

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 02.05.19.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 06.11.20 Bulletin 20/45.

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) : THALES Société anonyme — FR,
UNIVERSITE DE LIMOGES OBNL — FR, CENTRE
NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
OBNL — FR et GLOphotonics Société par Actions sim-
plifiée — FR.

72 Inventeur(s) : BENABID Abdelfatah, DEBORD
Benoit, BEAUDOU Benoit, FEUGNET Gilles et MOR-
BIEU Bertrand.

73 Titulaire(s) : THALES Société anonyme, UNIVER-
SITE DE LIMOGES OBNL, CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE OBNL, GLOphotonics
Société par Actions simplifiée.

74 Mandataire(s) : Marks&Clerk France.

54 Dispositif de couplage pour fibres optiques à coeur creux à couplage inhibé.

57 Dispositif de couplage (1, 10, 50, 100, 500, 1000) pour
fibre optique comprenant deux fibres (2, 3) à coeurs creux à
couplage inhibé présentant des parois de coeur à courbure
négative, un profil de fuite donné et possédant chacune une
gaine microstructurée (4) avec une structure donnée et
comprenant un coupleur (7), ledit dispositif étant caractérisé
en ce que :

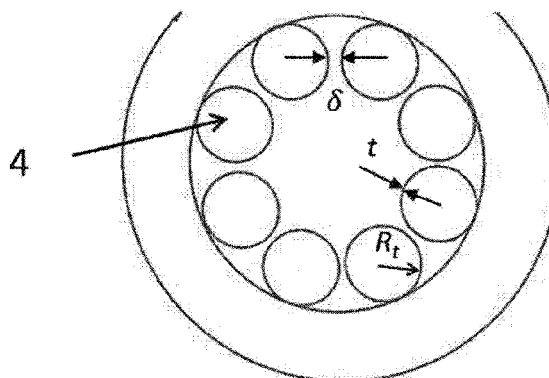
- la structure de chacune des gaines microstructurées
(4) des deux fibres (2, 3) à coeurs creux à couplage inhibé
est composée d'un unique motif tubulaire, réparti en un seul
anneau, un premier motif tubulaire de rayon maximal trans-
verse R_{m1} associé à une première fibre à coeur creux et un
deuxième motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m2}
associé à une deuxième fibre à coeur creux;

- les gaines microstructurées (4) des deux fibres dans le
coupleur sont espacées d'une distance (40), appelée dis-
tance de rapprochement, inférieure à $R_{m1} + R_{m2}$;

- les deux fibres (2, 3) dans le coupleur (7) possèdent
des orientations azimutales (2, 3) adaptées pour maximiser
le recouvrement des profils de fuite des deux fibres (2,
3) dans le coupleur (7).

et procédé de fabrication (20) d'un dispositif de cou-
plage.

Figure pour l'abrégé : Fig. 1



Description

Titre de l'invention : Dispositif de couplage pour fibres optiques à cœur creux à couplage inhibé

Domaine technique

[0001] L'invention relève du domaine des fibres optiques à cœur creux et des gyromètres à fibres optiques résonants.

Technique antérieure

[0002] Ces gyromètres, appelés R-FOG, sont constitués d'une fibre optique rebouclée par un coupleur afin de constituer un résonateur optique. Actuellement, la grande majorité des R-FOG utilisent des fibres optiques conventionnelles en silice à cœur solide. Cependant, les effets thermiques et non linéaires de ces fibres conventionnelles limitent considérablement la performance des gyromètres R-FOG.

[0003] Nous rappelons brièvement ci-après le principe d'un coupleur à fibre optique standard composé de deux fibres optiques à cœur solide à symétrie circulaire (fibre monomode de cœur d'indice n_1 et de gaine d'indice n_2). Le rayonnement se propageant dans une fibre à cœur plein produit une onde évanescence à la réflexion totale interne à l'interface entre le cœur et la gaine optique. En rapprochant les cœurs des deux fibres par diverses techniques (polissage par exemple), les gaines optiques des deux fibres se recouvrent et une partie de la lumière propagée dans une première fibre optique se propage dans une deuxième fibre optique. On obtient un dispositif à 4 ports à savoir les 4 extrémités des deux fibres optiques couplées. Dans ce cas de figure, les caractéristiques du coupleur, déterminées par la matrice de transfert entre les ports, ne dépendent pas de l'état de polarisation de la lumière et de l'agencement radial de la zone de couplage.

[0004] Dans un coupleur à fibre optique à cœur solide monomode à maintien de polarisation, on introduit des contraintes dans une direction donnée de façon à créer une biréfringence dans le cœur. Dans ce cas, les caractéristiques du coupleur dépendent de l'état de polarisation et de l'agencement radial dans la zone de couplage. Des techniques ont été développées pour maîtriser l'alignement respectif des directions de contrainte de chaque fibre lors de l'opération de rapprochement des cœurs.

[0005] Afin de lever les limitations de performance du R-FOG dues à l'utilisation de fibres optiques conventionnelles, des travaux de recherche sont menés depuis plusieurs années sur les R-FOG à fibre creuse et plus particulièrement les fibres à guidage à bande interdite (HC-PCF-PBG pour Hollow-Core ; Photonic-Cristal-Fiber ; Photonic BandGap en anglais). Ce type de fibre possède de nombreux avantages pour une utilisation dans des R-FOG : elles présentent de faibles pertes, il est possible de maintenir

un état de polarisation dans un anneau résonant, ou d'extraire d'un anneau résonant un état de polarisation. Cependant, il n'existe actuellement pas de coupleur dont la performance soit comparable à celle des coupleurs utilisant des fibres solides conventionnelles.

- [0006] Des coupleurs de fibre à bande interdite HC-PCF-PBG sont à l'étude (voir Xu, Z. *et al.*, Design of single-polarization coupler based on dual-core photonic band-gap fiber implied in resonant fiber optic gyro. Optics Communications, 380, 302-309, (2016)). Cependant, leur réalisation est extrêmement complexe en raison même du principe de guidage. En effet le guidage dans les fibres PCF-PBG est provoqué par l'existence de bandes interdites photoniques créées par la périodicité de la structure de la gaine microstructurée. Ici, le guidage est réalisé dans un défaut de périodicité (le cœur) qui est d'indice n_1 inférieur à celui de la gaine. Les fibres HC-PCF-PBG possèdent des cœurs creux (section transversale d'air, indice $n_1=1$). Ce guidage est donc différent de celui des fibres à gaines microstructurées PCF « classiques » où le guidage et le confinement de la lumière dans le cœur est provoqué par la réflexion totale interne entre le cœur d'indice n_1 et la gaine microstructurée possédant un indice moyen $n_{2\text{eff}}$ inférieur à n_1 .

Ainsi, réaliser un coupleur utilisant des fibres PCF-PBG (HC ou non) suppose de travailler la gaine microstructurée de façon à supprimer une section sans altérer l'intégrité physique de la gaine ni ses propriétés optiques. Le but étant de rapprocher les cœurs à une distance de l'ordre de la longueur d'onde (~ 1 micron) pour recouvrir le champ évanescent des deux modes du cœur des deux fibres creuses à coupler.

Concrètement, il est très difficile de modifier la structure de la gaine microstructurée de manière à rapprocher suffisamment les deux cœurs, sans trop impacter la qualité de la fibre et le confinement par PBG.

- [0007] Il est connu un autre type de fibre à cœur creux HC-PCF-IC possédant un principe de guidage différent appelé couplage inhibé IC. Il est connu que ces fibres peuvent être utilisées dans un R-FOG. Les fibres IC peuvent présenter des parois de cœur à courbure négative, offrant une faible atténuation, une capacité à conserver la polarisation, des modes de cœur d'une dimension relativement grande, un chevauchement spatial très faible entre le mode de cœur et la paroi en silice du cœur et une efficacité de couplage dépassant 90% (voir Fsaifes, Ihsan, et al. "A test resonator for Kagome Hollow-core Photonic Crystal Fibers for resonant rotation sensing." Optics Communications 383 (2017): 485-490).

