

SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2(g))*

système de détection (5), le deuxième substrat (2) comprenant au moins un guide d'onde optique (21) en forme de U et le circuit optique intégré hybride (200) comprenant une jonction Y (26) à guide d'onde planaire ayant une branche commune (160) et deux branches secondaires (161, 62).

Interféromètre de Sagnac à fibre optique compact

DOMAINE TECHNIQUE AUQUEL SE RAPPORTE L'INVENTION

La présente invention concerne de manière générale le domaine des
5 systèmes interférométriques.

Elle concerne plus particulièrement un système interférométrique de Sagnac à fibre optique en boucle, ou bien en ligne. Un tel système interférométrique trouve notamment des applications dans les gyroscopes à fibre optique (ou FOG pour fiber-optic gyroscope) ou encore dans les capteurs de
10 courant électrique (ou FOCS pour fiber-optic current sensor).

Elle concerne en particulier un système et procédé interférométrique à fibre optique de grande précision, compact, léger et de moindre coût de fabrication.

ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE

15 La figure 1A représente schématiquement un système interférométrique de Sagnac à fibre optique en boucle de l'art antérieur. Ce système interférométrique à fibre optique comporte généralement une source de lumière 4 émettant un faisceau source 100, une bobine de fibre optique 6, un photodétecteur 5, et deux séparateurs optiques de faisceaux : un séparateur de
20 bobine 19 et un séparateur source-récepteur 45, dit séparateur de récepteur. Le séparateur de bobine 19 sépare spatialement le faisceau source 100 en un premier faisceau divisé 150 et un deuxième faisceau divisé 250 qui se propagent dans des directions opposées dans la bobine de fibre optique 6. En sortie de la bobine, le séparateur de bobine 19 recombine ces deux faisceaux pour former un
25 faisceau interférométrique 300. Le séparateur source-récepteur 45 guide le faisceau interférométrique 300 vers le photodétecteur 5.

Lorsque le système interférométrique est au repos, les deux faisceaux divisés émergent de la bobine de fibre optique en phase, du fait de la réciprocité des trajets optiques dans la bobine de fibre optique.

30 Toutefois, en présence de phénomènes physiques susceptibles de produire des effets non-réciproques sur le trajet optique des deux faisceaux contra-propagatifs dans la bobine de fibre optique 6, une différence de phase apparaît dans le faisceau interférométrique détecté.

Parmi les principaux phénomènes physiques induisant des effets non-

réciroques, la rotation du système interférométrique autour de l'axe de la bobine de fibre optique induit une différence de phase proportionnelle à la vitesse de rotation. De cette propriété, appelée effet Sagnac, découle la principale application d'un interféromètre en boucle de Sagnac à un gyroscope pour mesurer une

5 vitesse de rotation autour de l'axe de la bobine de fibre optique.

De façon avantageuse, comme illustré sur la figure 1A, un système interférométrique de Sagnac à fibre optique comporte un circuit optique intégré multifonction 39 (noté MIOC pour Multifunction Integrated Optical Circuit en terminologie anglo-saxonne). Le circuit optique intégré 39 comprend des guides

10 d'onde optiques formés de préférence par échange protonique (ou APE pour Annealed Proton Exchange) sur un substrat plan électro-optique, par exemple de niobate de lithium. L'échange protonique sur niobate de lithium conduit à la formation de guides mono-polarisation et le guide d'onde d'entrée 29 forme donc un polariseur à guide d'onde monomode qui ne guide qu'une seule polarisation

15 linéaire. Le circuit optique intégré 39 comprend aussi un séparateur de bobine 19 de type à jonction Y formé par division du guide d'onde 29 en deux branches secondaires monomodes. De façon avantageuse, le circuit optique intégré 39 comprend aussi des électrodes 9 reliées à un générateur électrique pour former un modulateur électro-optique adapté pour moduler le déphasage des deux

20 faisceaux contra-propagatifs. Le substrat plan du circuit optique intégré multifonction 39 peut aisément être relié sur un côté aux deux extrémités de la bobine de fibre optique 6 et sur un côté opposé par une section de fibre optique 49 au séparateur source-récepteur 45.

Un gyroscope à fibre optique multiaxe comporte plusieurs bobines de

25 fibre optique combinées avec un ou plusieurs circuits optiques intégrés multifonctions, une même source ou plusieurs sources et un ou plusieurs détecteurs.

Les gyroscopes à fibre optique sont de plus en plus utilisés pour la mesure de rotation dans les systèmes de navigation inertielle ou de guidage, du

30 fait de leurs performances en sensibilité, linéarité et stabilité.

Un gyroscope à fibre optique utilisant une ou plusieurs bobines de fibre optique offre des avantages de compacité dû à l'utilisation de fibres optiques.

D'autres phénomènes physiques, tels que l'effet Faraday magnéto-optique, sont aussi susceptibles d'induire des différences de phase non-

réciroques, et peuvent être mesurés au moyen d'un interféromètre de Sagnac à fibre optique en boucle, ou bien en ligne et sont utilisés par exemple dans des capteurs de courant électrique (J. Blake, P. Tantaswadi, R.T. de Carvalho, « In-line Sagnac interferometer current sensor », IEEE Transactions on power delivery, 5 vol. 11, no. 1, 1996).

A titre d'exemple, la figure 1B représente schématiquement un système interférométrique de Sagnac à fibre optique en ligne de l'art antérieur. Les mêmes signes de référence désignent des éléments analogues à ceux de la figure 1A. La bobine de fibre optique 66 est ici formée à partir d'une fibre à conservation de 10 polarisation circulaire, réalisée par exemple en technologie dite de fibre à structure de contrainte en hélice (ou « spun fibre » en anglais). La bobine de fibre optique 66 est enroulée autour d'un axe où se situe un conducteur de courant électrique, noté I. Une première extrémité 661 de la bobine de fibre optique 66 est reliée ou fixée à une lame quart d'onde 68. La deuxième extrémité 662 de la bobine de fibre 15 optique 66 est fixée à un miroir 77. Un séparateur-combinez de polarisation 70 reçoit deux faisceaux polarisés linéairement 122, 123 suivant des polarisations orthogonales et les injecte dans une section de fibre à maintien de polarisation linéaire 67. La lame quart d'onde 68 transforme ces deux faisceaux polarisés linéairement 122, 123 en un premier faisceau polarisé circulaire droit 133 et un 20 deuxième faisceau polarisé circulaire gauche 132. Le premier faisceau polarisé circulaire droit 133 et le deuxième faisceau polarisé circulaire gauche 132 se propagent dans la bobine de fibre optique 66 jusqu'au miroir 77 où ils sont réfléchis en échangeant leur polarisation et forment respectivement un premier faisceau polarisé circulaire gauche 143 et un deuxième faisceau polarisé circulaire 25 droit 142. Le premier faisceau polarisé circulaire gauche 143 et le deuxième faisceau polarisé circulaire droit 142 parcourent la bobine de fibre optique 66 en sens inverse. Ainsi, chaque faisceau lumineux parcourt successivement la bobine de fibre optique 66 suivant les deux états inverses de polarisation circulaire. La lame quart d'onde 68 transforme le premier faisceau polarisé circulaire gauche 30 143 et le deuxième faisceau polarisé circulaire droit 142 en deux faisceaux polarisés linéairement de polarisations transverses. Par effet Faraday magnéto-optique, le courant électrique I aligné sur l'axe de la bobine induit une différence de phase entre les faisceaux polarisés circulairement se propageant dans la bobine de fibre optique 66.

De manière générale, il est souhaitable d'accroître la compacité et/ou de réduire le poids et le coût de fabrication des systèmes interférométriques de Sagnac à fibre optique en boucle ou en ligne tout en conservant leurs performances techniques de sensibilité, stabilité et facteur d'échelle.

5

OBJET DE L'INVENTION

Afin de remédier aux inconvénients précités de l'état de la technique, la présente invention propose un interféromètre de Sagnac à fibre optique en boucle ou en ligne comprenant une source lumineuse, un système de détection et au moins une bobine de fibre optique.

10

Plus particulièrement, on propose selon l'invention un interféromètre de Sagnac à fibre optique comportant un circuit optique intégré hybride comprenant au moins un premier substrat plan en matériau électro-optique et un deuxième substrat plan en matériau transparent à la longueur d'onde de la source, le premier substrat et le deuxième substrat ayant une interface commune entre deux
15 côtés adjacents, le premier substrat comprenant un guide d'onde optique d'entrée-sortie relié à la source lumineuse et au système de détection, une paire d'autres guides d'onde optiques comprenant un premier guide d'onde optique et un deuxième guide d'onde optique, le premier guide d'onde optique et le deuxième guide d'onde optique étant reliés à au moins une extrémité de la bobine de fibre
20 optique, un système de modulation électro-optique comprenant au moins une électrode disposée le long du premier guide d'onde optique et/ou du deuxième guide d'onde optique, le deuxième substrat comprenant au moins un guide d'onde optique en forme de U, le circuit optique intégré hybride comprenant une jonction Y à guide d'onde planaire ayant une branche commune et deux branches
25 secondaires, le premier substrat et le deuxième substrat étant disposés de manière à ce qu'une extrémité du guide d'onde optique en forme de U soit alignée avec une extrémité du guide d'onde optique d'entrée-sortie, et que l'autre extrémité du guide d'onde optique en forme de U soit alignée avec la branche commune de la jonction Y, chacune des deux branches secondaires de la jonction
30 Y étant alignée avec une extrémité d'un guide d'onde optique de la paire d'autres guides d'onde optiques.

D'autres caractéristiques non limitatives et avantageuses de l'interféromètre de Sagnac à fibre optique conforme à l'invention, prises individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles, sont

les suivantes :

- la jonction Y est formée sur le premier substrat ;
- la jonction Y est formée sur le deuxième substrat ;
- le guide d'onde optique en forme de U présente une différence d'indice de réfraction avec le deuxième substrat d'au moins 0,05, et de préférence comprise entre 0,1 et 0,2 ;
- le guide d'onde optique en forme de U présente un rayon de courbure inférieur ou égal à 1 mm, et de préférence inférieur ou égal à 0,5 mm.

Dans un mode de réalisation particulier, la bobine de fibre optique est à conservation de polarisation circulaire, la première extrémité de la bobine de fibre optique étant reliée à une branche commune d'un coupleur séparateur de polarisation via une lame quart d'onde, la deuxième extrémité de la bobine de fibre optique étant reliée à un miroir, la jonction Y du circuit intégré hybride formant un séparateur de faisceau dans le plan du substrat, le premier guide d'onde optique étant relié à une première branche secondaire du séparateur-combinezur de polarisation et le deuxième guide d'onde optique étant relié à une deuxième branche secondaire du séparateur-combinezur de polarisation.

