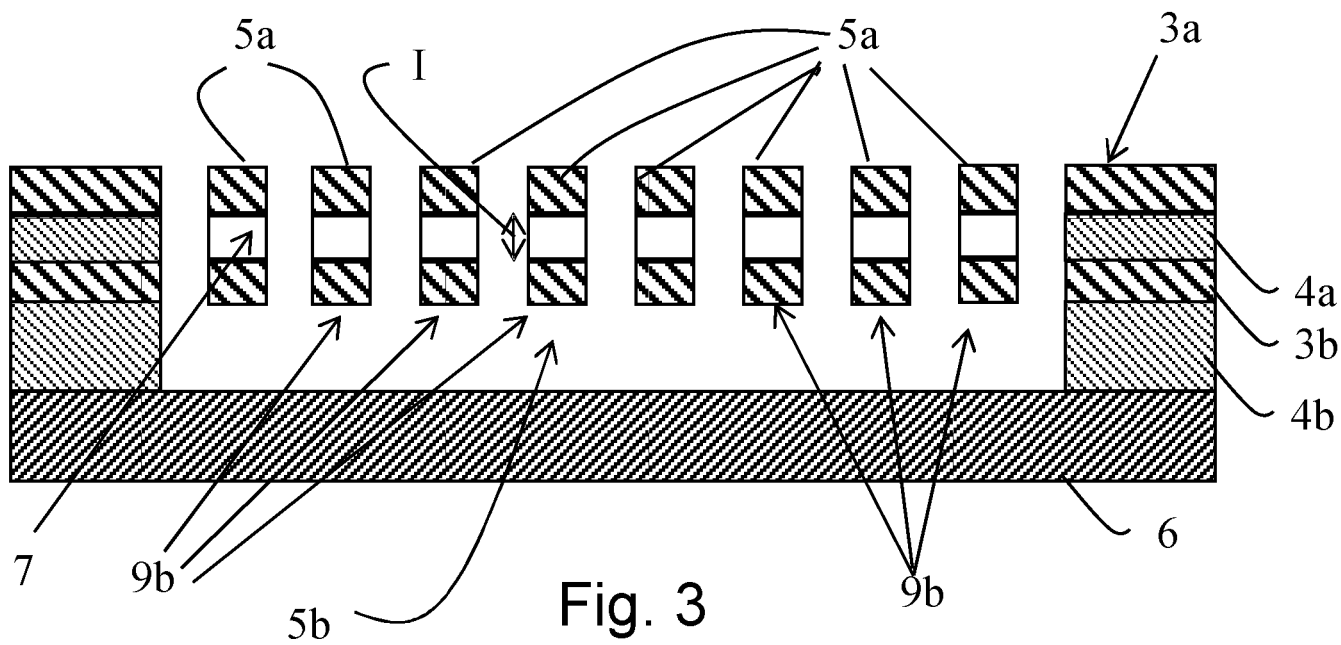


Fig. 2



3/7

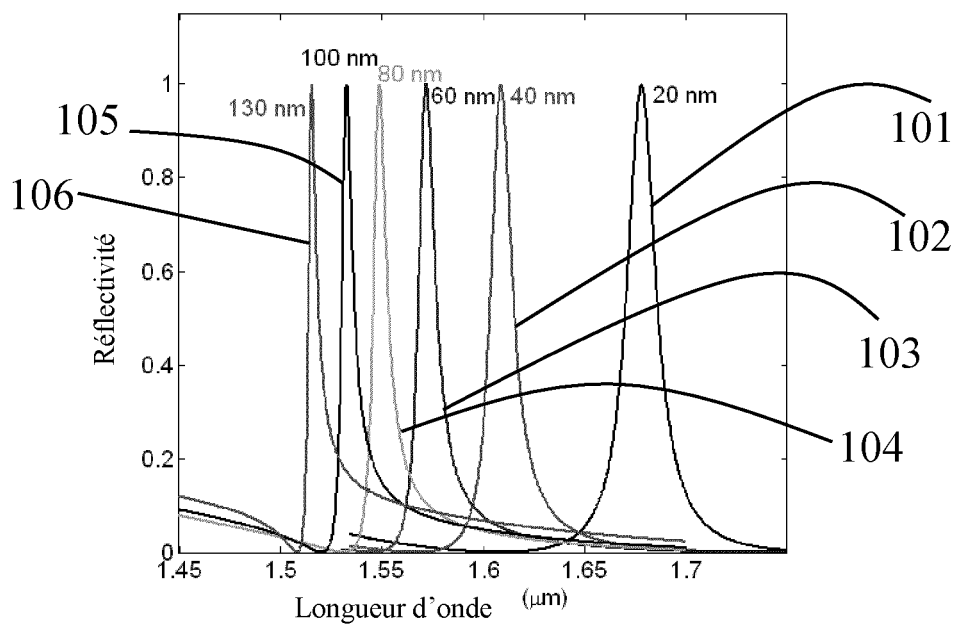


Fig. 5

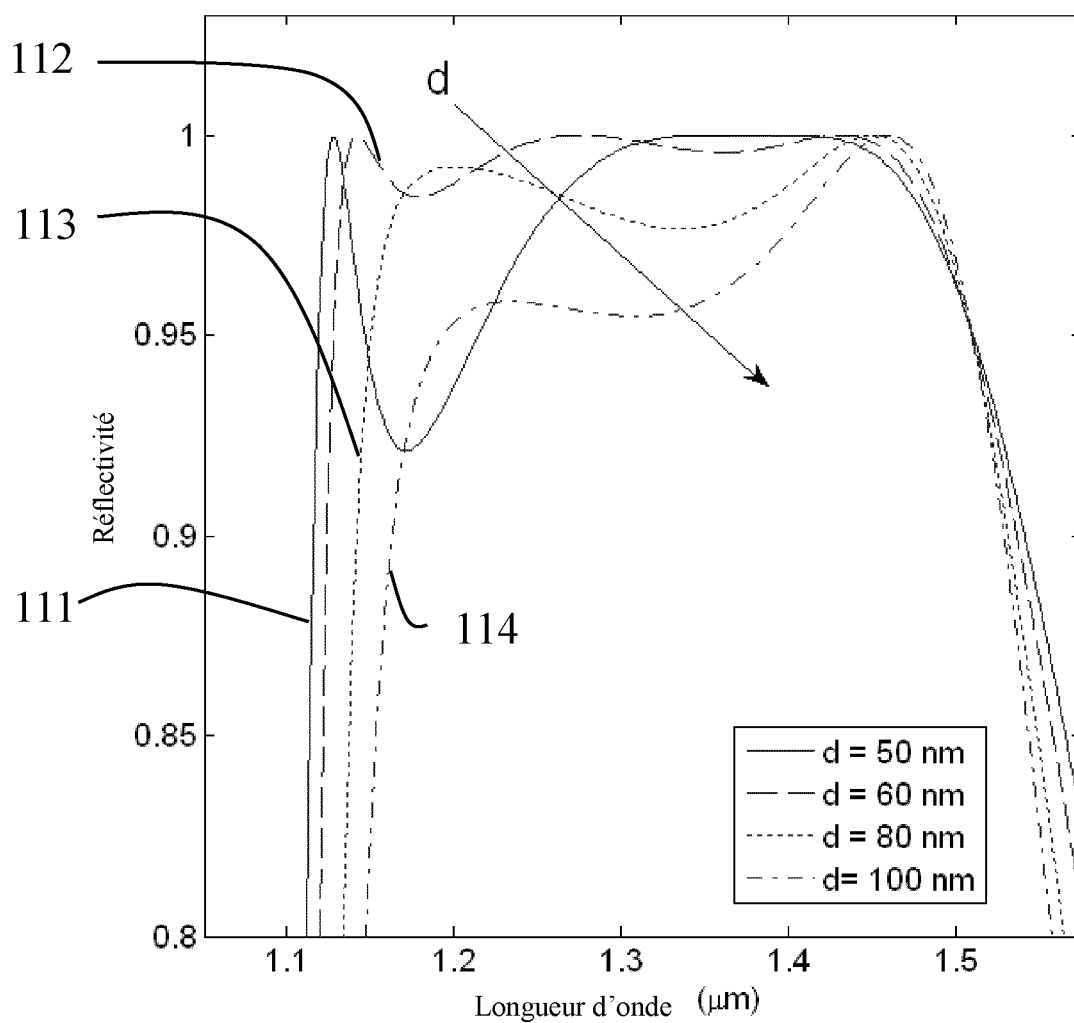


Fig. 6

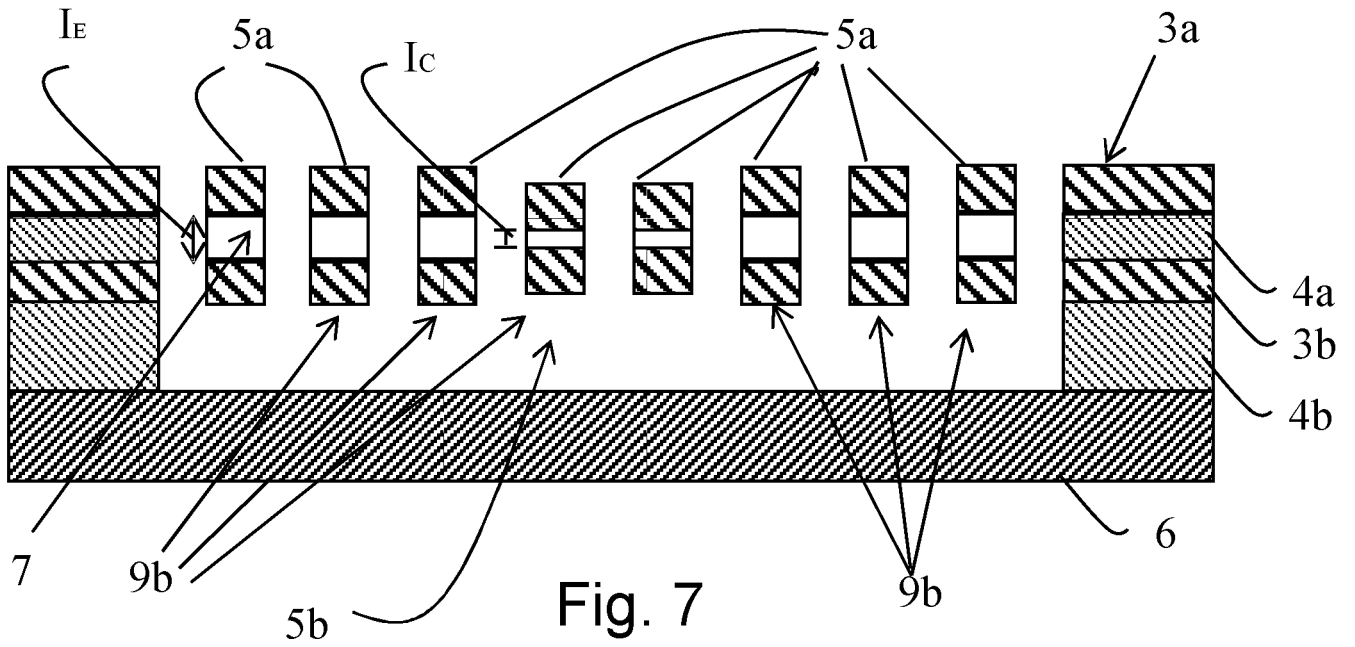


Fig. 7

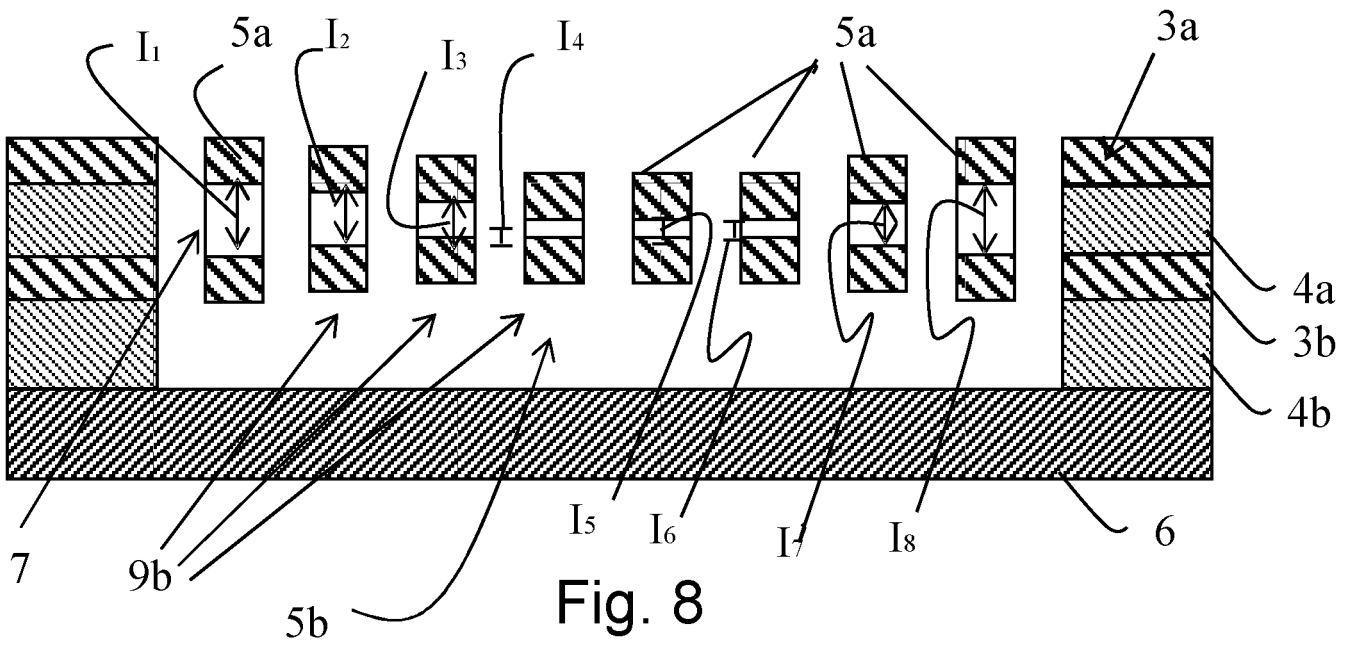


Fig. 8

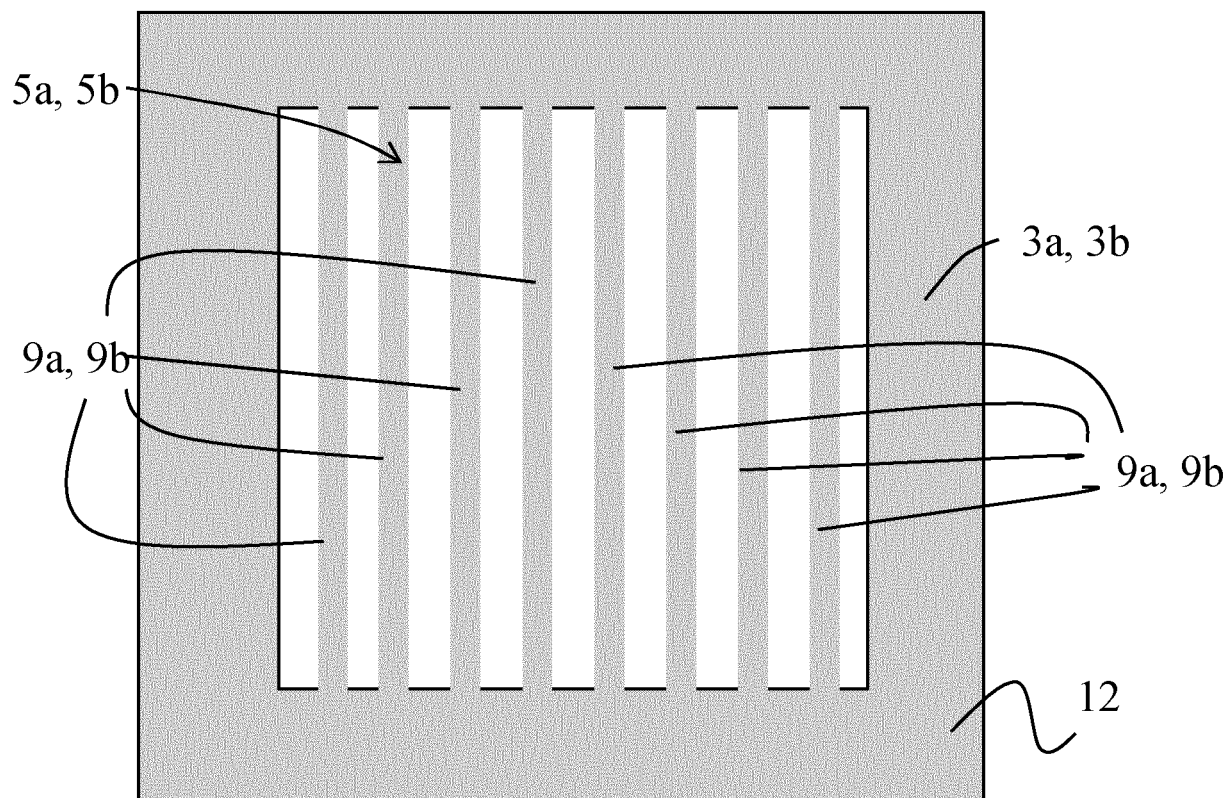


Fig. 9

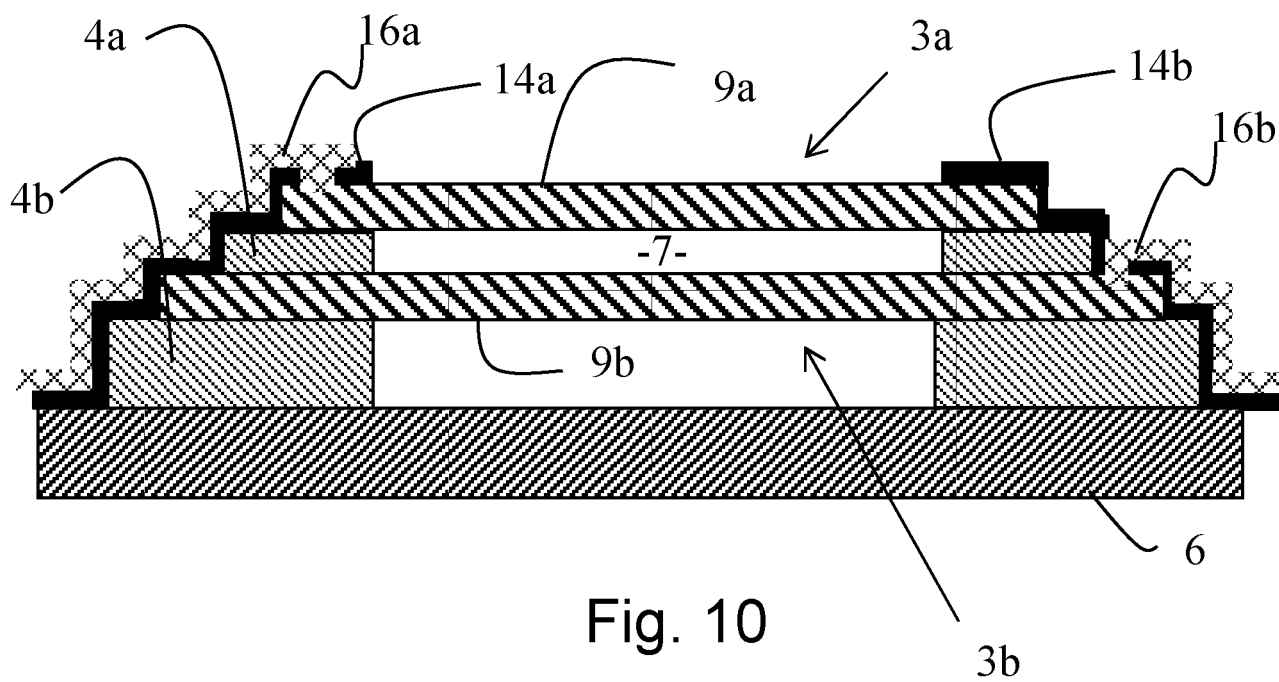


Fig. 10

