

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 29.07.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 02.02.24 Bulletin 24/05.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : Se reporter à la fin du
présent fascicule

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : Commissariat à l'Energie Atomique et
aux Energies Alternatives Etablissement public à carac-
tère industriel et commercial — FR.

72 Inventeur(s) : COTILLARD Romain, ROUSSEL Nico-
las et LAFFONT Guillaume.

73 Titulaire(s) : Commissariat à l'Energie Atomique et
aux Energies Alternatives Etablissement public à carac-
tère industriel et commercial.

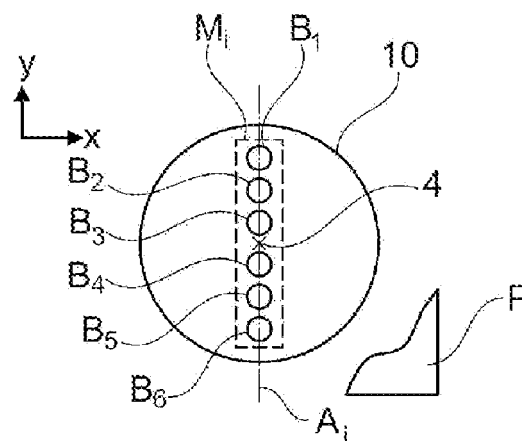
74 Mandataire(s) : INNOV-GROUP.

54 Fibre optique comportant un réseau de Bragg.

57 Fibre optique comportant un réseau de Bragg
Cette fibre optique comporte un réseau (20) de Bragg
dans lequel :

- chaque motif (M_i) du réseau de Bragg s'étend principa-
lement dans un plan, appelé « plan du motif », perpendicu-
laire à un axe longitudinal de la fibre optique,
- le spectre de puissance en réflexion du réseau de
Bragg présente des harmoniques discernables d'ordre su-
périeur à cent dans la plage de longueurs d'onde allant de
600 nm à 2000 nm,
- chaque motif est constitué de plusieurs bulles (B_j ; B1_j,
B2_j) disposées les unes à côté des autres dans le plan du
motif, et
- la surface de la projection orthogonale de toutes les
bulles du motif sur le plan du motif est inférieure à 50 % de
la surface de la section transversale du cœur (10) de la fibre
optique.

Fig. 2



Description

Titre de l'invention : Fibre optique comportant un réseau de Bragg

- [0001] L'invention concerne une fibre optique comportant un réseau de Bragg ainsi qu'un procédé de fabrication de cette fibre optique.
- [0002] De telles fibres optiques sont par exemple utilisées comme transducteur pour mesurer une température ou une contrainte ou tout autre application en optique.
- [0003] Il est souligné qu'un réseau de Bragg ne doit pas être confondu avec une juxtaposition, le long d'une fibre optique, de cavités de Fabry-Perrot. En effet, les caractéristiques spectrales d'une fibre optique comportant une telle juxtaposition de cavités de Fabry-Perrot dépendent des longueurs de chaque cavité de Fabry-Perrot ainsi que de la réflectivité des dioptrés situés à chaque extrémité de chaque cavité de Fabry-Perrot. Contrairement à un réseau de Bragg, les dioptrés ne sont pas espacés les uns des autres d'un pas constant pour former une structure périodique.
- [0004] Une fibre optique comportant un réseau de Bragg d'ordre très élevé et son procédé de fabrication sont décrits dans l'article suivant : Pengtao Luo et Al : « Femtosecond laser plane-by-plane inscribed ultrahigh-order fiber Bragg grating and its application in multi-wavelength fiber lasers », Optic letter, 15/06/2022. Par la suite cet article est désigné par la référence « LUO2022 ».
- [0005] Dans ce texte, « ordre très élevé » désigne le fait que le spectre de puissance en réflexion du réseau de Bragg présente des harmoniques discernables d'ordre supérieur à N dans le domaine de l'optique, où N est un nombre entier supérieur à 100 et, de préférence, supérieur à 500 ou 1000. Autrement dit, dans le spectre de puissance en réflexion d'un réseau de Bragg d'ordre très élevé, il existe des harmoniques d'ordre k, supérieur à N, qui correspondent chacune à un pic de puissance distinct des pics correspondants aux harmoniques d'ordres k-1 et k+1. Ce pic d'ordre k est également supérieur au bruit. Ce pic d'ordre k est situé à la longueur d'onde λ_k définie par la relation (1) suivante : $\lambda_k = 2 \cdot n_e \cdot \Lambda / k$, où :
- [0006] - k est un nombre entier égal à l'ordre de l'harmonique,
 - [0007] - n_e est l'indice effectif de la fibre optique,
 - [0008] - Λ est le pas du réseau de Bragg, et
 - [0009] - le symbole « * » désigne l'opération de multiplication scalaire.
- [0010] Ce pic d'ordre k est dans le domaine de l'optique, c'est-à-dire que sa longueur d'onde λ_k est comprise dans la plage des longueurs d'onde habituellement utilisées en optique. Dans ce texte, le domaine de l'optique désigne la plage des longueurs d'onde qui s'étend de 600 nm à 2000 nm.
- [0011] Le spectre de puissance en réflexion est le spectre de puissance du signal optique réfléchi par le réseau de Bragg. Dans ce texte, à défaut d'indication contraire, le terme