Dans un autre mode de réalisation particulier, le premier guide d'onde optique est relié à une première extrémité de la bobine de fibre optique et le deuxième guide d'onde optique est relié à une deuxième extrémité de la bobine de fibre optique.

Selon un mode de réalisation particulier et avantageux, l'interféromètre comporte N bobines de fibre optique, où N est un nombre entier naturel supérieur ou égal à deux, le premier substrat comprenant N guides d'onde optique d'entrée-sortie, N paires d'autres guides d'onde optiques, chaque guide d'onde desdites N paires d'autres guides d'onde optiques étant relié à une extrémité d'une des N bobines de fibre optique, le système de modulation électro-optique comprenant au moins N électrodes, chacune des au moins N électrodes étant disposée le long d'un guide d'onde desdites N paires d'autres guides d'onde optiques, le deuxième substrat comprenant N guides d'onde optiques en forme de U, le circuit optique intégré hybride comprenant N jonctions Y à guide d'onde planaire, chaque jonction Y desdites N jonctions Y ayant une branche commune et deux branches secondaires, le premier substrat et le deuxième substrat étant disposés de manière à ce qu'une extrémité de chaque guide d'onde optique en forme de U soit

alignée avec une extrémité d'un des N guides d'onde optique d'entrée-sortie, l'autre extrémité de chaque guide d'onde optique en forme de U soit alignée avec la branche commune d'une des N jonctions Y, chacune des deux branches secondaires des N jonctions Y étant alignée avec une extrémité d'un guide d'onde

5 desdites N paires d'autres guides d'onde optique.

D'autres caractéristiques non limitatives et avantageuses de l'interféromètre de Sagnac à fibre optique conforme à l'invention, prises individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles, sont les suivantes :

- 10 - le système de détection comporte au moins un premier détecteur ;
- le circuit optique intégré hybride comporte en outre un troisième substrat plan en matériau transparent, le troisième substrat et le premier substrat ayant une autre interface commune entre deux côtés adjacents, le troisième substrat comprenant une pluralité de guides d'onde optiques,
- 15 chaque extrémité de guide d'onde optique du premier substrat sur l'autre interface étant relié à une extrémité de guide d'onde optique du troisième substrat ;
- le troisième substrat intègre la source lumineuse et au moins un détecteur ;
- le système de détection comporte N détecteurs ;
- 20 - l'interféromètre comporte N sources lumineuses ;
- le premier substrat est formé dans un matériau choisi parmi le niobate de lithium, le phosphore d'indium, l'arséniure de gallium et l'arséniure d'aluminium et de gallium ;
- le deuxième substrat est formé dans un matériau choisi parmi un verre
- 25 optique, un nitrure de silicium, un silicium sur isolant et de la silice sur silicium.

DESCRIPTION DETAILLEE D'UN EXEMPLE DE REALISATION

La description qui va suivre en regard des dessins annexés, donnés à titre d'exemples non limitatifs, fera bien comprendre en quoi consiste l'invention et

30 comment elle peut être réalisée.

Sur les dessins annexés :

- la figure 1A représente schématiquement un système interférométrique de Sagnac à fibre optique en boucle selon l'art antérieur ;
- la figure 1B représente schématiquement un système interférométrique

de Sagnac à fibre optique en ligne selon l'art antérieur ;

- la figure 2 représente schématiquement un système interférométrique de Sagnac à fibre optique en boucle et à circuit optique intégré hybride selon un premier mode de réalisation ;

5 - la figure 3 représente schématiquement un système interférométrique de Sagnac à fibre optique en boucle et à circuit optique intégré hybride selon un deuxième mode de réalisation ;

 - la figure 4 représente schématiquement un système interférométrique de Sagnac à trois bobines de fibre optique en boucle et à circuit optique intégré
10 hybride selon une variante du deuxième mode de réalisation ;

- la figure 5 représente schématiquement un système interférométrique de Sagnac à fibre optique en boucle et à circuit optique intégré hybride selon un troisième mode de réalisation ;

 - la figure 6 représente schématiquement un système interférométrique de Sagnac à trois bobines de fibre optique en boucle et à circuit optique intégré
15 hybride selon une variante du troisième mode de réalisation ;

- la figure 7 représente schématiquement un système interférométrique de Sagnac à fibre optique en ligne selon un mode de réalisation particulier.

On considère un système interférométrique de Sagnac à fibre optique
20 comportant un circuit optique intégré en niobate de lithium formé par échange protonique (ou APE pour annealed proton exchange), tel qu'illustré par exemple en Figure 1A. Le circuit optique intégré 39 en niobate de lithium permet de rassembler plusieurs composants optiques et électro-optiques réalisant ainsi plusieurs fonctions. Le guide d'onde 29 d'entrée-sortie formé par échange
25 protonique permet de polariser linéairement le faisceau source 100. De plus, ce guide d'onde 29 d'entrée-sortie sert aussi de filtre monomode spatial. Dans le sens aller, la jonction Y 19 permet de séparer optiquement le faisceau source 100 en deux faisceaux incidents divisés 150, 250. Dans le sens retour, la jonction Y 19 permet de recombinaison les deux faisceaux divisés ayant parcouru chacun la bobine
30 en sens opposés pour former le faisceau interférentiel. Les électrodes 9 disposées le long des deux branches secondaires de la jonction Y sont reliées à un générateur électrique et permettent de moduler électro-optiquement la phase entre des faisceaux incidents divisés 150, 250.

Dispositif

La présente divulgation propose un interféromètre à fibre optique utilisant un circuit optique intégré hybride. Le circuit optique intégré hybride combine un premier substrat 1 plan électro-optique, par exemple en niobate de lithium, et au moins un deuxième substrat 2 plan transparent, par exemple en verre optique (par exemple type borosilicate).

En variante, le premier substrat 1 est formé dans un matériau électro-optique choisi parmi le phosphore d'indium (InP), l'arséniure de gallium (AsGa) et l'arséniure d'aluminium et de gallium (AlGaAs). Ces matériaux sont semi-conducteurs et permettent de faire de la modulation de phase.

En variante, le deuxième substrat 2 est formé dans un matériau transparent à la longueur d'onde utilisée (par exemple supérieure à 0,5 micromètre), choisi parmi du nitrure de silicium, du silicium sur isolant (SOI) ou la silice sur silicium.

Plus particulièrement, le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2 sont disposés bout à bout et en contact direct par un de leur côté, aussi appelé épaisseur des substrats. De façon avantageuse, on utilise des moyens de fixation entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. Les moyens de fixation comprennent par exemple une colle et/ou un support mécanique ou tout autre moyen de fixation adapté.

Le premier substrat 1 comporte plusieurs composants optiques intégrés et/ou guides d'onde optiques. Le deuxième substrat 2 comporte au moins un guide d'onde optique en forme de U pour former un circuit optique planaire de type PLC (ou en anglais, « planar lightwave circuit »).

Sur la figure 2, on a représenté un système interférométrique de Sagnac à fibre optique en boucle et à circuit intégré hybride selon un premier mode de réalisation. Le système interférométrique comporte une source lumineuse 4, un système de détection 5, une bobine de fibre optique 6 et un circuit intégré hybride 200.

Le circuit intégré hybride 200 est ici constitué d'un premier substrat 1, par exemple en niobate de lithium et d'un deuxième substrat 2, par exemple en verre optique (borosilicate). Le système interférométrique comporte ici une seule bobine de fibre optique 6.

Le premier substrat 1 a généralement une forme géométrique. Dans le

plan de la figure 2, ou plan YZ dans un repère orthonormé (XYZ), le premier substrat 1 a par exemple une forme rectangulaire. Ici, les axes X, Y et Z coïncident avec les axes cristallographiques du premier substrat 1 en niobate de lithium : l'axe de propagation de la lumière (dans la longueur du substrat 1) est l'axe Y cristallographique, l'épaisseur est l'axe X cristallographique et la largeur est l'axe Z cristallographique. Le premier substrat 1 est de préférence formé dans un matériau planaire ayant une épaisseur comprise entre 0,35 mm et 2 mm, par exemple de 0,5 mm ou de 1 mm dans la direction de l'axe X. De manière connue, les côtés du premier substrat 1, pris dans l'épaisseur, sont de préférence inclinés d'un angle par rapport au plan XZ autour de l'axe X ou de l'axe Z pour éviter les rétro-réflexions parasites aux interfaces. Les angles d'inclinaison aux interfaces sont adaptés en fonction des lois de Snell-Descartes.

Le premier substrat 1 comporte un premier guide d'onde optique 11, un deuxième guide d'onde optique 12 et un guide d'onde optique d'entrée-sortie 10. Les guides d'onde optique 10, 11, 12 sont formés de préférence par échange protonique sur un substrat de niobate de lithium. De façon avantageuse, au moins une portion des guides d'ondes optiques 10, 11, 12 est disposée parallèlement dans le sens de la longueur L1 du substrat 1. Deux électrodes 91 sont déposées de part et d'autre le long du premier guide d'onde optique 11. Deux électrodes 92 sont déposées de part et d'autre le long du deuxième guide d'onde optique 12. Dans ce premier mode de réalisation, le premier substrat 1 comporte une jonction 166 de type jonction Y à guide d'onde planaire ayant une branche commune 160, une branche secondaire 161 et une autre branche secondaire 162. Une extrémité du premier guide d'onde optique 11 située sur un côté du substrat 1 est reliée directement à une première extrémité 61 de la bobine de fibre optique 6. Une extrémité du deuxième guide d'onde optique 12 située sur le même côté du substrat 1 est reliée directement à la deuxième extrémité 62 de la bobine de fibre optique 6. L'autre extrémité du premier guide d'onde optique 11 est reliée directement à la branche secondaire 161 de la jonction Y. L'autre extrémité du deuxième guide d'onde optique 12 est reliée directement à l'autre branche secondaire 162 de la jonction Y. De préférence, dans le substrat 1 de niobate de lithium formé par APE, chaque branche de la jonction Y présente un rayon de courbure supérieur à au moins 10 mm. En effet, dans un substrat en niobate de lithium la différence d'indice de réfraction Δn entre un guide d'onde optique et le

substrat est de l'ordre de 0,005 à 0,01. Cette faible différence d'indice ne permet pas une bonne résistance aux pertes par courbure du guide d'onde optique. De plus, un guide d'onde optique formé par échange protonique sur substrat de niobate de lithium en APE ne guide qu'une polarisation alignée dans la direction de l'axe cristallographique Z.