6/7

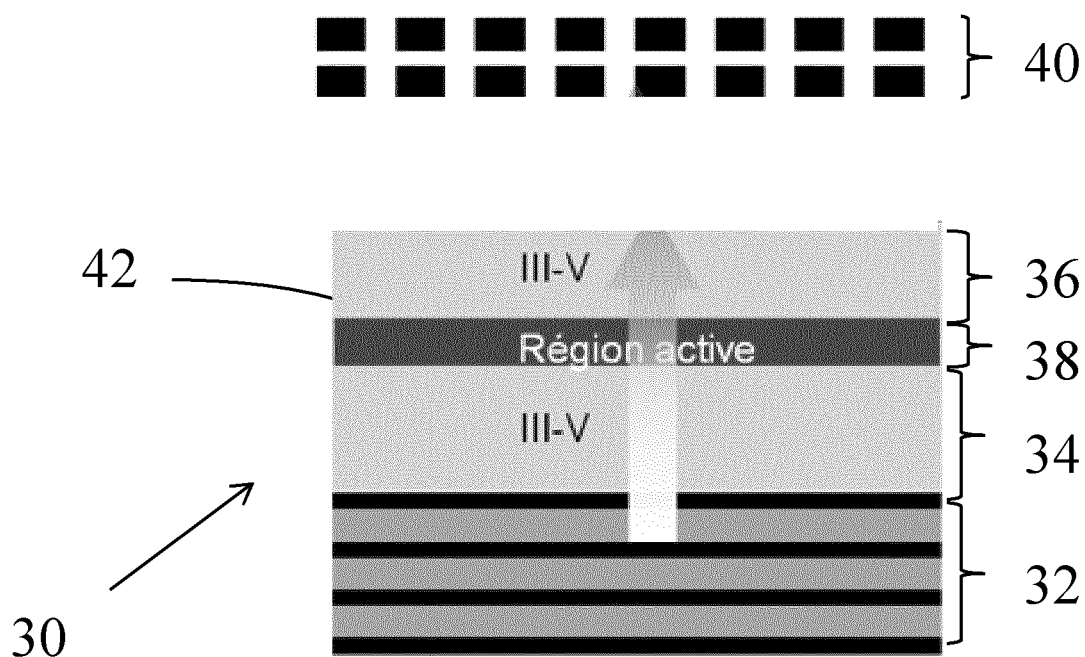


Fig. 11

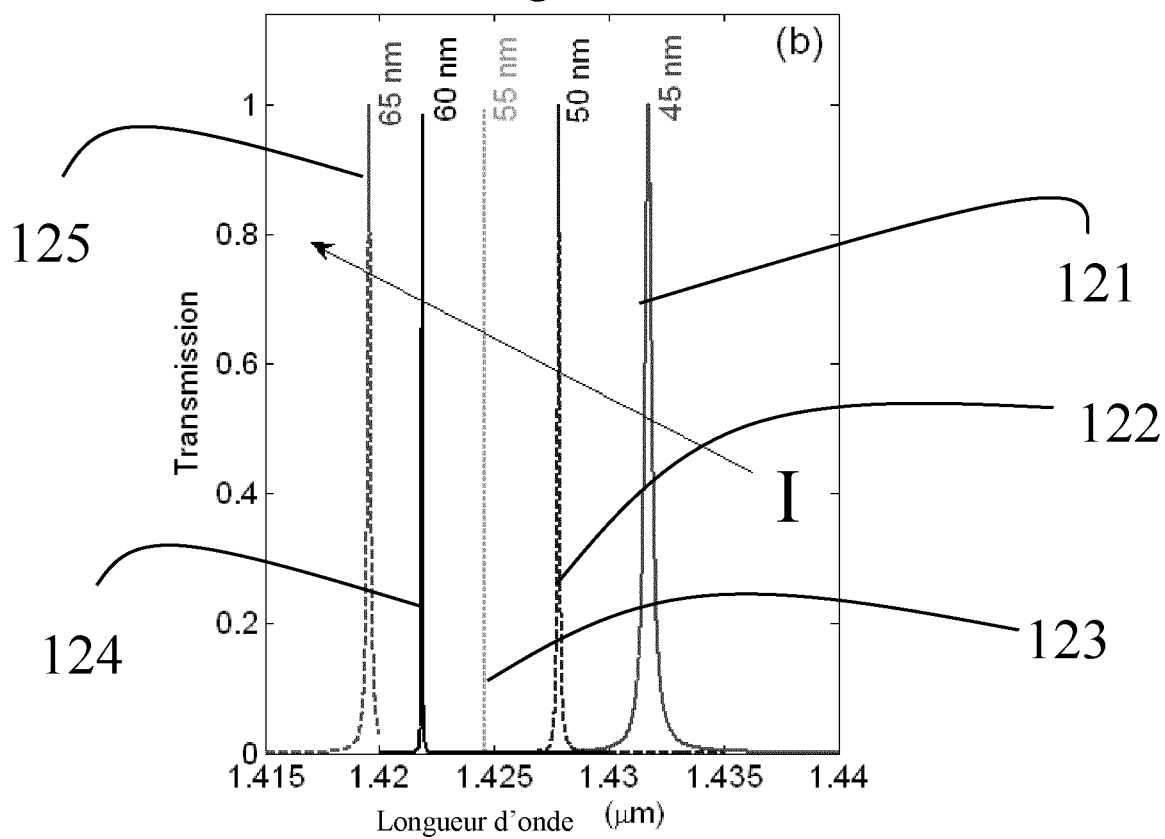


Fig. 12

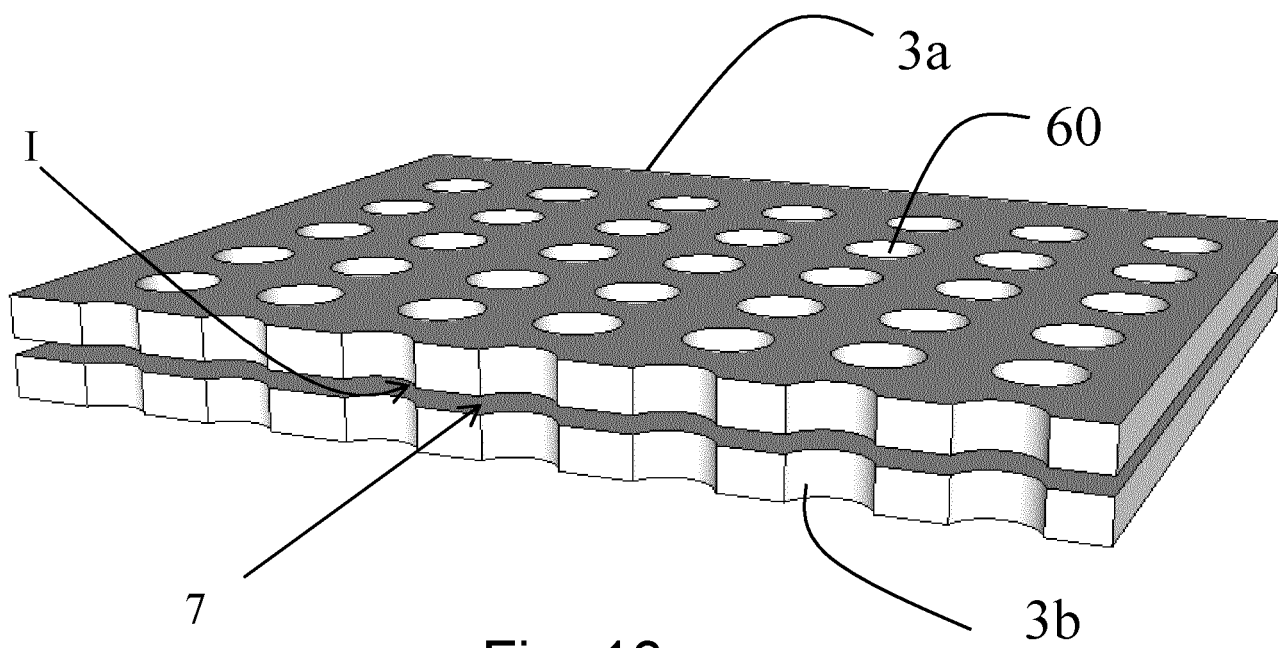


Fig. 13

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 784906
FR 1357947

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	SALIM BOUTAMI ET AL: "Photonic Crystal-Based MOEMS