- [0008] A l'inverse des fibres HC-PCF de type PBG, il n'existe pas de bandes interdites photoniques dans les fibres HC-PBG de type IC. Dans une fibre à cœur creux HC-PCF de type IC, le mode de cœur et le mode de gaine ayant le même indice effectif, la lumière se propageant dans le cœur pourrait donc théoriquement se propager dans la gaine. Cependant, le confinement et le guidage du mode de cœur dans ces fibres est basé sur

l'inhibition entre couplage du mode de cœur et du mode de la gaine, cette inhibition étant obtenue par la structure de la gaine microstructurée et celle du contour du cœur. En d'autres termes, le produit scalaire entre le champ électrique du mode de cœur $\phi_{\text{cœur}}$ et celui du mode de la gaine ϕ_{gaine} est très faible. Le terme de couplage entre ces deux modes peut être réduit en ayant une faible intersection spatiale entre les champs $\phi_{\text{cœur}}$ et ϕ_{gaine} ou par un fort décalage entre la phase spatiale transverse du mode de cœur et celui du mode de la gaine.

[0009] L'invention vise à pallier certains des problèmes précités de l'art antérieur.

[0010] A cet effet, l'invention a pour objet un dispositif tel que décrit par les revendications.

[0011] L'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'un tel dispositif.

Résumé de l'invention

[0012] A cet effet, un objet de l'invention est un dispositif de couplage pour fibre optique comprenant deux fibres à cœurs creux à couplage inhibé présentant des parois de cœur à courbure négative, un profil de fuite donné et possédant chacune une gaine microstructurée avec une structure donnée et comprenant un coupleur, ledit dispositif étant caractérisé en ce que :

- la structure de chacune des gaines microstructurées des deux fibres à cœurs creux à couplage inhibé est composée d'un unique motif tubulaire, réparti en un seul anneau, un premier motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m1} associé à une première fibre à cœur creux et un deuxième motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m2} associé à une deuxième fibre à cœur creux ;

- les gaines microstructurées des deux fibres dans le coupleur sont espacées d'une distance, appelée distance de rapprochement, inférieure à $R_{m1} + R_{m2}$;

- les deux fibres dans le coupleur possèdent des orientations azimutales adaptées pour maximiser le recouvrement des profils de fuite des deux fibres dans le coupleur.

[0013] Selon des modes particuliers de l'invention :

- le motif réparti en un seul anneau dans la gaine microstructurée d'au moins une des deux fibres est un tube de forme elliptique, le grand axe des ellipses étant orienté radialement ;

- la gaine microstructurée d'au moins une des deux fibres est de structure « nested », le motif réparti en un seul anneau étant un tube contenant au moins un tube concentrique ;

- les deux fibres à cœurs creux à couplage inhibé possèdent des gaines microstructurées avec une structure composée d'au moins 4 tubes de rayons compris entre $1\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$, l'épaisseur des tubes étant comprise entre 100nm et $5\mu\text{m}$ et l'espacement entre les tubes étant compris entre $0,5\mu\text{m}$ et $10\mu\text{m}$;

- le rayon des cœurs des deux fibres est compris entre $5\mu\text{m}$ et $50\mu\text{m}$;

- la structure des gaines microstructurées des deux fibres est identique ;
- la structure des gaines microstructurées des deux fibres est différente ;
- la structure des gaines microstructurées des deux fibres comporte une cassure de symétrie, les gaines microstructurées présentant chacun un interstice élargi, les orientations azimutales des deux fibres dans le coupleur étant adaptées pour que les interstices élargis des deux gaines microstructurées soient en vis-à-vis dans le coupleur ;
- la dimension du coupleur selon la direction de propagation du rayonnement dans les fibres est supérieure à 1mm et inférieure à 1m ;

- [0014] L'invention au aussi pour objet un procédé de fabrication d'un dispositif de couplage pour fibre optique comprenant deux fibres à cœurs creux à couplage inhibé présentant un profil de fuite donné et possédant chacune une gaine microstructurée avec une structure composée d'un unique motif tubulaire, réparti en un seul anneau, un premier motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m1} associé à une première fibre à cœur creux et un deuxième motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m2} associé à une deuxième fibre à cœur creux, et un coupleur (8), ledit procédé comprenant:
- a. le réglage des orientations azimutales des deux fibres dans deux parties séparées du coupleur à l'aide de moyens de rotation ;
 - b. le polissage des gaines externes des deux fibres donnant ainsi une face polie pour chaque fibre de manière à ce que, une fois les deux face polies mise en vis-à-vis la distance entre les gaines microstructurées des fibres appelée distance de rapprochement est inférieure à $R_{m1} + R_{m2}$; et
 - c. le rapprochement des deux parties séparées du coupleur, la mise en vis-à-vis puis la soudure des deux faces polies des deux fibres ;
 - d. le réglage des orientations azimutales effectué lors de l'étape a étant réalisé de telle sorte que le recouvrement des profils de fuite des deux fibres soit maximisé à l'issue de l'étape c.

Brève description des dessins

- [0015] D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description faite en référence aux dessins annexés donnés à titre d'exemple et qui représentent, respectivement :
- [0016] [fig.1] une vue schématique d'une fibre optique à cœur creux à couplage inhibé.
- [0017] [fig.2A], une vue schématique transversale d'un dispositif de couplage pour fibre optique selon un premier mode de réalisation de l'invention et
- [0018] [fig.2B] le champ du vecteur de Poynting dans une des deux fibres de ce dispositif.
- [0019] [fig.3A], une vue schématique transversale d'un dispositif de couplage pour fibre optique selon un deuxième mode de réalisation de l'invention et
- [0020] [fig.3B] montre le champ du vecteur de Poynting dans une des deux fibres de ce

dispositif.

[0021] [fig.4A] et

[0022] [fig.4B], une vue schématique transversale d'un dispositif de couplage pour fibre optique selon un troisième et un quatrième mode de réalisation de l'invention respectivement.

[0023] [fig.5A] et

[0024] [fig.5B], une vue schématique transversale d'un dispositif de couplage pour fibre optique selon un cinquième et un sixième mode de réalisation de l'invention respectivement.

[0025] [fig.6] un schéma des différentes étapes d'un procédé de réalisation de l'invention.

[0026] Les références aux figures, quand elles sont identiques, correspondent aux mêmes éléments.

[0027] Dans les figures, sauf contre-indication, les éléments ne sont pas à l'échelle.

Description des modes de réalisation

[0028] Afin de surmonter les problèmes de l'art antérieur liés à l'utilisation de fibres conventionnelles (à cœurs solides en silice par exemple) dans des gyromètres de type R-FOG et la complexité de réalisation de coupleurs « tout fibre » avec des fibres HC-PCF-PBG, l'invention a pour objet, entre autre, un coupleur utilisant des fibres à cœur creux à couplage inhibé (HC-PCF-IC). Conformément à l'invention, le couplage entre deux fibres HC-PCF-IC utilise les champs de fuite des fibres et plus particulièrement la distribution radiale spécifique des champs de fuite et le recouvrement de ces champs de fuites.

[0029] Les fibres utilisées dans les modes de réalisations des figures présentées ci-dessous possèdent une gaine microstructurée (ou gaine interne) avec une structure composée d'un seul anneau de tubes (gaine SR-TL pour Single-Ring Tubular-Lattice en anglais). Par la suite, une fibre sera définie par son nombre N de tubes, l'agencement azimutal des tubes au sein de la gaine microstructurée, l'épaisseur t des tubes, le rayon R_t des tubes (donné par la distance entre le centre d'un tube et la paroi externe de ce tube) et la présence ou non d'une cassure de symétrie de la gaine microstructurée par exemple par omission ou par insertion d'un tube différent en termes de rayon et/ou en termes d'épaisseur de tubes. Le rayon du cœur R_c d'une fibre est relié au nombre N de tubes, à l'espacement entre deux tubes δ et au rayon R_t des tubes par la formule suivante, connue de l'homme du métier :

[Math.1]

$$R t = (R c . \sin(\pi / N) - \delta / 2) (1 - \sin(\pi / N)) - 1$$

[0030] L'espacement entre deux tubes ou encore le gap δ , est défini comme la distance minimale entre parois externes de deux tubes adjacents.