Le guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 est monomode et forme un polariseur à guide d'onde qui ne guide qu'une seule polarisation. De façon avantageuse, deux électrodes 9 sont déposées de part et d'autre le long du guide d'onde optique d'entrée-sortie 10. Une extrémité du guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 est reliée à une extrémité 101 d'une fibre optique d'entrée-sortie 49. L'autre extrémité de la fibre optique d'entrée-sortie 49 est reliée à un séparateur source-récepteur 45. Ainsi l'extrémité 101 de la fibre optique d'entrée-sortie 49 est située sur le même côté du substrat 1 que les deux extrémités 61, 62 de la bobine de fibre optique 6. Les extrémités de la bobine de fibre optique 6 et l'extrémité 101 de la fibre d'entrée-sortie sont par exemple disposées dans un support en V (ou V-groove).

Le deuxième substrat 2 a aussi généralement une forme géométrique. Dans le plan de la figure 2, ou plan YZ, le deuxième substrat 2 a généralement une forme de rectangle. Le deuxième substrat 2 est de préférence formé dans un matériau plan ayant une épaisseur comprise 0,5mm et 3mm, par exemple d'environ 1 mm dans la direction de l'axe X. De manière analogue au substrat 1, les côtés du deuxième substrat 2, pris dans l'épaisseur, sont de préférence inclinés d'un angle compris entre 0 et 25 degrés par rapport au plan XZ autour de l'axe Z ou de l'axe X pour éviter les réflexions parasites à l'interface avec le premier substrat 1. Les angles d'inclinaison du substrat 1 et du substrat 2 à cette interface 20, sont adaptés en fonction des lois de Snell-Descartes.

Un côté dans l'épaisseur du deuxième substrat 2 est fixé sur un côté dans l'épaisseur du premier substrat 1 opposé au côté où sont fixées les extrémités de fibre optique. Le deuxième substrat 2 comporte un guide d'onde optique 21 en forme de U. Une extrémité du guide d'onde optique 21 en forme de U est alignée suivant les axes X et Z avec une extrémité du guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. L'autre extrémité du guide d'onde optique 21 en forme de U est alignée suivant les axes X et Z avec une extrémité de la branche commune 160 de la

jonction Y 166 sur la même interface 20. Le guide d'onde optique 21 en forme de U est par exemple formé par échange d'ion argent dans un verre borosilicate dopé sodium (Na) puis par diffusion sous effet thermique ou par effet électrique.

Les guides d'onde optiques 10, 11, 12 formés par échange protonique
5 dans le premier substrat ont généralement une section elliptique. L'indice de réfraction du substrat de niobate de lithium est d'environ 2,14 suivant l'axe extraordinaire Z, et d'environ 2,21 suivants les axes ordinaires X ou Y à la longueur d'onde de 1550 nm. La demi-largeur de mode, équivalent au rayon d'un faisceau gaussien à $1/e^2$ en intensité dans la direction parallèle au plan de la
10 surface du premier substrat est de l'ordre de 4 micromètres. La demi-largeur de mode équivalent au rayon d'un faisceau Gaussien à $1/e^2$ en intensité dans la direction transverse au plan de la surface du premier substrat est de l'ordre de 2,5 micromètres. Dans le deuxième substrat, le guide d'onde en forme de U a une section adaptée en fonction de la forme et des dimensions des guides d'onde du
15 premier substrat. Le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2 sont disposés de manière à aligner les extrémités du guide d'onde en forme de U avec les extrémités des guides d'onde du premier substrat 1 à l'interface 20.

Les côtés du premier substrat 1 et du deuxième substrat 2 qui sont adjacents sont transverses aux extrémités du guide d'onde optique 21 en forme
20 de U, à l'extrémité du guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 et à l'extrémité du guide d'onde formant la branche commune 160 de la jonction Y. De façon particulièrement avantageuse, les côtés adjacents, jointifs du premier substrat 1 et du deuxième substrat 2 sont inclinés d'un angle compris entre 0 et 25 degrés, par exemple de 8 degrés par rapport au plan XZ autour de l'axe X et/ou Z, de manière
25 à limiter les rétro-réflexions parasites à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. Par exemple, le premier et/ou le deuxième substrat sont taillés en forme de parallélogramme. Dans un autre exemple, les arêtes du premier et/ou du deuxième substrat sont taillées en forme de parallélépipède trapézoïdal isocèle. De façon avantageuse, les deux côtés opposés dans la
30 largeur du premier substrat 1 sont inclinés par rapport au plan XZ autour de l'axe X et/ou Z de manière à éviter les rétro-réflexions parasites dans le premier substrat 1.

Dans le deuxième substrat 2 en verre, le guide d'onde optique 21 en forme de U peut présenter un rayon de courbure inférieur à 1 mm et de préférence

inférieur à 0,5 mm, tout en conservant les propriétés de guidage optique, du fait de la différence d'indice de réfraction de l'ordre de 0,02 à 0,1 entre le cœur du guide d'onde 21 et le substrat 2, pour un guide d'onde ayant un diamètre compris entre 2 et 4 micromètres (μm). Comme pour le premier substrat 1, les deux côtés
5 opposés dans la largeur du deuxième substrat 2 sont inclinés par rapport au plan XZ autour de l'axe X ou Z de manière à éviter les rétro-réflexions parasites dans le deuxième substrat 2.

On observe que toutes les extrémités de fibre optique 101, 61, 62 sont disposées sur un même côté du circuit optique intégré hybride 200. Cette
10 disposition permet de limiter l'encombrement total du composant avec ses fibres optiques de connexion. Cette disposition permet d'augmenter le rayon de courbure des extrémités de la bobine de fibre optique 6 et/ou de la fibre optique d'entrée-sortie 49. Avantageusement, les fibres optiques sont disposées de manière à avoir un rayon de courbure d'au moins 5 mm, pour éviter les pertes par
15 courbure.

De plus, le deuxième substrat permet de replier le chemin optique dans le substrat de niobate de lithium et de limiter la longueur du circuit optique intégré hybride 200. Dans un exemple, le premier substrat 1 présente une longueur L1 de 16 mm, une largeur W1 de 3 mm et une épaisseur de 1 mm, le deuxième substrat
20 2 présente une longueur L2 de 3 mm, une largeur W2 de 3 mm et une épaisseur de 1 mm. Au total, le circuit optique intégré hybride a une longueur de $16+3 = 19\text{mm}$, une largeur de 3 mm et une épaisseur d'environ 1 mm. Par comparaison, un circuit optique intégré (comme illustré en fig. 1A) formé uniquement sur un substrat 1 en niobate de lithium intégrant en série un guide d'onde d'entrée-sortie,
25 une jonction Y et deux guides d'onde optiques 11, 12 parallèles a une longueur totale comprise entre 24 mm et 40 mm pour une largeur de 3 mm et une épaisseur de 1 mm.

Le circuit optique intégré hybride 200 permet d'intégrer plusieurs composants optiques sur un substrat composite de largeur réduite. Dans un
30 exemple de réalisation, le circuit optique intégré hybride 200 permet de réduire la longueur du circuit optique intégré seul et l'encombrement du circuit optique intégré relié aux fibres optiques environ d'un facteur 2. Le circuit optique intégré hybride de la figure 2 permet ainsi d'augmenter la compacité du système interférométrique à fibre optique. De plus, l'utilisation d'un circuit optique intégré

hybride permet aussi de réduire le poids du système interférométrique à fibre optique. Dans un autre exemple de réalisation, le circuit optique intégré hybride 200 permet d'augmenter la longueur du substrat de niobate de lithium, ce qui permet d'allonger les guides d'ondes optiques 11, 12 et les électrodes 91, 92 et
5 ainsi de baisser la tension de modulation appliquée pour une même profondeur de modulation. Enfin, l'utilisation d'un circuit optique intégré hybride permet de supprimer certaines opérations de montage et autorise une fabrication automatisée, réduisant ainsi le coût de fabrication.

Le circuit optique intégré hybride illustré en figure 2 permet de combiner
10 un guide d'onde monomode en forme de jonction Y 166 et un guide d'onde optique 21 monomode en forme de U, une extrémité du guide d'onde optique 21 monomode en forme de U étant reliée à la branche commune 160 du guide d'onde monomode en forme de jonction Y.

Dans le sens aller, le faisceau source 100 est guidé dans le guide d'onde
15 optique d'entrée-sortie 10 puis dans le guide d'onde optique 21 en forme de U. Le faisceau source est ensuite transmis et guidé sur la branche commune 160 du guide d'onde monomode en forme de jonction Y 166. La jonction Y 166 sépare le faisceau source en un premier faisceau divisé 150 et un deuxième faisceau divisé 250. Le premier faisceau divisé 150 se propage de manière guidée dans la
20 branche secondaire 161 de la jonction Y puis dans le premier guide d'onde optique 11 vers la première extrémité 61 de la bobine de fibre optique. De manière similaire, le deuxième faisceau divisé 250 se propage de manière guidée dans l'autre branche secondaire 162 de la jonction Y puis dans le deuxième guide d'onde optique 12 vers la deuxième 62 de la bobine de fibre optique. Le premier
25 faisceau divisé 150 parcourt la bobine dans un sens et en sort via la deuxième extrémité 62 et est guidée dans le deuxième guide d'onde optique 12. De manière réciproque, le deuxième faisceau divisé 250 parcourt la bobine en sens opposé et en sort via la première extrémité 61 et est guidée dans le premier guide d'onde optique 11.

30 Dans le sens retour, chaque branche secondaire 161, 162 du guide d'onde monomode en forme de jonction Y guide un faisceau ayant parcouru la bobine de fibre optique en sens mutuellement opposés. La jonction Y 166 recombine ces deux faisceaux pour former un faisceau interférentiel. Une partie du faisceau interférentiel est guidée par la branche 160 commune de la jonction Y.

Toutefois, le guide d'onde étant monomode, un seul mode est guidé sur la branche commune 160 de la jonction Y. Par conservation d'énergie, toute la puissance p du faisceau interférentiel est répartie entre un faisceau guidé et un faisceau non guidé. Il est connu qu'un mode antisymétrique se propage de manière non guidée dans le substrat (Arditty et al., « Reciprocity properties of a branching waveguide », Fiber-Optic Rotation Sensors, Springer series in optical sciences, Vol. 32, 1982, pp. 102-110). Une partie de ce mode antisymétrique non guidé se propage dans le premier substrat 1 et est réfractée à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2 puis se propage de manière non guidée dans le deuxième substrat 2. Au contraire, la partie guidée du faisceau interférentiel 300 se propage dans le guide d'onde optique 21 en forme de U puis dans le guide d'onde optique d'entrée-sortie 10. Dans le sens retour, le guide d'onde optique 21 forme un filtre spatial et le guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 un filtre en polarisation, autrement dit un polariseur. La combinaison de la jonction Y et du guide d'onde en forme de U permet d'éviter de collecter le mode antisymétrique non guidé du faisceau interférentiel dans le guide d'onde d'entrée-sortie 10 et/ou dans la fibre optique d'entrée-sortie 49.