- « spectre de puissance » désigne le spectre de puissance en réflexion.
- [0012] Un pic dans le spectre de puissance en réflexion correspond à une raie d'absorption dans le spectre de puissance en transmission du même réseau de Bragg.
- [0013] Dans l'article LUO2022, chaque motif du réseau de Bragg est constitué d'une seule bulle oblongue qui occupe toute la section transversale du cœur de la fibre optique. Plus précisément, la section de cette bulle dans un plan qui contient l'axe longitudinal de la fibre optique à la forme d'une ellipse. Ce motif est formé dans le cœur de la fibre optique par une impulsion d'un laser femtoseconde. De plus, dans l'article de LUO2022 le pas du réseau de Bragg formé est pris égal à 100 μm , ce qui permet d'obtenir des harmoniques discernables d'ordre k supérieur à cent dans le domaine de l'optique.
- [0014] Il existe d'autres procédés connus de fabrication de réseaux de Bragg qui utilisent des impulsions de rayonnement ultraviolet ou des lasers à CO_2 . Il est souligné que ces autres procédés connus ne permettent pas de fabriquer des réseaux de Bragg d'ordre très élevé. En général, les réseaux de Bragg fabriqués selon ces autres procédés connus présentent seulement des harmoniques discernables d'ordre inférieur à vingt. Il semble que cela provient du fait que les variations de l'indice de réfraction dans la fibre optique obtenues en mettant en œuvre ces autres procédés connus sont beaucoup moins franches que celles obtenues à l'aide d'un laser femtoseconde.
- [0015] La fibre optique de LUO2022 présente un spectre de puissance comportant une succession de pics très rapprochés et très fins dans une plage de longueur d'onde d'intérêt d'au moins 100 nm de largeur dans le domaine de l'optique. De plus, les hauteurs de ces pics sont sensiblement les mêmes sur cette plage d'au moins 100 nm de largeur car chacun de ces pics correspond à un harmonique d'ordre très élevé. Dans ce texte, « très rapproché » signifie que l'écart entre deux pics consécutifs est inférieur ou égal à 10 nm. « très fins » signifie que la largeur à mi-hauteur de chaque pic est inférieure à 3 nm. Une telle succession de pics est ici appelée « un peigne de pics » ou simplement « un peigne ». Un exemple d'un tel peigne est représenté sur la [Fig.3] de l'article LUO2022.
- [0016] Par ailleurs, il est aussi connu, depuis plus longtemps, de fabriquer, à l'aide d'un laser femtoseconde, un réseau de Bragg formé d'une succession de bulles disjointes disposées les unes derrières les autres le long de l'axe longitudinal d'une fibre optique et séparées les unes des autres d'un pas régulier. Un exemple d'un tel procédé de fabrication est par exemple divulgué dans la demande CN211603608U. Toutefois, il semble qu'avant la publication de l'article LUO2022, personne n'avait constaté que ce procédé de fabrication pourrait être exploité pour créer des réseaux de Bragg d'ordre très élevé. En effet, dans toute ces publications, le pas du réseau de Bragg est choisi pour :