- [0031] [fig.1] schématise un exemple de fibre optique à cœur creux à couplage inhibé de type SR-TL et permet de représenter certaines des variables permettant de définir les fibres optiques utilisées dans les dispositifs de couplage de l'invention. Dans la figure 1, la gaine microstructurée 4 de la fibre optique est composée de $N=8$ tubes d'une épaisseur t et possédant un rayon R_t , lesdits tubes étant identiques et la fibre ne comportant pas de cassure de symétrie dans l'arrangement azimutal des tubes, les tubes étant espacés d'une distance δ .
- [0032] [fig.2A] représente une vue schématique transversale d'un dispositif de couplage 1 pour fibre optique selon un premier mode de réalisation de l'invention. Dans la figure 2A, le dispositif de couplage 1 pour fibre optique comprend deux fibres à cœurs creux à couplage inhibé 2 et 3 (HC-PCF-IC) présentant des parois de cœur à courbure négative et agencées dans un coupleur 7. Les deux fibres 2 et 3 possèdent chacune une gaine externe 6 et un cœur creux 5. Chacune des fibres possède une gaine microstructurée 4 (ou gaine interne) avec une structure composée d'un seul anneau de tubes (gaine SR-TL pour Single-Ring Tubular-Lattice en anglais). Ce type de structure de gaine microstructurée possède plusieurs avantages pour une utilisation dans un coupleur. D'une part, grâce à la structure de gaine en un seul anneau de tubes, il est facile de rapprocher les cœurs à une distance de l'ordre de la longueur d'onde d'un rayonnement pouvant être guidé par les deux fibres. Cette étape ne nécessite pas de supprimer une section de la gaine interne en prenant garde à ne pas altérer l'intégrité physique de la gaine ou ses propriétés optiques comme c'est le cas avec des fibres HC-PCF de type PBG. Réaliser un coupleur avec des fibres HC-PCF-IC SR-TL présente donc une simplicité avantageuse par rapport aux fibres HC-PCF de type PBG. D'autre part, les fibres possédant une gaine microstructurée de ce type présentent des champs de fuites particuliers qui dépendent de la structure de la gaine microstructurée. Coupler deux fibres de types HC-PCF de type IC requiert de les rapprocher suffisamment et de régler leur orientation azimutale respective pour qu'il existe un recouvrement des champs de fuite des fibres dans le coupleur. Plus précisément, le mécanisme de couplage est basé sur la fuite d'une fibre « vers » l'autre fuite et vice-versa.
- [0033] Pour une structure de gaine microstructurée de fibres HC-PCF-IC SR-TL, les paramètres influant sur l'efficacité de couplage sont donc : la distance entre les deux cœurs des fibres, les orientations azimutales des deux fibres dans le coupleur et la distance de couplage selon l'axe de propagation du rayonnement dans les fibres.
- [0034] Dans le mode de réalisation de la figure 2A, la structure des gaines internes des deux fibres est identique. Les deux gaines microstructurées sont composées d'un anneau de 8 tubes de $R_t=5.88\mu\text{m}$ de rayon. L'épaisseur de la paroi de chaque tube est de $t=465\text{nm}$ et le gap entre deux tubes (ou la distance minimale entre deux tubes adjacent) est de $\delta=3.7\mu\text{m}$. Le rayon des cœurs de chacune des fibres est de $15.25\mu\text{m}$. A noter que

l'épaisseur de la paroi des tubes est choisie en fonction de la longueur d'onde pouvant être guidée par la fibre. Ces deux fibres présentent des pertes par propagation extrêmement faibles (7.7dB/km à 750nm, voir Debord, B., et al. "Ultra-low transmission loss (7.7 dB/km at 750 nm) inhibited-coupling guiding hollow-core photonic crystal fibers with a single ring of tubular lattice cladding." arXiv preprint arXiv:1610.01513 (2016). et B. Debord, A. Amsanpally, M. Chafer, A. Baz, M. Maurel, J. M. Blondy, E. Hugonnot, F. Scol, L. Vincetti, F. Gérôme, and F. Benabid, "Ultralow transmission loss in inhibited-coupling guiding hollow fibers," Optica 4, 209-217 (2017). La distance 40 entre les deux gaines microstructurées des fibres 2 et 3 est supérieure à 0 et inférieure à $2(R_t+t)$. La dimension R_t+t est le rayon maximal transverse du tube réparti en un seul anneau dans la gaine microstructurée. La distance de rapprochement est donc inférieure à deux fois le rayon maximal transverse du motif réparti en un seul anneau de tube. Cette distance correspond à l'épaisseur de la paroi séparant les gaines microstructurées des deux fibres, on l'appellera « distance de rapprochement ». Elle correspond aussi à la distance entre les deux cercles (en rouge dans la figure 2A) passant chacun par les centres des tubes des gaines microstructurées des fibres 2 et 3. Cette distance de rapprochement est un paramètre critique qui influe fortement sur l'efficacité de couplage entre les deux fibres. Si cette distance est trop supérieure à la longueur d'onde, le recouvrement maximal entre les champs de fuite des deux fibres, que l'on peut obtenir en ajustant les orientations azimutales, sera fortement diminué. On souhaite donc garder la distance entre les deux cœurs la plus proche possible de la longueur d'onde du rayonnement se propageant dans les deux fibres.

[0035] Le champ radial du vecteur de Poynting des fibres du dispositif 1 est représenté dans la figure 2B et permet d'observer la distribution radiale du champ de fuite. Dans la figure 2B, plus une région est sombre, plus le champ électrique dans cette région est élevé. Bien que le champ le plus intense soit celui confiné dans le cœur de la fibre, on observe qu'il existe un champ de fuite non négligeable. On note que, dans les fibres du dispositif de couplage 1, la fuite se fait principalement par les sections des tubes touchant la gaine externe 6, représentées par les zones 8 dans la figure 2B. Le fait que le canal de fuite se fasse par les sections des tubes touchant la gaine externe est lié à une valeur de gap δ entre deux tubes (d'une même fibre) suffisamment faible. Lorsque cette valeur dépasse une valeur critique δ_c , la zone de fuite n'est plus la même et cela fait l'objet du mode de réalisation de la figure 3A. Cette valeur (ou gamme de valeurs) critique est obtenue par simulation numérique. Dans le dispositif 1, les orientations azimutales ϕ_2 et ϕ_3 dans le coupleur 7 des fibres 2 et 3 respectivement sont adaptées pour maximiser le recouvrement des profils de fuite des deux fibres dans le coupleur pour obtenir une efficacité de couplage optimale. Pour cela, les deux fibres sont orientées de manière à ce qu'une section 8 du tube touchant la gaine externe d'une

fibre soit mise en vis-à-vis avec une section 8 du tube touchant la gaine externe de l'autre fibre, comme le schématise la figure 2A. Cet arrangement est appelé « tube à tube ». Dans ce mode de réalisation, les canaux de fuite correspondant aux tubes eux même, il est nécessaire que les tubes soient suffisamment rapprochés pour obtenir une efficacité de couplage optimale.