Dans le circuit optique intégré hybride de la figure 2, le faisceau source 100 et le faisceau interférentiel guidé 300 effectuent chacun un passage dans le guide d'onde optique d'entrée-sortie 10. Or le guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 est polarisant. De plus, les guides d'onde optiques 11 et 12 sont aussi polarisants. Le faisceau lumineux passe deux fois dans le guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 polariseur, une fois dans le guide d'onde optique 11 et une fois dans le guide d'onde optique 12, pour chaque faisceau contra-propagatif. Ainsi, chaque faisceau effectue quatre passages dans un polariseur à guide d'onde. Ce quadruple passage dans les guides d'onde optique polarisant 10, 11, 12 en niobate de lithium équivaut à un quadruple filtrage en polarisation et permet donc d'augmenter le taux d'extinction en polarisation. Ce quadruple passage dans un guide d'onde polarisant peut permettre d'éviter de placer un polariseur supplémentaire en série avec le polariseur à guide d'onde 10 et ainsi d'économiser le coût d'un polariseur supplémentaire.

En option, l'utilisation d'électrodes 9 sur le guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 permet de moduler le faisceau source par exemple pour brouiller la cohérence de la source.

Sur la figure 3, on a représenté un système interférométrique à fibre optique en boucle et à circuit intégré hybride selon un deuxième mode de réalisation.

Les mêmes signes de référence désignent des éléments analogues à ceux de la figure 2.

Le circuit intégré hybride est aussi constitué d'un premier substrat 1, par exemple en niobate de lithium et d'un deuxième substrat 2, par exemple en verre optique (par exemple de type borosilicate). A la différence du premier mode de réalisation, la jonction Y est formée sur le deuxième substrat et non pas sur le premier substrat 1. Le premier substrat 1 comporte un premier guide d'onde optique 11, un deuxième guide d'onde optique 12 et un guide d'onde optique d'entrée-sortie 10. Les guides d'onde optiques 10, 11, 12 sont de préférence rectilignes et parallèles entre eux.

Le deuxième substrat 2 comporte un guide d'onde optique 21 en forme de U. Le deuxième substrat 2 comporte en outre une jonction 26 de type jonction Y à guide d'onde planaire ayant une branche commune 260, une branche secondaire 261 et une autre branche secondaire 262. Une extrémité du guide d'onde optique 21 en forme de U est alignée suivant les axes X et Z avec une extrémité du guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. L'autre extrémité du guide d'onde optique 21 en forme de U est reliée à une extrémité de la branche commune 260 de la jonction Y sur le deuxième substrat 2. Une extrémité de la branche secondaire 261 de la jonction Y sur un côté du deuxième substrat 2 est reliée directement à une extrémité du premier guide d'onde optique 11 sur un côté adjacent du premier substrat 1. De manière analogue, une extrémité de la branche secondaire 262 de la jonction Y sur le même côté du deuxième substrat 2 est reliée à une extrémité du deuxième guide d'onde optique 12 sur le côté adjacent du premier substrat 1. Autrement dit, les extrémités des branches secondaires 261 et respectivement 262 de la jonction Y sur le deuxième substrat sont alignées suivant les axes X et Z avec une extrémité du premier et respectivement deuxième guide d'onde optique 11, 12 à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. De façon avantageuse, dans le deuxième substrat 2, chaque branche de la jonction Y peut présenter un rayon de courbure inférieur ou égal à 1 mm.

De façon particulièrement avantageuse, les côtés adjacents du premier substrat 1 et du deuxième substrat 2 sont inclinés respectivement d'un angle défini par les lois de Snell-Descartes en fonction de l'indice effectif des guides du premier substrat 1 et respectivement du deuxième substrat 2. Les angles d'inclinaison des côtés du premier substrat 1 et du deuxième substrat 2 sont compris entre 0 et 25 degrés, par exemple d'environ 8 degrés par rapport au plan XZ autour de l'axe X ou Z, de manière à limiter les réflexions internes multiples aux interfaces. Plus précisément, les angles d'inclinaison du premier substrat 1 et du deuxième substrat 2 sont adaptés en fonction des lois de Snell-Descartes. De façon avantageuse, les deux côtés opposés dans la largeur du deuxième substrat 2 sont inclinés par rapport au plan XZ autour de l'axe X ou Z manière à éviter les réflexions internes multiples parasites dans le deuxième substrat 2. L'assemblage du premier substrat 1 et du deuxième substrat 2 est de préférence automatisé afin de réduire les coûts de fabrication.

La combinaison de la jonction Y 26 et du guide d'onde en forme de U 21 avec des rayons de courbure importants, de l'ordre de 1 mm, permet d'atténuer fortement le mode antisymétrique qui se propage ensuite dans le deuxième substrat 2. L'angle d'inclinaison à la jonction entre le deuxième substrat 2 et l'air permet d'atténuer encore les couplages parasites du mode antisymétrique dans le guide d'onde d'entrée-sortie 10 du premier substrat 1.

Le circuit intégré hybride selon le deuxième mode de réalisation filtre le mode antisymétrique de manière encore plus efficace que le premier mode de réalisation.

Dans un exemple de ce deuxième mode de réalisation, le premier substrat 1 de niobate de lithium présente une longueur L1 de 8 mm, une largeur W1 de 3 mm et une épaisseur de 1 mm, le deuxième substrat 2 présente une longueur L2 de 4 mm, une largeur W2 de 3 mm et une épaisseur de 1 mm. Par conséquent, le circuit optique intégré hybride a une longueur totale de $8+4 = 12$ mm, une largeur de 3 mm et une épaisseur d'environ 1 mm. Par comparaison avec le circuit optique intégré hybride du premier mode de réalisation, ce deuxième mode de réalisation permet de réduire encore la longueur totale, le poids et le coût du circuit optique intégré hybride. L'interféromètre à fibre optique selon le deuxième mode de réalisation est encore plus compact que celui du premier mode de réalisation.

Selon une variante du deuxième mode de réalisation, le circuit optique intégré sur verre est configuré de manière à introduire une différence de longueur de chemin optique entre les deux branches secondaires 261, 262 de la jonction Y 26. De préférence, cette différence de longueur est supérieure à la longueur de
5 décohérence de la source de lumière utilisée. Par exemple, pour une source erbium ayant une largeur spectrale à mi-hauteur de 6,5 nm, cette différence de longueur est configurée pour être supérieure à 0,6 mm. Cette différence de longueur permet d'éviter de générer un phénomène d'interférences de type Michelson entre les deux extrémités de la jonction Y dans le substrat de verre
10 pour un gyroscope dans lequel les deux voies ne sont pas décorréliées.

Le système interférométrique à fibre optique selon l'un quelconque des modes de réalisation peut être généralisé pour un système interférométrique à deux, trois ou N bobines de fibre optique, où N est un nombre entier naturel supérieur ou égal à 2.

15 A titre d'exemple, la figure 4 représente schématiquement un système interférométrique à trois bobines de fibre optique et à circuit intégré hybride selon une variante du deuxième mode de réalisation.

Les mêmes signes de référence désignent des éléments analogues à ceux de la figure 2 ou 3.

20 Le système interférométrique comporte une première bobine de fibre optique 6, une deuxième bobine de fibre optique 7, une troisième bobine de fibre optique 8 et un circuit intégré hybride 200. Le circuit intégré hybride 200 est aussi constitué d'un premier substrat 1, par exemple en niobate de lithium et d'un deuxième substrat 2, par exemple en verre optique (borosilicate).

25 Le premier substrat 1 comporte un premier guide d'onde optique 11 et un deuxième guide d'onde optique 12 ayant chacun une extrémité reliée à l'une des extrémités de la première bobine de fibre optique 6. Des électrodes 91, respectivement 92, sont disposées le long du premier guide d'onde optique 11 et respectivement du deuxième guide d'onde optique 12. Le deuxième substrat 2
30 comporte une première jonction Y 26 et un premier guide d'onde optique 21 en forme de U analogues à ceux décrits en lien avec la figure 3. L'extrémité de la première, respectivement deuxième, branche secondaire de la jonction Y 26 est reliée à une autre extrémité du premier guide d'onde optique 11, respectivement du deuxième guide d'onde optique 12 à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et

le deuxième substrat 2. Une extrémité du premier guide d'onde optique 21 en forme de U est reliée à la branche commune de la jonction Y 26. Le premier substrat 1 comporte aussi un premier guide d'onde d'entrée sortie 10. En option, des électrodes 9 sont disposées le long du premier guide d'onde d'entrée-sortie 10. L'autre extrémité du premier guide d'onde optique 21 en forme de U est reliée à une extrémité du premier guide d'onde d'entrée-sortie 10, à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. L'autre extrémité 101 du premier guide d'onde d'entrée-sortie 10 est reliée à une source et un détecteur, de manière analogue à la figure 3.

Le premier substrat 1 comporte en outre un troisième guide d'onde optique 13 et respectivement un quatrième guide d'onde optique 14 ayant chacun une extrémité reliée à l'une des extrémités 71, respectivement 72, de la deuxième bobine de fibre optique 7. Des électrodes 93, respectivement 94, sont disposées le long du troisième guide d'onde optique 13 et respectivement du quatrième guide d'onde optique 14. Le deuxième substrat 2 comporte une deuxième jonction Y 27 et un deuxième guide d'onde optique 22 en forme de U. L'extrémité de la première, respectivement deuxième, branche secondaire de la deuxième jonction Y 27 est reliée à une autre extrémité du troisième guide d'onde optique 13, respectivement du quatrième guide d'onde optique 14 à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. Une extrémité du deuxième guide d'onde optique 22 en forme de U est reliée à la branche commune de la deuxième jonction Y 27. Le premier substrat 1 comporte en outre un deuxième guide d'onde d'entrée sortie 17. En option, des électrodes 97 sont disposées le long du deuxième guide d'onde d'entrée sortie 17. L'autre extrémité du deuxième guide d'onde optique 22 en forme de U est reliée à une extrémité du deuxième guide d'onde d'entrée sortie 17, à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. L'autre extrémité 102 du deuxième guide d'onde d'entrée sortie 17 est reliée à au moins une source et un détecteur.