Devices", IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 13, no. 2, 1 mars 2007 (2007-03-01), pages 244-252, XP011179406, ISSN: 1077-260X, DOI: 10.1109/JSTQE.2007.893079	1-7,9-16	G02B5/18 G02B6/122 G02B5/26 H01L33/10 H01S5/183
Y	* III.A; III.B;III.C;IV; figures 3,7,11,12,13 *	8	
X	MIDOLO L ET AL: "Electromechanical wavelength tuning of double-membrane photonic crystal cavities", APPLIED PHYSICS LETTERS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, US, vol. 98, no. 21, 27 mai 2011 (2011-05-27), pages 211120-211120, XP012140782, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.3593963 * page 1, colonne 1 - page 2, colonne 1, alinéa 1; figures 1,2,3 *	1-4, 12-14	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
X	WO 2007/130152 A1 (UNIV LELAND STANFORD JUNIOR [US]; KILIC ONUR [US]; DIGONNET MICHEL J F) 15 novembre 2007 (2007-11-15)	1,4-7, 11-13	G02B
Y	* alinéas [0140], [0148] - [0154]; figures 21a-21c, 31,32,33B,33C *	8	
X	US 2005/270633 A1 (HERMAN PETER [CA] ET AL) 8 décembre 2005 (2005-12-08) * alinéas [0057] - [0063], [0069]; figure 2a, *	1,12,13	