- [0036] La dimension du coupleur du dispositif 1 selon la direction de propagation du rayonnement dans les fibres est supérieure à 1mm et préférentiellement inférieure à 1m. Cette distance est choisie de manière à optimiser l'efficacité de couplage.
- [0037] [fig.3A] représente une vue schématique transversale d'un dispositif de couplage 10 pour fibre optique selon un deuxième mode de réalisation de l'invention. Le dispositif de couplage pour fibre optique 10 comprend deux fibres à cœurs creux à couplage inhibé 2 et 3 (HC-PCF-IC) agencées dans un coupleur 7. Les deux fibres 2 et 3 possèdent chacune une gaine externe 6 et un cœur creux 5. Chacune des fibres possède une gaine microstructurée 4 (ou gaine interne) avec une structure composée d'un seul anneau de tubes (gaine SR-TL pour Single-Ring Tubular-Lattice en anglais).
- [0038] La structure des gaines internes des deux fibres du dispositif de couplage 10 est identique. Les deux gaines internes 4 sont composées d'un anneau de 8 tubes de $5.1\mu\text{m}$ de rayon. L'épaisseur de la paroi de chaque tube est de 580nm et le gap entre deux tubes ou (la distance minimale entre deux tubes adjacent) est de $8\mu\text{m}$. Le rayon des cœurs de chacune des fibres est de $18.5\mu\text{m}$. Comme dans le mode de réalisation précédent, la distance de rapprochement 40 des fibres 2 et 3 est supérieure à 0 et inférieure à $2(R_t+t)$.
- [0039] Le champ du vecteur de Poynting des fibres du dispositif 10 est représenté dans la [fig.3B] et permet d'observer le champ de fuite. Tout comme dans la figure 2B, dans la figure 3B, plus une région est sombre, plus le champ électrique dans cette région est élevé. On observe que le champ électrique est moins fortement confiné dans le cœur des fibres du dispositif 10 que dans le cœur des fibres du dispositif 1. En effet, la structure de la gaine interne microstructurée des fibres du dispositif 10 est différente de celle des fibres du dispositif 1, avec un espacement entre tubes δ plus grand. Le couplage entre le mode de gaine et le mode de cœur est plus fortement inhibé avec la structure de gaine interne des fibres du dispositif 1 qu'avec celles du dispositif 10. Dans les fibres du dispositif 10, la distribution radiale du champ de fuite montre que la fuite se fait principalement à travers les interstices (ou les gaps) 9 entre les tubes de la gaine microstructurée, ceux-ci étant de plus grande taille ($8\mu\text{m}$) que dans les fibres du dispositif 1 (gaps de $3.7\mu\text{m}$). Dans le dispositif 10, les orientations azimutales ϕ_2 et ϕ_3 dans le coupleur 7 des fibres 2 et 3 respectivement sont choisies pour maximiser le recouvrement des profils de fuite des deux fibres dans le coupleur afin d'améliorer l'efficacité de couplage. Pour cela, les deux fibres sont orientées de manière à ce qu'un

gap 9 entre les tubes de la gaine microstructurée d'une fibre soit mis en vis-à-vis avec un gap similaire de l'autre fibre. Cet arrangement est appelé « gap à gap ».

- [0040] La dimension du coupleur du dispositif 10 selon la direction de propagation du rayonnement dans les fibres est supérieure à 1mm et préférentiellement inférieure à 1m. Cette distance est choisie de manière à optimiser l'efficacité de couplage.
- [0041] [fig.4A] et
- [0042] [fig.4B] représentent une vue schématique transversale de deux dispositifs 100 et 1000 de couplage pour fibre optique selon un troisième et un quatrième mode de réalisation de l'invention respectivement. Chacun des dispositifs 100 et 1000 comprend deux fibres HC-PCF-IC 2 et 3 agencées dans un coupleur 7. Les deux fibres 2 et 3 possèdent chacune une gaine externe 6 et un cœur creux 5. Chacune des fibres possède une gaine microstructurée 4 (ou gaine interne) avec une structure de composée d'un seul anneau de tubes SR-TL. Dans le mode de réalisation de la figure 4A, la structure de la gaine interne microstructurée 4 des fibres 2 et 3 du dispositif 100 de couplage est identique.
- [0043] Les deux gaines internes 4 sont composées d'un anneau de 8 tubes de de rayon R_{12} pour la fibre 2 et de rayon R_{13} pour la fibre 3. Dans ce mode de réalisation, l'épaisseur de la paroi de chaque tube t est identique. Aussi afin d'obtenir un recouvrement maximal des champs de fuite, la distance de rapprochement 40 des fibres 2 et 3 est supérieure à 0 et inférieure à $2t+R_{12}+R_{13}$ et de préférence elle est égale à $R_{12}+t$.
- [0044] Cette différence de structure implique que la distribution radiale du champ de fuite est différente pour chaque fibre : dans la fibre du bas, la fuite se fait principalement à travers les interstices 9 entre les tubes de la gaine microstructurée alors que pour la fibre du haut la fuite se fait principalement par les sections des tubes touchant la gaine externe. Ainsi, dans le mode de réalisation de la [fig.4A], les orientations azimutales ϕ_2 et ϕ_3 des deux fibres 2 et 3 dans le coupleur 7 sont choisies de manière à ce que le recouvrement des profils de fuite des deux fibres dans le coupleur soit maximal. Cela signifie qu'un interstice de la fibre du bas est mis en vis-à-vis avec une section du tube touchant la gaine externe de la fibre du haut. Cet arrangement est appelé « tube à gap ». Alternativement, dans cet arrangement, la structure des gaines microstructurées des fibres peut être identique. En effet, comme on le voit dans la figure 3B, il est possible d'avoir des fibres possédant des structures de gaines telles que l'intensité des deux champs de fuites (à travers les interstices 9 entre les tubes de la gaine microstructurée et par les sections des tubes touchant la gaine externe) est comparable. Il est donc possible de coupler deux fibres possédant une structure de gaines identique dans un coupleur 7 avec un arrangement « tube à gap » tout en ayant une bonne efficacité de couplage, par exemple avec la structure de gaine des fibres du mode de réalisation de la figure 3A. Les orientations azimutales ϕ_2 et ϕ_3 des deux fibres 2 et 3 dans le

coupleur 7 sont choisies de manière à ce qu'il y ait recouvrement du profil de fuite d'une fibre se faisant à travers les interstices entre les tubes de la gaine microstructurée et du profil de fuite de l'autre fibre se faisant par les sections des tubes touchant la gaine externe.

- [0045] Par ailleurs, dans tous les arrangements des modes de réalisation des figures 2, 3, 4A (« tube à tube », « gap à gap », « défaut à défaut », etc...) des fibres dans le coupleur, les structures des gaines microstructurées (épaisseurs des parois, rayons des tubes, gap entre les tubes...) des fibres peuvent être différentes, à condition que l'orientation des orientations azimutales ϕ_2 et ϕ_3 des deux fibres dans le coupleur soient choisies de manière à ce que le recouvrement des profils de fuite des deux fibres dans le coupleur soit maximal.
- [0046] La structure de chacune des gaines interne 4B comporte une cassure de symétrie azimutale sur le nombre de tubes de la structure, les gaines microstructurées 4 présentant chacune un interstice élargi ou défaut 11. Les deux gaines internes 4 sont composées d'un anneau de 7 tubes de $6.15\mu\text{m}$ de rayon. L'épaisseur de la paroi de chaque tube est de 415nm et le gap entre deux tubes (ou la distance minimale entre deux tubes adjacent) est de $2.7\mu\text{m}$. Le rayon des cœurs de chacune des fibres est de $13.75\mu\text{m}$. Comme dans les modes de réalisations précédents, la distance de rapprochement 40 des fibres 2 et 3 est supérieure à 0 et inférieure à $2(R_t+t)$.
- [0047] Dans le mode de réalisation de la [fig.4B], l'interstice élargi est situé dans une zone 11 où un tube de la gaine interne serait situé si la structure de cette gaine était symétrique azimutalement en nombre de tubes. Dans un autre mode de réalisation, l'interstice élargi entre les tubes fait une taille comprise entre $2R_t$ et $4R_t$ dans les fibres 2 et 3, avec R_t le rayon des tubes de la gaine microstructurée.
- [0048] Cet interstice élargi permet de modifier la distribution du profil du champ de fuite et de favoriser un canal de fuite par l'interstice élargi 11. Ce canal de fuite est plus intense que les autres canaux de fuite fuyant par les sections des tubes touchant la gaine externe 6. Les orientations azimutales ϕ_2 et ϕ_3 des deux fibres 2 et 3 dans le coupleur 7 sont donc adaptées pour que les interstices élargis 11 des deux gaines microstructurées 4 soient en vis-à-vis dans le coupleur. Cet arrangement est appelé « défaut à défaut ». La dimension du coupleur du dispositif 100 selon la direction de propagation du rayonnement dans les fibres est supérieure à 1mm et préférentiellement inférieure à 1m .
- [0049] Dans le mode de réalisation de la figure 4B, les fibres 2 et 3 du dispositif de couplage 1000 sont des fibres -HC-PCF-IC SR-TL. Les deux fibres 2 et 3 ne possèdent pas la même structure de gaine microstructurée 4.
- [0050] [fig.5A] et
- [0051] [fig.5B] représentent une vue schématique transversale de deux dispositifs 50 et 500

de couplage pour fibre optique selon un cinquième et sixième mode de réalisation de l'invention respectivement. Chacun des dispositifs 50 et 500 comprend deux fibres HC-PCF-IC 2 et 3 agencées dans un coupleur 7. Dans les deux dispositifs, les structures de la gaine interne 4 des deux fibres 2 et 3 sont différentes.