De manière analogue, le premier substrat 1 comporte en outre un cinquième guide d'onde optique 15 et un sixième guide d'onde optique 16 ayant chacun une extrémité reliée à l'une des extrémités 81, respectivement 82 de la troisième bobine de fibre optique 8. Des électrodes 95, respectivement 96, sont disposées le long du cinquième guide d'onde optique 15 et respectivement du sixième guide d'onde optique 16. Le deuxième substrat 2 comporte une troisième

jonction Y 28 et un troisième guide d'onde optique 23 en forme de U. L'extrémité de la première, respectivement deuxième, branche secondaire de la troisième jonction Y 28 est reliée à une autre extrémité du cinquième guide d'onde optique 15, respectivement du sixième guide d'onde optique 16 à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. Une extrémité du troisième guide d'onde optique 23 en forme de U est reliée à la branche commune de la troisième jonction Y 28. Le premier substrat 1 comporte en outre un troisième guide d'onde d'entrée sortie 18. En option, des électrodes 98 sont disposées le long du troisième guide d'onde d'entrée sortie 18. L'autre extrémité du troisième guide d'onde optique 23 en forme de U est reliée à une extrémité du troisième guide d'onde d'entrée sortie 18, à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. L'autre extrémité du troisième guide d'onde d'entrée sortie 18 est reliée à au moins une source et un détecteur.

De façon avantageuse, les guides d'onde optique 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 et 18 sont rectilignes et disposés parallèlement les uns aux autres dans le premier substrat.

Dans l'exemple représenté, on observe que le premier guide d'onde optique 21, le deuxième guide d'onde optique 22 et le troisième deuxième guide d'onde optique 23 en forme de U sont disposés sur le deuxième substrat de manière emboîtée sans croisement entre ces guides d'onde. Dans une variante, le premier guide d'onde optique 21, le deuxième guide d'onde optique 22 et/ou le troisième deuxième guide d'onde optique 23 peuvent se croiser, de préférence à angle droit, sans interférence entre les faisceaux guidés. Pour chaque bobine de fibre optique, la combinaison d'une jonction Y et d'un guide d'onde en forme de U permet d'obtenir un filtrage efficace des modes antisymétriques non guidés. Ce filtrage permet de combiner les trois bobines sur un même circuit intégré hybride tout en évitant des perturbations par couplage inter-voie (ou cross-talk en anglais) entre les signaux provenant des différentes bobines de fibre optique.

De façon avantageuse, le système interférométrique comporte aussi une source lumineuse non représentée, un système de détection comportant un premier détecteur relié à l'extrémité 101 du premier guide d'onde d'entrée-sortie 10, un deuxième détecteur relié à l'extrémité 102 du deuxième guide d'onde d'entrée-sortie 17 et un troisième détecteur relié à l'extrémité 103 du troisième guide d'onde d'entrée-sortie 18.

Le système interférométrique de la figure 4 peut être utilisé pour la fabrication d'une centrale de navigation inertielle, les axes des trois bobines de fibre optique étant disposés suivant les axes d'un repère en 3D. Dans une variante, les axes d'au moins deux bobines sont disposés parallèlement de manière à obtenir des mesures redondantes par rapport à cet axe. Le système

5 interférométrique de la figure 4 peut être généralisé pour la fabrication d'autres capteurs à N bobines de fibre optique, où N est un nombre entier naturel supérieur ou égal à deux.

Dans un exemple de réalisation de l'interféromètre de la figure 4, le

10 premier substrat 1 présente une longueur L1 de 8 mm, une largeur W1 de 3 mm et une épaisseur de 1 mm, le deuxième substrat 2 présente une longueur L2 de 6 mm, une largeur W2 de 3 mm et une épaisseur de 1 mm. Au total, le circuit optique intégré hybride a une longueur totale de $8+6 = 14$ mm, une largeur de 3 mm et une épaisseur d'environ 1,2 mm. L'utilisation d'un circuit optique intégré

15 hybride permet d'augmenter grandement la compacité d'un système interférométrique à plusieurs bobines de fibres optiques, tout en réduisant le poids total. Enfin, l'utilisation d'un circuit optique intégré hybride multi-bobines permet de supprimer certaines opérations de montage et autorise une fabrication automatisée, réduisant ainsi le coût de fabrication.

20 Sur la figure 5, on a représenté un système interférométrique à fibre optique en boucle et à circuit intégré hybride selon un troisième mode de réalisation.

Les mêmes signes de référence désignent des éléments analogues à ceux de la figure 3.

25 Le circuit intégré hybride 200 est ici constitué d'un premier substrat 1, par exemple en niobate de lithium, d'un deuxième substrat 2 et d'un troisième substrat 3. Le deuxième substrat 2 et le troisième substrat 3 sont par exemple en verre optique (borosilicate). En variante, le deuxième substrat 2 et/ou le troisième substrat 3 est formé dans un matériau choisi parmi du nitrure de silicium ou un

30 silicium sur isolant (SOI) ou encore de la silice sur silicium.

Le troisième substrat 3 a aussi généralement une forme géométrique. Dans le plan de la figure 2, ou plan XY, le troisième substrat 3 a généralement une forme rectangulaire. Le troisième substrat 3 est de préférence formé dans un matériau plan ayant une épaisseur comprise entre 0,5 mm et 3 mm, par exemple

d'environ 1 mm dans la direction de l'axe X. Les côtés du troisième substrat 3, pris dans l'épaisseur, sont de préférence inclinés d'un angle compris entre 0 et 25 degrés, par exemple de 8 degrés, par rapport au plan XZ autour de l'axe X ou Z pour éviter les réflexions parasites à l'interface. Les angles d'inclinaison du

5 troisième substrat 3 sont adaptés en fonction des lois de Snell-Descartes.

Le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2 sont fixés l'un à l'autre par un côté adjacent, formant une interface 20, de manière analogue au système illustré sur la figure 3. Le troisième substrat 3 est fixé au premier substrat 1 par un autre côté, opposé au premier côté, formant une autre interface 50.

10 Plus précisément, le troisième substrat 3 comporte un premier guide d'onde optique 31 et un deuxième guide d'onde optique 32, par exemple rectilignes. Une extrémité du premier guide d'onde optique 31 du troisième substrat 3 est reliée à une extrémité du premier guide d'onde optique 11 à l'interface 50 entre le premier substrat 1 et le troisième substrat 3. L'autre

15 extrémité du premier guide d'onde optique 31 du troisième substrat 3 est reliée à une première extrémité 61 de la bobine de fibre optique 6. Une extrémité du deuxième guide d'onde optique 32 du troisième substrat 3 est reliée à une extrémité du deuxième guide d'onde optique 12 à l'interface 50 entre le premier substrat 1 et le troisième substrat 3. L'autre extrémité du deuxième guide d'onde

20 optique 32 du troisième substrat 3 est reliée à la deuxième extrémité 62 de la bobine de fibre optique 6. Autrement dit, les extrémités des guides d'onde optiques 10, respectivement 11 et 12 du premier substrat 1 sont alignées, suivant les axes X et Z, avec les extrémités des guides d'onde optiques 30, respectivement 31 et 32 du troisième substrat 3.

25 De façon avantageuse, les extrémités des guides d'onde optiques 31, 32 destinées à être reliées aux extrémités de la fibre optique sont adaptées en fonction des dimensions d'un faisceau monomode d'une part dans la fibre optique 6 et, d'autre part, dans les guides d'onde optiques du premier substrat 1. Par exemple, les guides d'onde optiques 31, 32 ont une forme conique ayant, à une

30 extrémité, un diamètre adapté au cœur de la fibre (de l'ordre de 5 à 10 microns de diamètre par exemple) et à l'autre extrémité, un diamètre adapté au guide d'onde formé par échange protonique sur le premier substrat (de l'ordre de 3 à 8 microns de diamètre par exemple).

Le troisième substrat 3 comporte un coupleur à jonction Y 41 à guide

d'onde optique planaire. Le coupleur à jonction Y 41 forme un séparateur source-détecteur. Le coupleur à jonction Y 41 comporte une branche commune 30, une branche secondaire 314 et une autre branche secondaire 315. La branche commune 30 est reliée à l'extrémité du guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 à l'interface 50 entre le premier substrat 1 et le troisième substrat 3. Une source 4 est fixée sur un côté du troisième substrat. De façon alternative, la source 4 est collée dessus ou dessous le troisième substrat 3 et combinée avec un miroir de renvoi à 45 degrés. La source 4 est choisie parmi une diode électroluminescente (LED), une diode superluminescente (SLED), un laser à rétroaction répartie (ou DFB pour Distributed FeedBack laser) ou une source à émission spontanée amplifiée (ASE) à fibre dopée terre rare (erbium en particulier). La source 4 peut être fixée directement sur le substrat 3 ou reliée par fibre optique à l'extrémité de la branche secondaire 314. La source 4 génère le faisceau source 100. Un détecteur 5 est fixé, par exemple, sur un autre côté du troisième substrat. Dans une variante, le détecteur 5 est fixé sur le même côté que la source 4 et la bobine de fibre optique 6. Dans une variante, le détecteur 5 est fixé dessus ou dessous le troisième substrat 3 et combiné avec un miroir de renvoi à 45 degrés. Le séparateur source-récepteur 41 guide le faisceau interférométrique 300 vers le photodétecteur 5. Le détecteur 5 est de préférence une photodiode.

Dans un exemple de réalisation de circuit intégré hybride illustré en figure 5, le premier substrat 1 présente une longueur L_1 de 8 mm, une largeur W_1 de 3 mm et une épaisseur de 1 mm, le deuxième substrat 2 présente une longueur L_2 de 4 mm, une largeur W_2 de 3 mm et une épaisseur de 1 mm et le troisième substrat 3 présente une longueur L_3 de 4 mm, une largeur W_3 de 3 mm et une épaisseur de 1 mm. Au total, le circuit optique intégré hybride a une longueur totale de $8+4+4 = 16$ mm, une largeur de 3 mm et une épaisseur d'environ 1 mm. L'intégration de la source et du détecteur sur le circuit optique intégré hybride permet d'augmenter encore la compacité du système interférométrique. Le circuit intégré hybride constitué de 3 substrats fixés les uns aux autres peut être assemblé automatiquement de façon active ou passive, réduisant ainsi le coût de fabrication.