A	WO 2008/053442 A2 (KONINKL PHILIPS ELECTRONICS NV [NL]; KLUNDER DERK J W [NL]; HERPEN MAA) 8 mai 2008 (2008-05-08) * alinéas [0068] - [0088]; figures 2,7 *	1-16	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
17 mars 2014		Casse, Martin	
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	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1357947 FA 784906**

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 **17-03-2014**

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
WO 2007130152 A1	15-11-2007	CA 2650887 A1	15-11-2007
		EP 2013655 A1	14-01-2009
		EP 2492729 A2	29-08-2012
		JP 2009535977 A	01-10-2009
		US 2008034866 A1	14-02-2008
		US 2011088470 A1	21-04-2011
		US 2012182557 A1	19-07-2012
		US 2013141729 A1	06-06-2013
		WO 2007130152 A1	15-11-2007
----- US 2005270633 A1	08-12-2005	CA 2507421 A1	14-11-2005
		US 2005270633 A1	08-12-2005
		US 2009046350 A1	19-02-2009
----- WO 2008053442 A2	08-05-2008	BR PI0718219 A2	12-11-2013
		CN 101595380 A	02-12-2009
		EP 2087344 A2	12-08-2009
		JP 5149299 B2	20-02-2013
		JP 2010508508 A	18-03-2010
		US 2010044585 A1	25-02-2010
		WO 2008053442 A2	08-05-2008