- [0052] Dans le dispositif 50, la structure de la gaine interne de la fibre du haut 3 comporte une cassure de symétrie azimutale sur le nombre de tubes de la structure, la gaine microstructurée 4 présentant un interstice élargi ou défaut 11 alors que la structure de la gaine interne de la fibre du bas 2 ne comporte pas de cassure de symétrie.
- [0053] Cette différence de structure implique que la distribution radiale du champ de fuite est différente pour chaque fibre. Dans la fibre 2 du bas, de par la structure de la gaine interne 4 par exemple similaire à celle des fibres du mode de réalisation de la figure 3, la fuite se fait principalement par les gaps ou interstices entre les tubes de la gaine microstructurée alors que pour la fibre du haut la fuite se fait principalement à travers l'interstice élargi 11. Ainsi, dans le mode de réalisation de la figure 5A, les orientations azimutales ϕ_2 et ϕ_3 des deux fibres 2 et 3 dans le coupleur 7 sont choisies de manière à ce que le recouvrement des profils de fuite des deux fibres dans le coupleur soit maximal. Cela signifie qu'un gap entre les tubes de la fibre 2 du bas est mis en vis-à-vis avec l'interstice élargi 11 de la fibre du haut 3. Cet arrangement est appelé « gap à défaut ».
- [0054] Dans le dispositif 500, la structure de la gaine interne de la fibre du haut 3 comporte une cassure de symétrie azimutale sur le nombre de tubes de la structure, la gaine microstructurée 4 présentant un interstice élargi ou défaut 11 alors que la structure de la gaine interne de la fibre du bas 2 ne comporte pas de cassure de symétrie.
- [0055] Cette différence de structure implique que la distribution radiale du champ de fuite est différente pour chaque fibre. Dans la fibre 2 du bas, de par la structure de la gaine interne 4 par exemple similaire à celle des fibres du mode de réalisation de la figure 2, la fuite se fait principalement par les sections des tubes touchant la gaine externe alors que pour la fibre du haut la fuite se fait principalement à travers de l'interstice élargi 11 de la gaine microstructurée.
- [0056] Ainsi, dans le mode de réalisation de la figure 5B, les orientations azimutales ϕ_2 et ϕ_3 des deux fibres 2 et 3 dans le coupleur 7 sont choisies de manière à ce que le recouvrement des profils de fuite des deux fibres dans le coupleur soit maximal. Cela signifie que dans la fibre du bas 2, une section du tube touchant la gaine externe de la fibre du haut 3 est mise en vis-à-vis avec l'interstice élargi 11 de la fibre du haut 3. Cet arrangement est appelé « tube à défaut ».
- [0057] Il est possible d'utiliser les différentes structures de gaines microstructurées présentées dans les différents modes de réalisation dans les autres modes de réalisation, à condition que les orientations azimutales ϕ_2 et ϕ_3 des deux fibres 2 et 3 dans le

coupleur 7 soient choisies de manière à ce que le recouvrement des profils de fuite des deux fibres dans le coupleur soit maximal.

[0058] Dans tous les modes de réalisation précédents, la structure des gaines microstructurées des deux fibres 2 et 3 n'est pas limitée aux exemples donnés. De manière plus générale, dans tous les modes de réalisation, les deux fibres 2 et 3 à cœurs creux à couplage inhibé possèdent des gaines microstructurées avec une structure composée d'au moins $N=4$ tubes de rayons R_t étant de préférence compris entre $1\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$, l'épaisseur des tubes t étant de préférence comprise entre 100nm et $5\mu\text{m}$, l'espacement entre les tubes δ étant de préférence compris entre $0,5$ et $10\mu\text{m}$, le rayon des cœurs des deux fibres étant donné par un calcul liant le rayon des tubes R_t et le nombre de tubes N . La distance de rapprochement 40 des fibres 2 et 3 est supérieure à 0 et inférieure à $2(R_t+t)$. Le rayon est généralement compris (mais pas limité à cet intervalle) entre $5\mu\text{m}$ et $27\mu\text{m}$. La dimension du coupleur du dispositif selon la direction de propagation du rayonnement dans les fibres est supérieure à 1cm et préférentiellement inférieure à 1m . La structure de la gaine de chaque fibre peut être indifféremment identique ou différente et présenter une cassure de symétrie ou non, l'orientation azimutale de chaque fibre dans le coupleur étant choisie de manière à ce que le recouvrement des profils de fuite des deux fibres dans le coupleur soit maximal.

[0059] Dans un autre mode de réalisation, les fibres du dispositif de couplage possèdent une structure de gaine microstructurée qui n'est pas SR-TL mais présente tout de même un unique motif de forme tubulaire réparti en un seul anneau, les fibres présentant des canaux de fuite préférentiels similaires à ceux présentés par les fibres SR-TL des dispositifs de l'invention. La gaine restant un anneau de formes tubulaires, la définition de la distance de rapprochement reste identique à celle précédemment utilisée : la distance entre les deux cercles définie par les centres des motifs tubulaires des gaines microstructurées des deux fibres. On définit le rayon maximal transverse du motif tubulaire comme la moitié de la plus grande dimension transverse du motif tubulaire, cette dimension comprenant l'épaisseur de la paroi du motif tubulaire. Par exemple dans le cas où les motifs sont de forme elliptique de rayon de grand axe R_g et d'épaisseur de paroi t , le rayon maximal transverse vaut R_g+t . La distance de rapprochement des fibres est inférieure à deux fois le rayon maximal transverse du motif tubulaire.

[0060] Dans les modes de réalisation de l'invention où chaque fibre dans le coupleur possède un même motif tubulaire qui se répète réparti en anneau et différent de celui de l'autre fibre, on définit un premier rayon maximal transverse R_{m1} associé au motif tubulaire d'une première fibre du coupleur et un deuxième rayon maximal transverse R_{m2} associé au motif tubulaire d'une deuxième fibre du coupleur. Dans ce cas, la distance de rapprochement des fibres dans le coupleur est inférieure à deux fois le rayon maximal transverse du motif tubulaire, c'est à dire $R_{m1}+R_{m2}$. Dans un autre mode

de réalisation, la distance de rapprochement est égale à deux fois le rayon maximal transverse, c'est à dire $R_{m1} + R_{m2}$.

[0061] Le motif réparti en un seul anneau de la gaine interne pourra par exemple être de structure « nested », c'est-à-dire une imbrication de différents tubes concentriques avec des diamètres de plus en plus petits.

[0062] Dans un autre mode de réalisation, le motif tubulaire réparti en un seul anneau d'au moins une des deux fibres pourra être des tubes de formes elliptiques, le grand axe des ellipses étant orienté radialement, vers le centre de la fibre. On appelle centre de la fibre, le centre du cœur de la fibre ou le centre du cercle défini par les centres des motifs tubulaires de la fibre.