Le système interférométrique à fibre optique selon le troisième mode de réalisation peut être généralisé pour un système interférométrique deux, trois ou N bobines de fibre optique, où N est un nombre entier naturel supérieur ou égal à 2.

A titre d'exemple, la figure 6 représente schématiquement un système interférométrique à trois bobines de fibre optique et à circuit intégré hybride selon une variante du troisième mode de réalisation.

Les mêmes signes de référence désignent des éléments analogues à ceux de la figure 4 ou 5, notamment en ce qui concerne les éléments optiques intégrés sur le premier substrat 1 et sur le deuxième substrat 2. Le deuxième substrat 2 comporte ainsi trois jonctions Y 26, 27 et 28 reliées chacune à un guide d'onde optique en forme de U 21, respectivement 22 et 23.

Sur la figure 6, le troisième substrat 3 comporte trois paires de guides d'onde optiques 31-32, respectivement 33-34 et 35-36 reliés aux extrémités de la première bobine de fibre optique 6, respectivement deuxième bobine de fibre optique 7 et troisième bobine de fibre optique 8. Une source 4 est fixée ou intégrée sur le troisième substrat 3. Dans l'exemple de la figure 6, la source 4 est fixée sur le côté du troisième substrat où sont reliées les bobines de fibre optique.

Un premier détecteur 51, respectivement deuxième détecteur 52 et troisième détecteur 53, est fixé au troisième substrat 3. Le troisième substrat 3 comporte aussi un premier coupleur séparateur source-détecteur 41 à guide d'onde optique ayant une branche secondaire reliée à la source 4, une autre branche secondaire reliée au premier détecteur 51 et une branche commune reliée à l'extrémité du premier guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 à l'interface 50 entre le premier substrat 1 et le troisième substrat 3. De manière analogue, le troisième substrat 3 comporte aussi un deuxième coupleur séparateur source-détecteur 42 à guide d'onde ayant une branche secondaire reliée à la source 4, une autre branche secondaire reliée au deuxième détecteur 52 et une branche commune reliée à l'extrémité du deuxième guide d'onde optique d'entrée-sortie 17 à l'interface 50 entre le premier substrat 1 et le troisième substrat 3. Enfin, le troisième substrat 3 comporte aussi un troisième coupleur séparateur source-détecteur 43 à guide d'onde ayant une branche secondaire reliée à la source 4, une autre branche secondaire reliée au troisième détecteur 53 et une branche commune reliée à l'extrémité du troisième guide d'onde optique d'entrée-sortie 18 à l'interface 50 entre le premier substrat 1 et le troisième substrat 3. Le premier, respectivement deuxième et troisième coupleur séparateur source-détecteur 41, respectivement 42 et 43 sont de préférence des coupleurs 1 par 2 (noté 1*2) équi-répartis en puissance, aussi appelés coupleurs 50%-50%.

De façon avantageuse, le troisième substrat 3 comporte en outre deux coupleurs à jonction Y 46, 47 disposés en série pour combiner en une seule branche reliée à la source 4 les branches secondaires du premier, deuxième et troisième coupleur séparateur source-détecteur 41, 42 et 43. Le coupleur à jonction Y 46 est de préférence un coupleur 1*2 équi-réparti en puissance, ou coupleur 50%-50%. Le coupleur à jonction Y 47 est de préférence un coupleur 1 par 2 de type coupleur 33%-66%, de manière à ce que la puissance maximum du signal provenant de chaque bobine soit de même niveau.

Comme illustré sur la figure 6, deux guides d'onde optiques se croisent perpendiculairement au point 44 sur le troisième circuit optique intégré. Cependant, dans des guides d'onde optique monomodes, un croisement à 90 degrés n'induit aucune communication optique ou perturbation entre les deux guides d'onde transverses.

Dans un exemple de réalisation de circuit intégré hybride illustré en figure 6, le premier substrat 1 en niobate de lithium présente une longueur L1 de 8 mm, une largeur W1 de 3 mm et une épaisseur de 1 mm, le deuxième substrat 2 en verre (SiO₂) présente une longueur L2 de 6 mm, une largeur W2 de 3 mm et une épaisseur de 1,2 mm et le troisième substrat 3 présente une longueur L3 de 6 mm, une largeur W3 de 3 mm et une épaisseur de 1,2 mm. Au total, le circuit optique intégré hybride a une longueur totale de 8+6+6 = 20 mm, une largeur de 3 mm et une épaisseur d'environ 1,2 mm. L'intégration de la source 4 et des trois détecteurs 51, 52, 53 sur le circuit optique intégré hybride permet d'augmenter encore la compacité et de réduire le poids du système interférométrique. Le circuit intégré hybride constitué de 3 substrats fixés les uns aux autres peut être assemblé automatiquement de façon active ou passive, réduisant ainsi le coût de fabrication.

La figure 7 représente schématiquement un système interférométrique de Sagnac à fibre optique en ligne selon un autre mode de réalisation de la présente divulgation. Le système interférométrique à fibre optique en ligne de la figure 7 trouve des applications comme capteur de courant électrique.

Les mêmes signes de référence désignent des éléments analogues à ceux des figures 1B et 3. Le système comporte une source 4, un détecteur 5, un séparateur source-détecteur 45 et un circuit optique intégré hybride 200. Un circuit optique intégré hybride 200 analogue à celui de la figure 3 remplace le circuit

optique intégré 39 de la figure 1B. Dans l'exemple représenté, le circuit optique intégré hybride 200 comporte un premier substrat 1 en niobate de lithium et un deuxième substrat 2 en verre optique (par ex. borosilicate). Le premier substrat 1 comporte ici aussi un guide d'onde optique d'entrée-sortie 10, un premier guide d'onde 11 muni d'électrodes 91 et un deuxième guide d'onde 12 muni d'électrodes 92. Le deuxième substrat 2 comporte un guide d'onde en forme de U 21 relié à la branche commune d'une jonction Y 26 à guide d'onde.

Le séparateur source-détecteur 45 est relié par une fibre optique 49 au circuit optique intégré hybride 200. Plus précisément, la fibre optique 49 est reliée à une extrémité du guide d'onde d'entrée-sortie 10 sur le premier substrat 1. La fibre optique 49 est une fibre non polarisante. En variante, la fibre optique 49 est polarisante et alignée avec le polariseur constitué par le substrat 1 en niobate de lithium.

Le circuit intégré hybride 200 reçoit un faisceau source 100 sur le guide d'onde d'entrée-sortie 10 monomode. Le guide d'onde d'entrée-sortie 10 polarise linéairement le faisceau source. Le guide d'onde 21 en forme de U est un filtre monomode spatial qui filtre de manière supplémentaire le faisceau source afin de le rendre encore plus monomode spatial. Le deuxième substrat 2 comporte une jonction Y 26 à guide d'onde. La jonction Y 26 reçoit le faisceau source guidé à une extrémité du guide d'onde 21 en forme de U et le sépare en un premier faisceau secondaire polarisé linéairement 121 se propageant suivant une branche secondaire 261 de la jonction Y 26 et un deuxième faisceau secondaire polarisé linéairement 122 se propageant suivant une autre branche secondaire 262 de la jonction Y 26. L'extrémité de la branche secondaire 261, respectivement de l'autre branche secondaire 262, est reliée à une extrémité du premier guide d'onde 11, respectivement du deuxième guide d'onde 12, à l'interface 20 entre le premier substrat 1 et le deuxième substrat 2. Le premier faisceau secondaire polarisé linéairement 121 se propage dans le premier guide d'onde 11. Et le deuxième faisceau secondaire polarisé linéairement 122 se propage dans le deuxième guide d'onde 12. Des électrodes 91 et 92 respectivement, sont disposées le long du premier guide d'onde 11 et du deuxième guide d'onde 12 respectivement.

Sur le côté du premier substrat 1 opposé à l'interface 20 avec le deuxième substrat 2, l'extrémité du premier guide d'onde optique 11 est reliée à une section de fibre optique 111. La section de fibre optique 111 est à maintien de

polarisation. Dans l'exemple illustré sur la figure 7, on utilise deux sections de fibre optique 111 à maintien de polarisation soudées bout à bout avec une soudure à 90 degrés entre les axes de polarisation des deux sections de fibre optique, de manière à faire tourner l'axe de polarisation de 90 degrés. En variante, les sections de fibre optique 111 et 112 sont disposées de manière différente sur le substrat 1 lors du collage, l'une étant alignée sur l'axe rapide et l'autre sur l'axe lent des axes de la fibre PM. De façon alternative, le premier faisceau lumineux polarisé linéairement 121 se propage dans la section de fibre optique 111 qui est placée en torsion pour faire tourner son axe de polarisation de 90 degrés et qui donc le transforme en un autre faisceau lumineux polarisé linéairement 123, mais à 90 degrés du faisceau 121.

Sur le côté du premier substrat 1 opposé à l'interface 20 avec le deuxième substrat 2, l'extrémité du deuxième guide d'onde optique 12 est reliée à une autre section de fibre optique 112 à maintien de polarisation. De préférence, les extrémités des sections de fibre optique 111 et 112 sont disposées dans un support en V 80 (ou V-groove en anglais). Le deuxième faisceau polarisé linéairement 122 se propage dans l'autre section de fibre optique 112 en conservant sa direction de polarisation. Donc, le deuxième faisceau polarisé linéairement 122 est orienté à 90 degrés de l'autre faisceau 123 polarisé linéairement.

Le séparateur-combinateur de polarisation 70 combine le deuxième faisceau polarisé linéairement 122 et l'autre faisceau lumineux polarisé linéairement 123 et les injecte dans la section de fibre à maintien de polarisation linéaire 67.

Les faisceaux polarisés respectivement circulaire droit 133 et circulaire gauche 132 se propagent dans le sens aller de la bobine de fibre optique 66 puis sont réfléchis sur le miroir 77, où les polarisations des faisceaux sont inversées. Puis, les faisceaux polarisés respectivement circulaire droit 142 et circulaire gauche 143 se propagent dans le sens inverse de la bobine de fibre optique 66 et sont transformés par la lame quart d'onde 68 en deux faisceaux polarisés linéairement de polarisations transverses. Le séparateur-combinateur de polarisation 70 sépare les deux états de polarisation linéaires transverses et dirige l'un vers le premier guide d'onde optique 11 et l'autre vers le deuxième guide d'onde optique 12. La jonction Y 26 recombine les deux faisceaux ayant chacun

parcouru la bobine avec les deux polarisations circulaires croisées et forme un faisceau interférentiel 300, qui se propage dans le guide d'onde 21 en forme de U, le guide d'onde d'entrée-sortie 10, puis la fibre optique 49 vers le détecteur 5.