- [0017] - que longueur d'onde λ_B de la fréquence fondamentale f_B de résonance soit dans le domaine de l'optique, ou
- [0018] - que seules les premiers harmoniques d'ordre inférieur à vingt soit dans le domaine de l'optique.
- [0019] Ainsi, le pas de ces réseaux de Bragg sont systématiquement inférieurs à 50 μm ou 20 μm . Dans ces conditions, le réseau de Bragg fabriqué n'est pas un réseau de Bragg d'ordre très élevé. En effet, dans ce cas, même si des harmoniques d'ordre k supérieur à cent sont discernables dans le spectre de puissance, la longueur d'onde λ_k de ces harmoniques n'est pas dans le domaine de l'optique. Autrement dit, les longueurs d'onde λ_k des harmoniques d'ordre k supérieur à cent, sont toutes inférieures à 600 nm.
- [0020] Malgré ses nombreux avantages, la fibre optique de l'article de LUO2022 présente des pertes d'insertion élevée. Autrement dit, une partie substantielle de l'énergie du signal optique incident n'est ni réfléchi par le réseau de Bragg ni transmis à travers le réseau de Bragg.
- [0021] L'invention vise à remédier à cet inconvénient en proposant une fibre optique présentant les mêmes avantages que celle divulguée dans l'article de LUO2022 tout en présentant des pertes d'insertions plus faibles.
- [0022] Elle a donc pour objet une fibre optique comportant :
- [0023] - un cœur qui s'étend le long d'un axe longitudinal de la fibre optique et à l'intérieur duquel un signal optique guidé par la fibre optique est apte à se propager le long de l'axe longitudinal de la fibre optique,
- [0024] - un réseau de Bragg réalisé dans le cœur de la fibre optique, ce réseau de Bragg comportant au moins trois motifs identiques alignés les uns derrière les autres le long de l'axe longitudinal de la fibre optique, ce réseau de Bragg présentant les caractéristiques suivantes :
- [0025] - chaque motif s'étend principalement dans un plan, appelé « plan du motif », perpendiculaire à l'axe longitudinal de la fibre optique, et
- [0026] - le spectre de puissance en réflexion du réseau de Bragg présente des harmoniques discernables d'ordre supérieur à cent dans la plage de longueurs d'onde allant de 600 nm à 2000 nm,
- [0027] dans laquelle :
- [0028] - chaque motif est constitué de plusieurs bulles disposées les unes à côté des autres dans le plan du motif, et
- [0029] - la surface de la projection orthogonale de toutes les bulles du motif sur le plan du motif est inférieure à 50 % de la surface de la section transversale du cœur de la fibre optique.
- [0030] Les modes de réalisation de cette fibre optique peuvent comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- [0031] 1) Toutes les bulles d'un même motif sont disjointes.
- [0032] 2) La surface de la projection orthogonale de toutes les bulles du motif sur le plan du motif est inférieure à 5 % de la surface de la section transversale du cœur de la fibre optique.
- [0033] 3) Le motif est constitué d'une seule ligne de bulles disjointes.
- [0034] 4) Le motif est constitué de plusieurs lignes de bulles disjointes.
- [0035] 5) Le nombre de motifs est supérieur ou égal à dix.
- [0036] 6)
- [0037] - le centre d'au moins une bulle du motif est situé à moins de 100 nm de l'axe longitudinale de la fibre optique, et
- [0038] - le barycentre du motif formé par ces bulles est situé à moins de 100 nm de l'axe longitudinale de la fibre optique.
- [0039] 7)
- [0040] - les motifs du réseau de Bragg sont espacés les uns des autres par un pas constant supérieur ou égal à 20 μm , et
- [0041] - l'écart entre l'indice de réfraction du cœur de la fibre optique et l'indice de réfraction de chaque motif du réseau de Bragg est supérieur à 0,3.
- [0042] 8) Chaque bulle est principalement sphérique et les centres de toutes ces bulles qui constituent un même motif du réseau de Bragg sont tous contenus dans le plan du motif.
- [0043] L'invention a également pour objet un procédé de fabrication de la fibre optique ci-dessus, dans lequel, pour chaque emplacement où un motif du réseau de Bragg doit être formé, le procédé comporte une étape de formation de ce motif à l'aide d'un laser femtoseconde,
- [0044] dans lequel chaque étape de formation d'un motif comporte au moins une opération de création d'une ou plusieurs bulles dans le cœur de la fibre optique par irradiation du cœur de la fibre optique à l'aide d'une impulsion du laser femtoseconde de manière à former, à l'emplacement de ce motif, plusieurs bulles disposées les unes à côté des autres dans le plan du motif, les dimensions de ces bulles formées étant telles que la surface de la projection orthogonale de toutes les bulles du motif sur le plan du motif est inférieure à 50 % de la surface de la section transversale du cœur de la fibre optique.
- [0045] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif et faite en se référant aux dessins sur lesquels :
- [0046] - la [Fig.1] est une illustration schématique, partielle et en coupe longitudinale, d'une fibre optique ;
- [0047] - la [Fig.2] est une illustration schématique, en coupe transversale, de la fibre optique