[0063] Un autre objet de l'invention est un procédé de fabrication 20 des dispositifs de couplage pour fibre optique de l'invention 1, 10, 100, 1000 comprenant chacun deux fibres à cœurs creux à couplage inhibé 2 et 3 présentant des profils de fuite donnés, chacune des fibres possédant une gaine microstructurée avec une structure composée d'un unique motif tubulaire, réparti en un seul anneau, un premier motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m1} associé à une première fibre à cœur creux et un deuxième motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m2} associé à une deuxième fibre à cœur creux, les dispositifs comprenant un coupleur 7. Fig. 6 illustre les différentes étapes (a, b, c) de ce procédé. Ce procédé 20 comprend :

- a. le réglage des orientations azimutales des deux fibres dans deux parties séparées du coupleur 7 à l'aide de moyens de rotation ;
- b. le polissage des gaines externes 6 des deux fibres donnant ainsi une face polie pour chaque fibre de manière à ce que, une fois les deux faces polies mise en vis-à-vis, la distance entre les gaines microstructurées des deux fibres soit inférieure à $R_{m1} + R_{m2}$;
- c. le rapprochement des deux parties séparées du coupleur, la mise en vis-à-vis puis la soudure des deux faces polies des deux fibres ;

le réglage des orientations azimutales effectué lors de l'étape a) étant réalisé de telle sorte que le recouvrement des profils de fuite des deux fibres soit maximisé à l'issue de l'étape c.

Comme expliqué précédemment, le réglage des orientations azimutales des deux fibres dans le coupleur (étape a) et le polissage des gaines externes permettent d'optimiser l'efficacité de couplage en contrôlant respectivement le recouvrement des champs de fuite et l'espacement entre les gaines (qui influe indirectement sur le recouvrement des champs de fuite). Le réglage des orientations de chaque fibre peut être réalisé par des moyens de rotation mécanique (vernier), des moyens piézo-électriques ou tous autres moyens connus de l'homme du métier. Le polissage des gaines externes des deux fibres (étape b) et la soudure des deux faces polies obtenues après polissage

(étape c) sont réalisés par des techniques connues de l'homme du métier. Aussi, la soudure des deux gaines externes peut être réalisée par arc de plasma (PAW pour Plasma Arc Welding en anglais) ou par laser.

Revendications

- [Revendication 1] Dispositif de couplage (1, 10, 50, 100, 500, 1000) pour fibre optique comprenant deux fibres (2, 3) à cœurs creux à couplage inhibé présentant des parois de cœur à courbure négative, un profil de fuite donné et possédant chacune une gaine microstructurée (4) avec une structure donnée et comprenant un coupleur (7), ledit dispositif étant caractérisé en ce que :
- la structure de chacune des gaines microstructurées (4) des deux fibres (2, 3) à cœurs creux à couplage inhibé est composée d'un unique motif tubulaire, réparti en un seul anneau, un premier motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m1} associé à une première fibre à cœur creux et un deuxième motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m2} associé à une deuxième fibre à cœur creux ;
 - les gaines microstructurées (4) des deux fibres dans le coupleur sont espacés d'une distance (40), appelée distance de rapprochement, inférieure à $R_{m1} + R_{m2}$;
 - 1- les deux fibres (2, 3) dans le coupleur (7) possèdent des orientations azimutales (ϕ_2, ϕ_3) adaptées pour maximiser le recouvrement des profils de fuite des deux fibres (2, 3) dans le coupleur (7).
- [Revendication 2] Dispositif de couplage pour fibre optique selon la revendication 1, dans lequel le motif réparti en un seul anneau dans la gaine microstructurée d'au moins une des deux fibres est un tube de forme elliptique, le grand axe des ellipses étant orienté radialement.
- [Revendication 3] Dispositif de couplage pour fibre optique selon la revendication 1, dans lequel la gaine microstructurée d'au moins une des deux fibres est de structure « nested », le motif réparti en un seul anneau étant un tube contenant au moins un tube concentrique.
- [Revendication 4] Dispositif de couplage pour fibre optique selon la revendication 1, dans lequel les deux fibres à cœurs creux à couplage inhibé possèdent des gaines microstructurées avec une structure composée d'au moins 4 tubes de rayons compris entre $1\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$, l'épaisseur des tubes étant comprise entre 100nm et $5\mu\text{m}$ et l'espacement entre les tubes étant compris entre $0,5\mu\text{m}$ et $10\mu\text{m}$.
- [Revendication 5] Dispositif de couplage pour fibre optique selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le rayon des cœurs (5) des deux fibres est compris entre $5\mu\text{m}$ et $50\mu\text{m}$.
- [Revendication 6] Dispositif de couplage (1, 10, 100) pour fibre optique selon l'une

- quelconque des revendications précédentes, dans lequel la structure des gaines microstructurées des deux fibres est identique.
- [Revendication 7] Dispositif de couplage (1000) pour fibre optique selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel la structure des gaines microstructurées des deux fibres est différente.
- [Revendication 8] Dispositif de couplage (100) pour fibre optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans laquelle la structure des gaines microstructurées des deux fibres comporte une cassure de symétrie, les gaines microstructurées présentant chacun un interstice élargi (11), les orientations azimutales des deux fibres dans le coupleur étant adaptées pour que les interstices élargis (11) des deux gaines microstructurées soient en vis-à-vis dans le coupleur.
- [Revendication 9] Dispositif de couplage pour fibre optique selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle la dimension du coupleur selon la direction de propagation du rayonnement dans les fibres est supérieure à 1mm et inférieure à 1m.
- [Revendication 10] Procédé de fabrication (20) d'un dispositif de couplage (1, 10, 50, 100, 500, 1000) pour fibre optique comprenant deux fibres (2, 3) à cœurs creux à couplage inhibé présentant un profil de fuite donné et possédant chacune une gaine microstructurée (4) avec une structure composée d'un unique motif tubulaire, réparti en un seul anneau, un premier motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m1} associé à une première fibre à cœur creux et un deuxième motif tubulaire de rayon maximal transverse R_{m2} associé à une deuxième fibre à cœur creux, et un coupleur (8), ledit procédé comprenant:
- a. le réglage des orientations azimutales (ϕ_2, ϕ_3) des deux fibres dans deux parties séparées du coupleur à l'aide de moyens de rotation ;
 - b. le polissage des gaines externes (6) des deux fibres donnant ainsi une face polie pour chaque fibre de manière à ce que, une fois les deux faces polies mises en vis-à-vis la distance (40) entre les gaines microstructurées des fibres appelée distance de rapprochement est inférieure à $R_{m1} + R_{m2}$; et
 - c. le rapprochement des deux parties séparées du coupleur, la mise en vis-à-vis puis la soudure des deux faces polies des deux fibres ; le réglage des orientations azimutales effectué lors de l'étape a étant

réalisé de telle sorte que le recouvrement des profils de fuite des deux fibres soit maximisé à l'issue de l'étape c.

[Fig. 1]

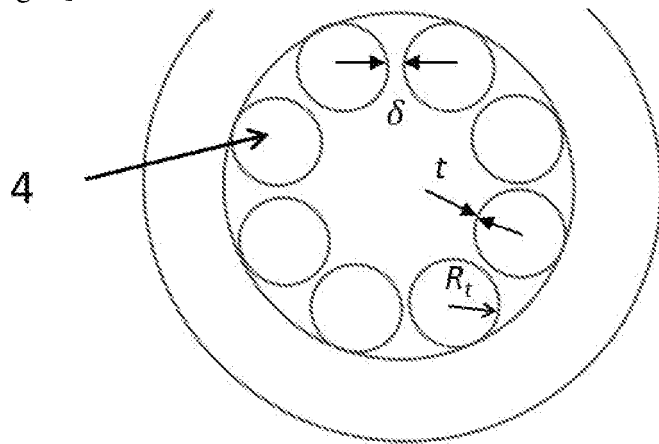


Figure 1

[Fig. 2A]