Dans cet interféromètre de Sagnac en ligne, la combinaison du premier
5 substrat en niobate de lithium et du deuxième substrat en verre, le premier substrat 1 comprenant un guide d'onde d'entrée-sortie 10 monomode polarisant, et des guides d'onde 11, 12 munis d'électrodes, le deuxième substrat comprenant un guide d'onde 21 monomode en forme de U et en outre ici une jonction Y formant un séparateur pour le faisceau guidé dans le guide d'onde 21 en forme de
10 U. L'intégration des composants indiqués ci-dessus dans un circuit intégré hybride permet de réduire l'encombrement du système interférométrique de Sagnac en ligne, tout en permettant un filtrage monomode et en polarisation du faisceau source et du faisceau interférentiel et une modulation de biréfringence des faisceaux parcourant la bobine de fibre optique. Toutes les extrémités de fibre
15 optique sont disposées sur un même côté du circuit intégré hybride 200. De façon avantageuse, ces extrémités de fibre optique sont disposées dans un support 80 en V (ou V-groove) fixé sur un côté du circuit intégré hybride. Le support 80 en V est peu encombrant et améliore le positionnement des fibres optiques par rapport aux guides d'onde optiques du circuit intégré hybride 200.

20 Procédé

La présente divulgation propose aussi un procédé de mesure interférométrique, pour interféromètre à fibre optique en boucle ou en ligne, comprenant les étapes suivantes :

- émission d'un faisceau source 100 ;
- 25 - utilisation d'un circuit intégré hybride tel que décrit selon l'un des modes de réalisation ci-dessus pour injecter le faisceau source 100 dans au moins un guide d'onde optique d'entrée-sortie 10 polarisant du premier substrat 1 ;
- guidage et filtrage monomode du faisceau source dans le guide d'onde optique 21 en forme de U du deuxième substrat 2 ;
- 30 - transmission du faisceau source du guide d'onde optique 21 en forme de U à la branche commune d'une jonction Y 26 à guide d'onde planaire ;
- séparation du faisceau source en un premier et un deuxième faisceau secondaire guidés dans les branches secondaires de la jonction Y 26 ;
- transmission du premier, respectivement deuxième, faisceau

secondaire de la première, respectivement deuxième, branche secondaire de la jonction Y vers un premier, respectivement deuxième, guide d'onde optique du premier substrat 1 ;

- 5 - transmission du premier, respectivement deuxième, faisceau secondaire de la première, respectivement deuxième, branche secondaire de la jonction Y vers au moins une extrémité de la bobine de fibre optique ;
 - réception des deux faisceaux secondaires après propagation dans la bobine de fibre optique sur le premier, respectivement deuxième, guide d'onde optique du premier substrat 1 ;
- 10 - formation d'un faisceau interférentiel dans la jonction Y 26 ;
 - guidage et filtrage monomode du faisceau interférentiel dans le guide d'onde optique 21 en forme de U du deuxième substrat 2 ;
 - détection du faisceau interférentiel.

- Le procédé permet de combiner plusieurs fonctions : filtrage monomode
- 15 et en polarisation, séparation et recombinaison du faisceau lumineux, modulation de phase au moyen d'un seul circuit intégré hybride plan, de faible encombrement, faible poids et de coût de fabrication réduit.

REVENDEICATIONS

1. Interféromètre de Sagnac à fibre optique en boucle ou en ligne comprenant une source lumineuse (4), un système de détection (5, 51, 52, 53) et
5 au moins une bobine de fibre optique (6),
caractérisé en ce qu'il comporte :
- un circuit optique intégré hybride (200) comprenant au moins un premier substrat (1) plan en matériau électro-optique et un deuxième substrat (2) plan en matériau transparent, le premier substrat (1) et le deuxième substrat (2)
10 ayant une interface (20) commune entre deux côtés adjacents,
 - le premier substrat (1) comprenant un guide d'onde optique d'entrée-sortie (10) relié à la source lumineuse (4) et au système de détection (5), une paire d'autres guides d'onde optiques comprenant un premier guide d'onde optique (11) et un deuxième guide d'onde optique (12), le premier guide d'onde
15 optique (11) et le deuxième guide d'onde optique (12) étant reliés à au moins une extrémité (61, 62, 611) de la bobine de fibre optique (6), un système de modulation électro-optique comprenant au moins une électrode (91, 92) disposée le long du premier guide d'onde optique (11) et/ou du deuxième guide d'onde optique (12);
 - 20 - le deuxième substrat (2) comprenant au moins un guide d'onde optique (21) en forme de U ;
 - le circuit optique intégré hybride (200) comprenant une jonction Y (26, 166) à guide d'onde planaire ayant une branche commune (160, 260), deux branches secondaires (161, 261, 162, 262),
 - 25 - le premier substrat (1) et le deuxième substrat (2) étant disposés de manière à ce qu'une extrémité du guide d'onde optique (21) en forme de U soit alignée avec une extrémité du guide d'onde optique d'entrée-sortie (10) et que l'autre extrémité du guide d'onde optique (21) en forme de U soit alignée avec la branche commune (160, 260) de la jonction Y (26, 166), chacune des deux
30 branches secondaires (161, 261, 162, 262) de la jonction Y (26, 166) étant alignée respectivement avec une extrémité d'un guide d'onde optique (11, 12) de la paire d'autres guides d'onde optiques.
2. Interféromètre de Sagnac à fibre optique selon la revendication 1 dans lequel la jonction Y (166) est formée sur le premier substrat (1).

3. Interféromètre de Sagnac à fibre optique selon la revendication 1 dans lequel la jonction Y (26) est formée sur le deuxième substrat (2).

4. Interféromètre de Sagnac à fibre optique selon l'une des revendications 1 à 3 dans lequel le guide d'onde optique (21) en forme de U présente une différence d'indice de réfraction avec le deuxième substrat d'au moins 0,05.

5. Interféromètre de Sagnac à fibre optique selon l'une des revendications 1 à 4 dans lequel le guide d'onde optique (21) en forme de U présente un rayon de courbure inférieur ou égal à 1 mm.

10 6. Interféromètre de Sagnac à fibre optique en boucle selon l'une des revendications 1 à 5 dans lequel le premier guide d'onde optique (11) est relié à une première extrémité (61) de la bobine de fibre optique (6) et le deuxième guide d'onde optique (12) est relié à une deuxième extrémité (62) de la bobine de fibre optique (6).

15 7. Interféromètre de Sagnac à fibre optique en boucle selon l'une des revendications 1 à 6 comportant N bobines de fibre optique (7, 8), où N est un nombre entier naturel supérieur ou égal à deux, le premier substrat (1) comprenant N guides d'onde optique d'entrée-sortie (10, 17, 18), N paires d'autres guides d'onde optiques (11, 12, 13, 14, 15, 16), chaque guide d'onde desdites N paires d'autres guides d'onde optiques (11, 12, 13, 14, 15, 16) étant relié à une extrémité (61, 62, 71, 72, 81, 82) distincte d'une des N bobines de fibre optique (7), le système de modulation électro-optique comprenant au moins N électrodes (91, 92, 93, 94, 95, 96), chacune des au moins N électrodes étant disposée le long d'un guide d'onde desdites N paires d'autres guides d'onde optiques (11, 12, 13, 14, 15, 16) ;

20 - le deuxième substrat comprenant N guides d'onde optiques (21, 22, 23) en forme de U ;

- le circuit optique intégré hybride (200) comprenant N jonctions Y (26, 166, 27, 28) à guide d'onde planaire, chaque jonction Y desdites N jonctions Y ayant une branche commune et deux branches secondaires,

30 - le premier substrat (1) et le deuxième substrat (2) étant disposés de manière à ce qu'une extrémité de chaque guide d'onde optique (21, 22, 23) en forme de U soit alignée avec une extrémité d'un des N guides d'onde optique d'entrée-sortie (10, 17, 18), l'autre extrémité de chaque guide d'onde optique (21,

22, 23) en forme de U soit alignée avec la branche commune d'une des N jonctions Y (26, 166, 27, 28), chacune des deux branches secondaires des N jonctions Y (26, 166, 27, 28) étant alignée avec une extrémité d'un guide d'onde desdites N paires d'autres guides d'onde optique (13, 14, 15, 16, 17, 18).

5 8. Interféromètre de Sagnac à fibre optique selon l'une des revendications 1 à 7 dans lequel le circuit optique intégré hybride (200) comporte en outre un troisième substrat (3) plan en matériau transparent, le troisième substrat (3) et le premier substrat (1) ayant une autre interface (50) commune entre deux côtés adjacents, le troisième substrat (3) comprenant une pluralité de
10 guides d'onde optiques, chaque extrémité de guide d'onde optique du premier substrat sur l'autre interface (50) étant relié à une extrémité de guide d'onde optique du troisième substrat.

 9. Interféromètre de Sagnac à fibre optique selon la revendication 8, dans lequel le troisième substrat intègre la source lumineuse (4), et au moins un
15 détecteur (51).

 10. Interféromètre de Sagnac à fibre optique selon les revendications 8 et 9 dans lequel :

- le système de détection comporte N détecteurs (51, 52, 53).

 11. Interféromètre de Sagnac à fibre optique selon l'une des
20 revendications 8 à 10 comportant N sources lumineuses (4).

 12. Interféromètre de Sagnac à fibre optique selon l'une des revendications 1 à 11 dans lequel le premier substrat (1) est formé dans un matériau choisi parmi le niobate de lithium, le phosphore d'indium, l'arséniure de gallium et l'arséniure d'aluminium et de gallium.

25 13. Interféromètre de Sagnac à fibre optique selon l'une des revendications 1 à 12 dans lequel le deuxième substrat (2) est formé dans un matériau choisi parmi un verre optique, un nitrure de silicium, un silicium sur isolant et de la silice sur silicium.