de la [Fig.1] ;

[0048] - la [Fig.3] est un graphe représentant une portion du spectre de puissance de la fibre optique de la [Fig.1] ;

[0049] - la [Fig.4] est un organigramme d'un procédé de fabrication de la fibre optique de la [Fig.1] ;

[0050] - les figures 5 et 6 sont des illustrations schématiques, en coupe transversale, respectivement, d'une première et d'une deuxième variantes de la fibre optique de la [Fig.1].

[0051] Dans ces figures, les mêmes références sont utilisées pour désigner les mêmes éléments. Dans la suite de cette description, les caractéristiques et fonctions bien connues de l'homme du métier ne sont pas décrites en détail.

[0052] Chapitre I : Exemples de modes de réalisation

[0053] La [Fig.1] représente une fibre optique 2 qui s'étend le long d'un axe longitudinal 4 parallèle à une direction Z d'un repère orthogonal XYZ. Dans ce texte, les figures sont orientées par rapport à ce repère XYZ. Par exemple, la direction Z est horizontale et la direction Y est verticale.

[0054] Pour simplifier la [Fig.1], seule une portion de la fibre optique 2 est représentée. La fibre optique 2 est conçue pour guider un signal optique le long de l'axe 4. La longueur d'onde λ_s du signal optique guidé est dans le domaine de l'optique. Par exemple, dans ce mode de réalisation, la longueur d'onde λ_s est égale à 1550 nm.

[0055] La fibre optique 2 est une fibre optique monomode également connue sous l'acronyme SMF (« Simple Mode Fiber »).

[0056] La fibre optique 2 comporte :

[0057] - un cœur 10 dans lequel se propage le signal optique guidé par cette fibre 2,

[0058] - une gaine optique 12 réalisée dans un matériau dont l'indice de réfraction permet de maintenir le signal optique à l'intérieur du cœur 10 par réflexion au niveau de l'interface entre le cœur 10 et cette gaine 12, et

[0059] - une gaine mécanique, typiquement en polymère, et qui recouvre la gaine 12.

[0060] Pour simplifier la [Fig.1], la gaine mécanique de la fibre optique 2 n'a pas été représentée.