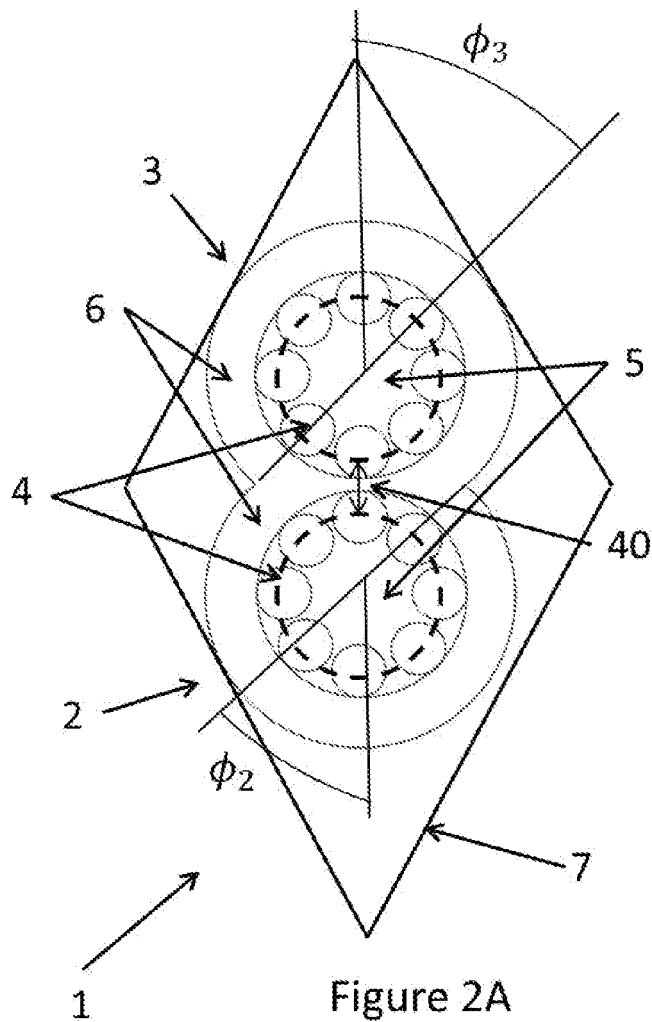


Figure 2A

[Fig. 2B]

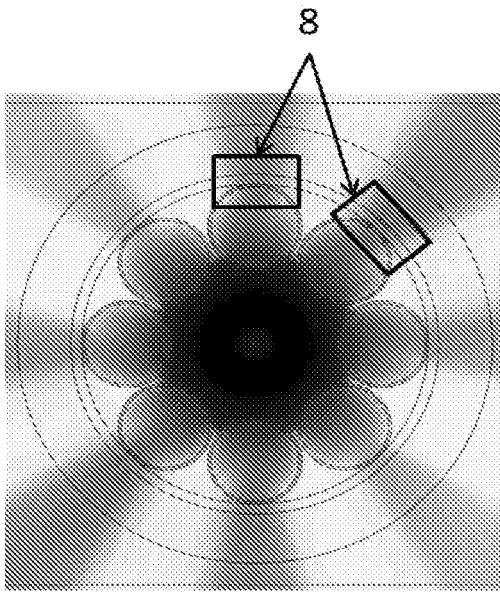


Figure 2B

[Fig. 3A]

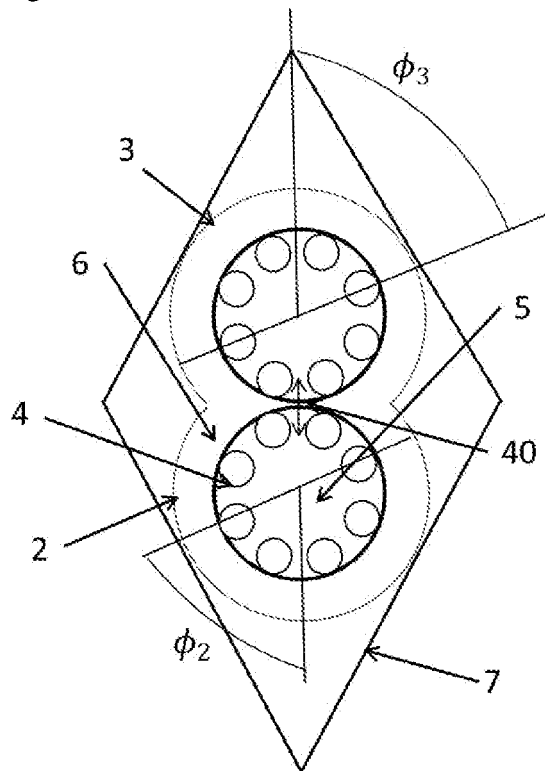


Figure 3A

[Fig. 3B]

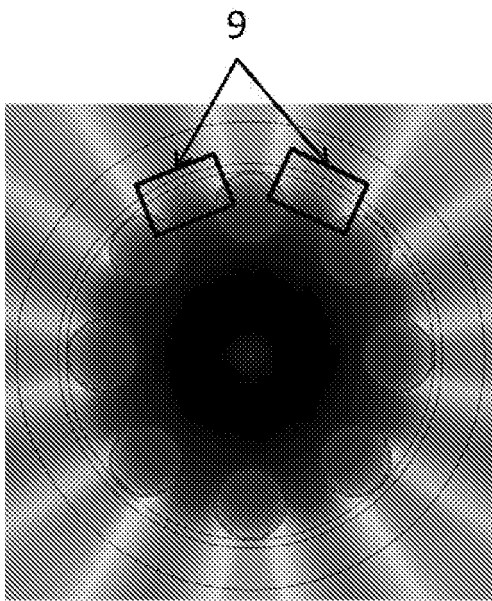


Figure 3B

[Fig. 4A]

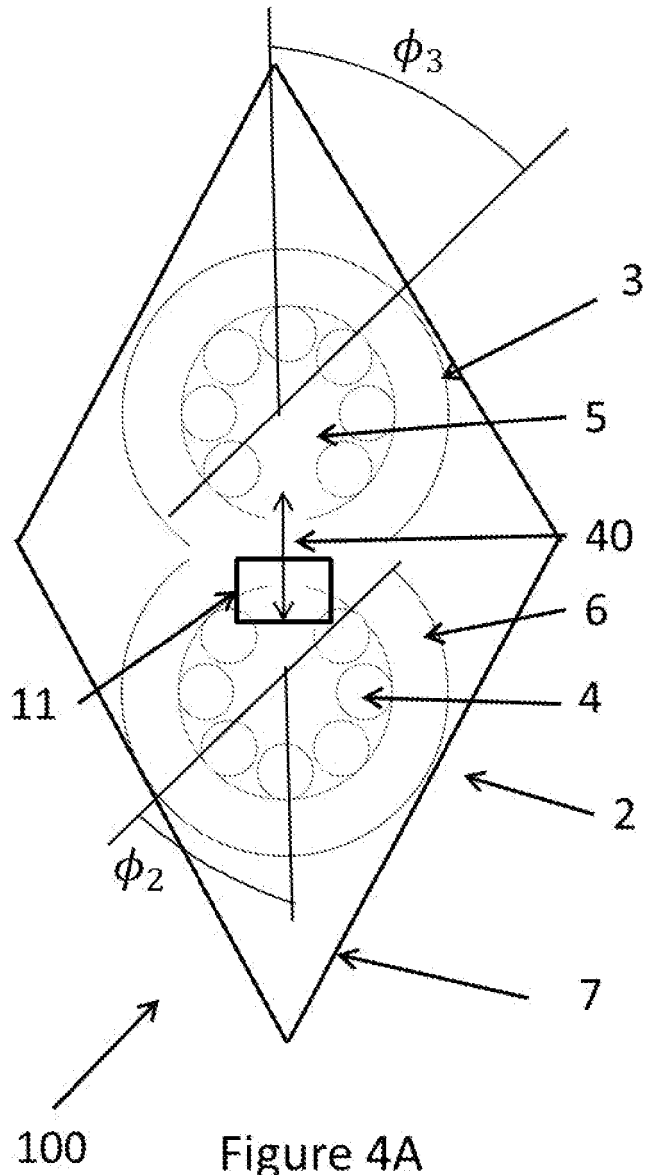


Figure 4A

[Fig. 4B]