1/3

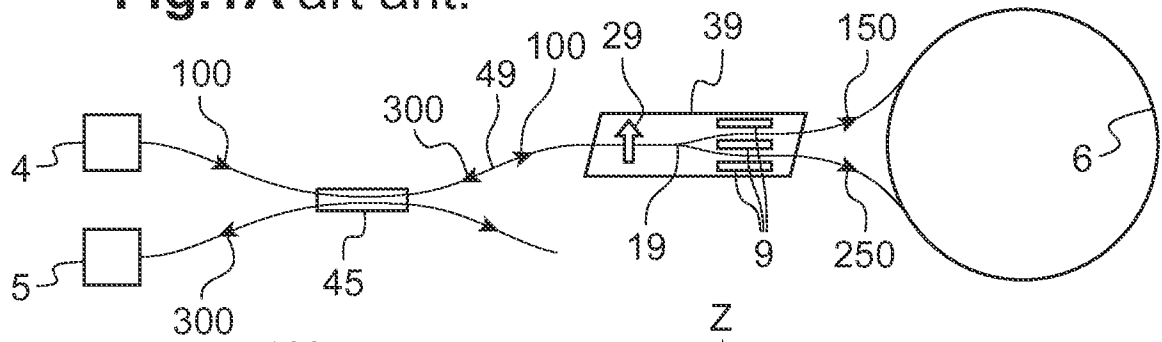
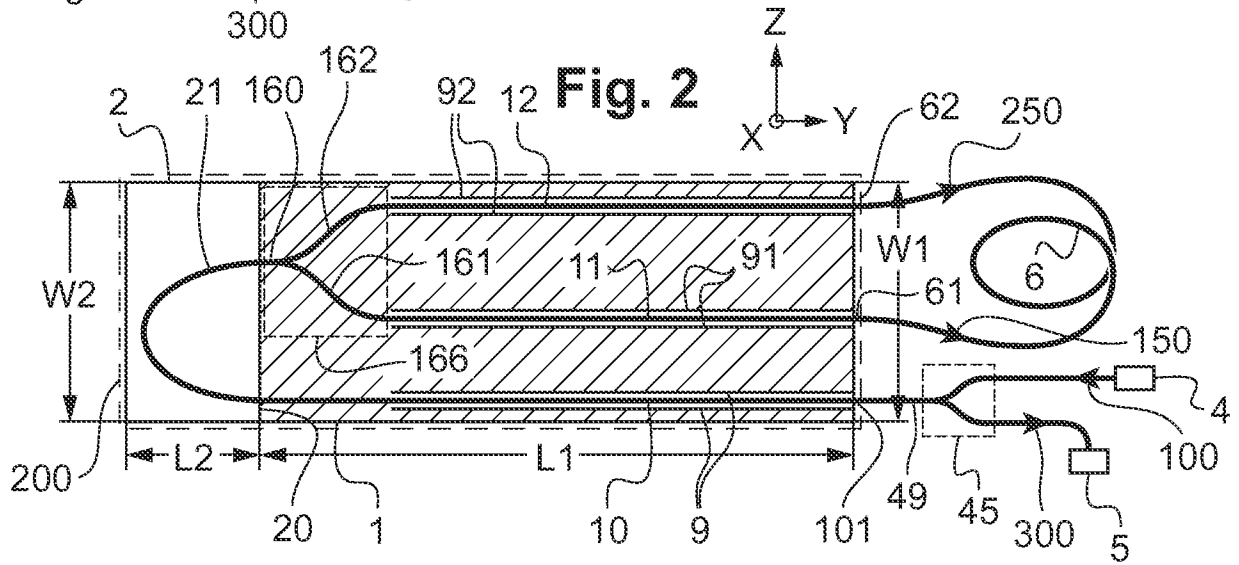
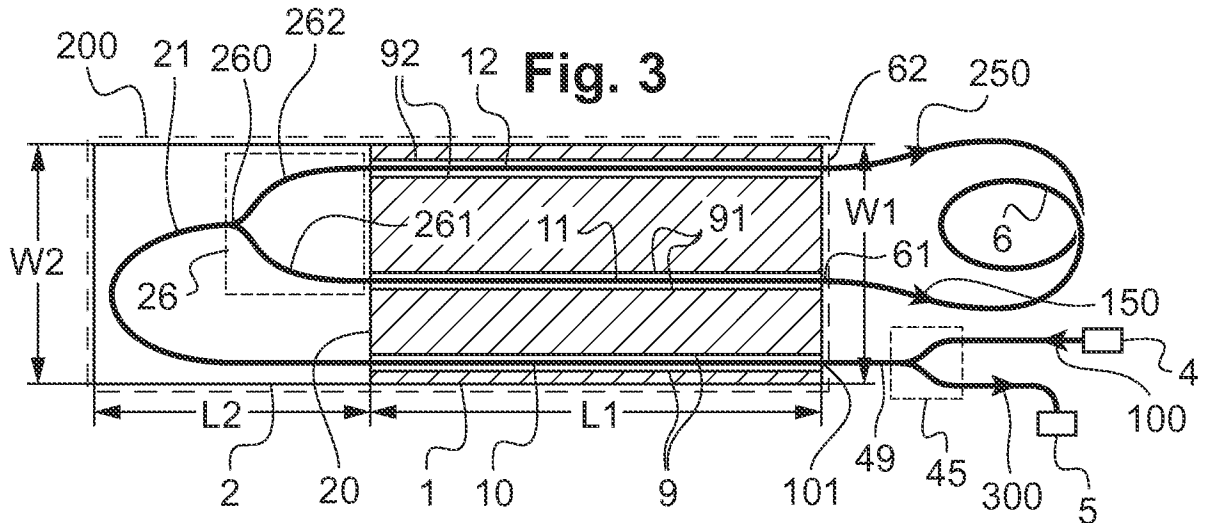
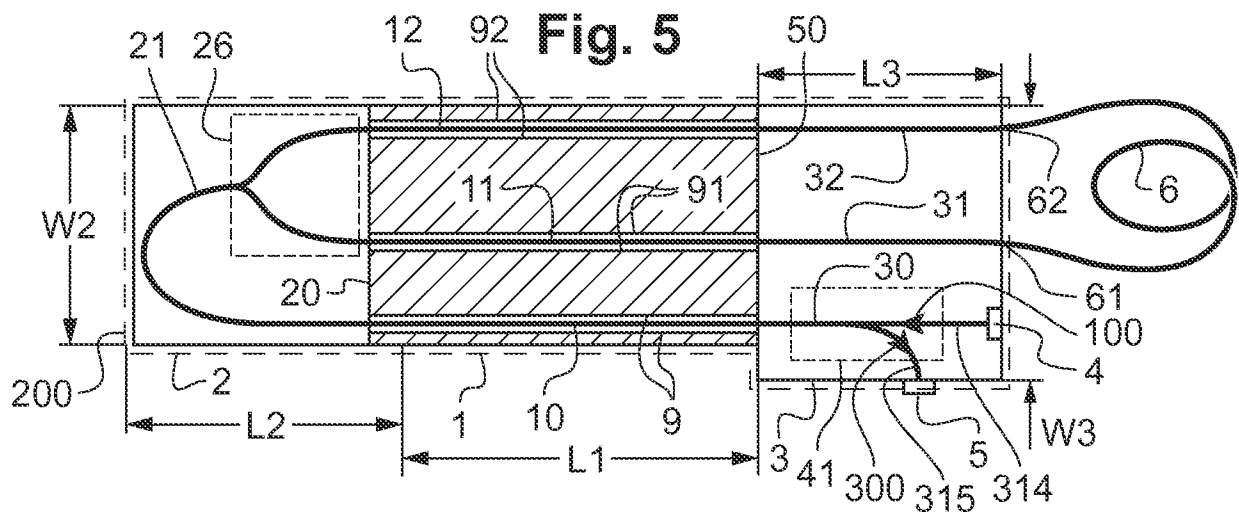
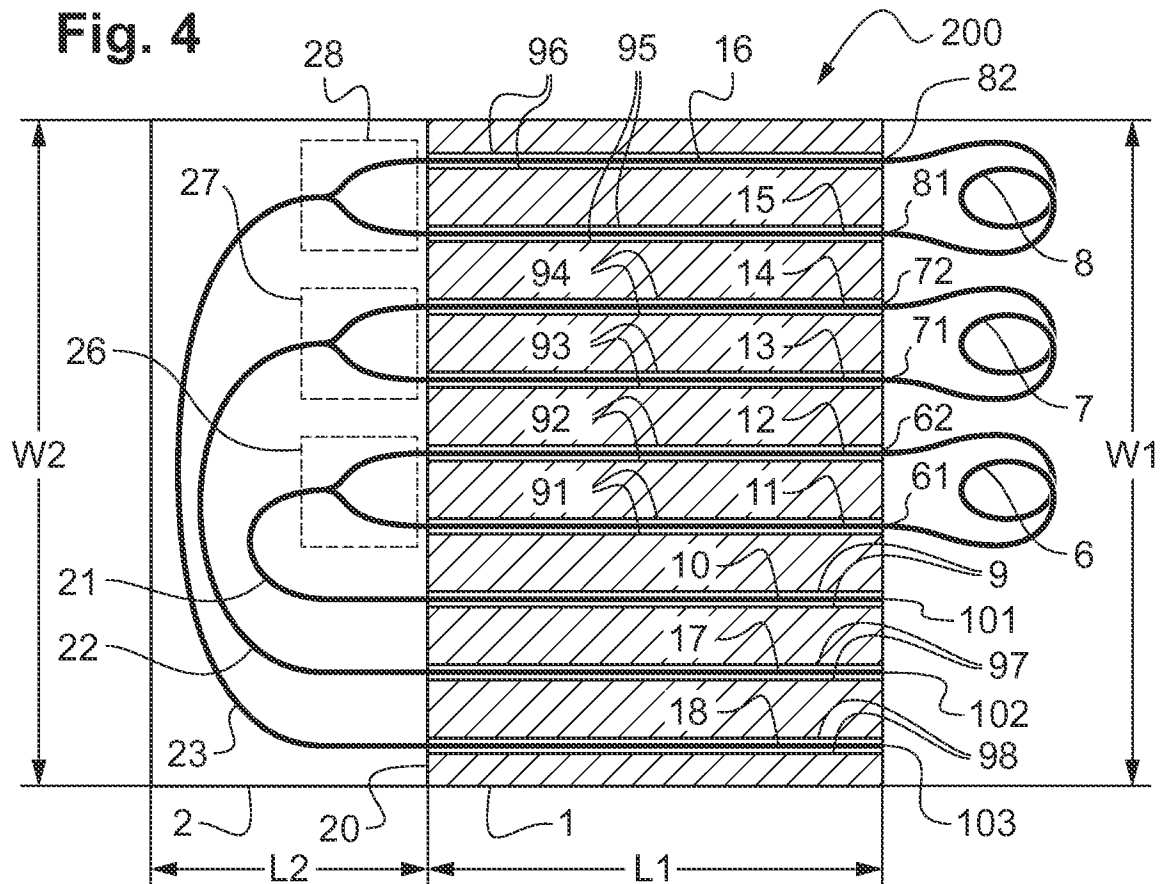
Fig.1A art ant.**Fig. 2****Fig. 3****Fig. 5**

Fig. 4**Fig. 6**