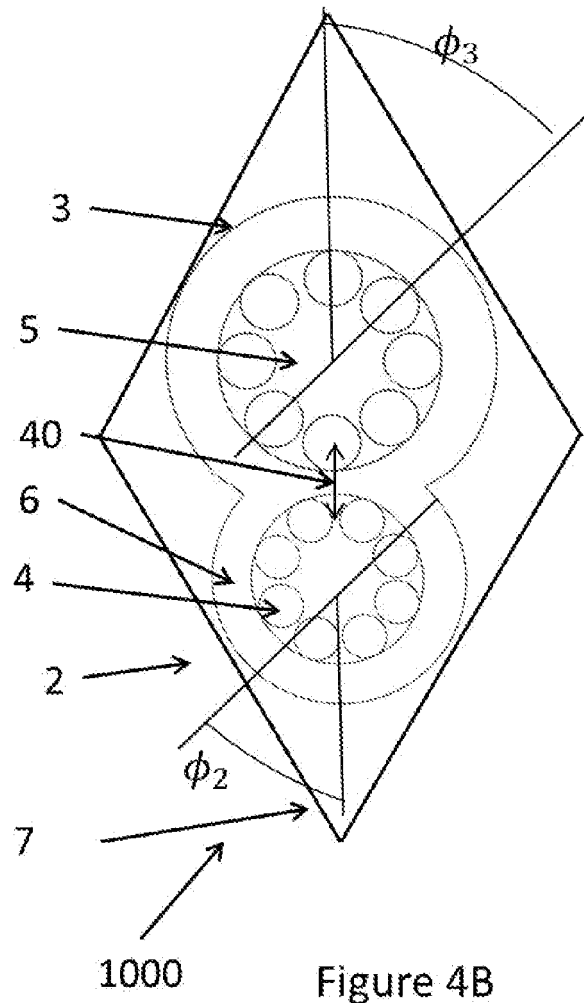
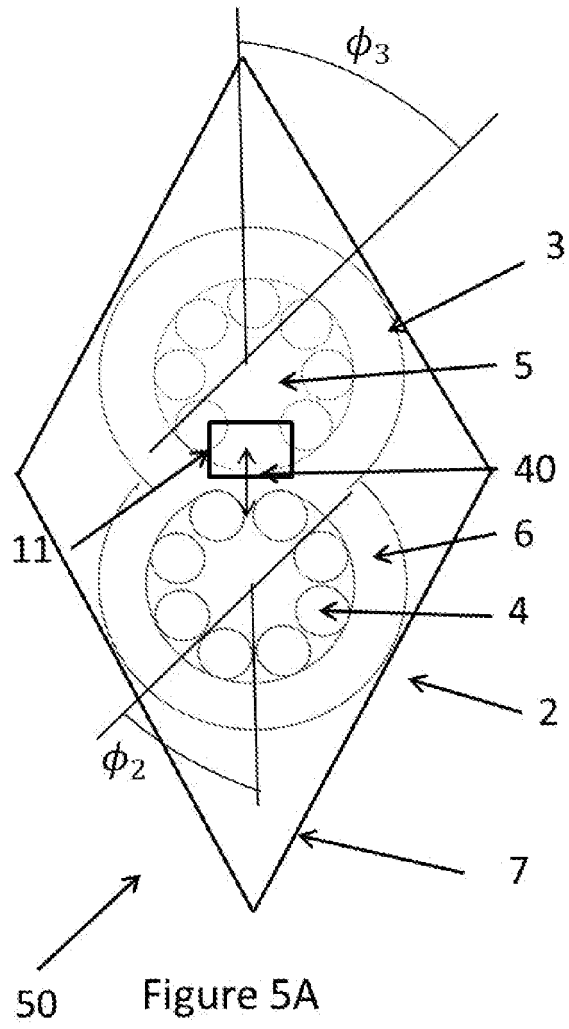
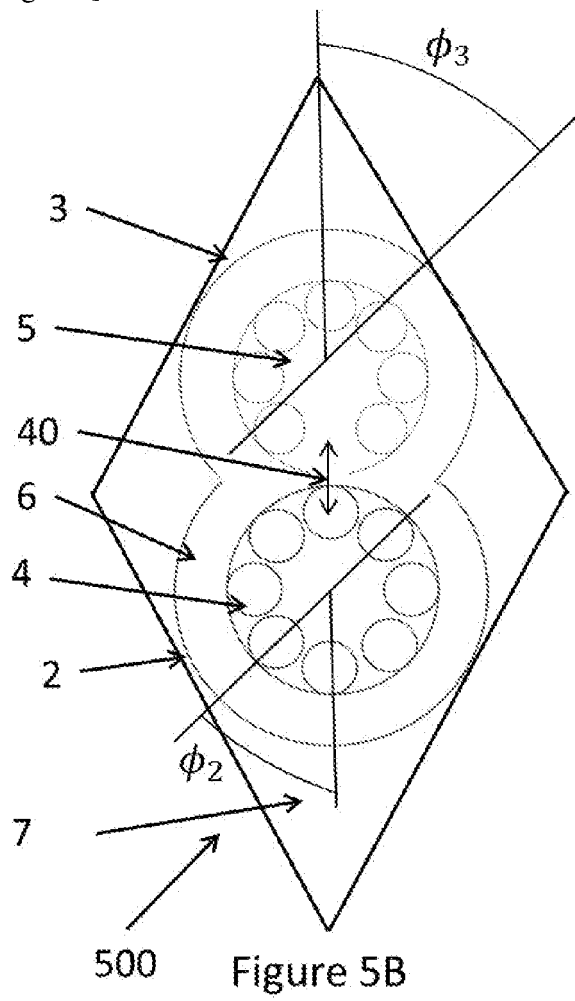


Figure 4B

[Fig. 5A]



[Fig. 5B]



[Fig. 6]

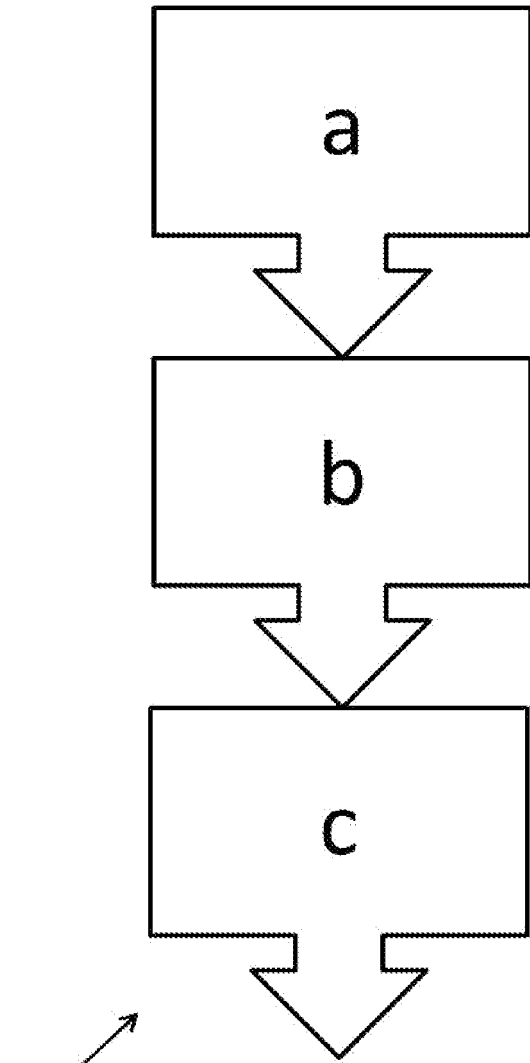


Figure 6

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 868843
FR 1904610

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	CN 108 549 128 A (UNIV FUDAN) 18 septembre 2018 (2018-09-18)	1,3-10	G02B6/38 G02B6/024
Y	* abrégé; figures 4,8 *	2	
Y	----- CHAUDHURI SUBHASIS ET AL: "Low Loss Transmission in Negative Curvature Optical Fibers With Elliptical Capillary Tubes", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, IEEE, USA, vol. 34, no. 18, 15 septembre 2016 (2016-09-15), pages 4228-4231, XP011621615, ISSN: 0733-8724, DOI: 10.1109/JLT.2016.2598491 [extrait le 2016-09-02] * abrégé; figure 1 * -----	2	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G02B
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
21 janvier 2020		Mouget, Mathilde	
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			

RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1904610 FA 868843

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 **21-01-2020**

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
CN 108549128	A	18-09-2018	AUCUN