[0061] La fibre 2 comporte un réseau 20 de Bragg d'ordre très élevé. Ici, le réseau 20 est conçu pour obtenir un peigne de pics sur une plage de longueurs d'onde d'intérêt contenant la longueur d'onde λ_s et dont la largeur est supérieure à 100 nm. Par exemple, ici, cette plage s'étend de 1500 nm à 1600 nm.

[0062] De plus, le réseau 20 est conçu pour que ce peigne soit formé par les harmoniques du réseau 20 d'ordre proche de 1024.

[0063] A cet effet, le réseau 20 est composé d'une succession de motifs M_i disposés les uns derrière les autres le long de l'axe 4. L'indice i est le numéro d'ordre du motif dans la direction Z. L'indice i du premier motif le plus à gauche dans le réseau 20 est égal à 1

et l'indice i du dernier motif le plus à droite dans le réseau 20 est égal à p . p est égal au nombre de motifs M_i du réseau 20. Sur la [Fig.1], seuls les deux premiers et les deux derniers motifs du réseau 20 ont été représentés. La présence des motifs intermédiaires situés entre les motifs M_2 et M_{p-1} est représentée par des points noirs sur l'axe 4.

- [0064] Le nombre p de motifs est supérieur ou égal à trois et, de préférence, supérieur ou égal à dix. En effet, il a été observé que plus le nombre p est grand, plus la largeur à mi-hauteur de chaque pic décroît. Ici, le nombre p est aussi choisi suffisamment petit pour que la longueur du réseau 20 reste petite, c'est-à-dire inférieure à 1 mètre et, de préférence, inférieure à 10 cm. La longueur du réseau 20 est égale à la distance entre les motifs M_1 et M_p mesurée le long de l'axe 4. Typiquement, le nombre p est inférieur à 200 ou 100.
- [0065] Le pas Λ entre deux motifs M_i et M_{i+1} immédiatement consécutifs dans la direction Z est constant quel que soit l'indice i . Le pas Λ est donc égal à la distance, le long de l'axe 4, qui sépare deux motifs M_i et M_{i+1} immédiatement consécutifs.
- [0066] Ici, le pas Λ est calculé pour que la longueur d'onde λ_c de l'harmonique d'ordre k_c la plus proche du centre du peigne à créer soit égale ou très proche de la longueur d'onde λ_s . Ici, l'ordre k_c de l'harmonique la plus proche de la longueur d'onde λ_s est choisi égal à 1024.
- [0067] Pour cela, le pas Λ est compris entre $0,9*[k_c*\lambda_s/(2*n_e)]$ et $1,1*[k_c*\lambda_s/(2*n_e)]$ et, de préférence, compris entre $0,98*[k_c*\lambda_s/(2*n_e)]$ et $1,02*[k_c*\lambda_s/(2*n_e)]$, où :
- [0068] - n_e est l'indice effectif de la fibre optique 2, et
- [0069] - le symbole « * » désigne l'opération de multiplication scalaire.
- [0070] L'indice effectif n_e de propagation est aussi connu sous le nom de « constante de phase du mode ». Il est défini par la relation suivante : $n_g = n_{eff} - \lambda \frac{dn_{eff}}{d\lambda}$, où n_g est l'indice de groupe et λ est la longueur d'onde du signal optique guidé par la fibre optique 2. L'indice effectif de propagation d'une fibre optique dépend des dimensions du cœur de cette fibre optique et des matériaux formant ce cœur et la gaine optique de cette fibre optique. Il peut être déterminé expérimentalement ou par simulation numérique.
- [0071] Ici, la fibre optique 2 est réalisée à partir d'une fibre optique commercialisée sous la référence SMF-28 par la société Corning®. L'indice n_e de cette fibre optique est égal à environ 1,4676. Dans ces conditions, le terme $k_c*\lambda_s/(2*n_e)$ est égal à approximativement 540,8 μm . Ici, le pas Λ est choisi égal à 540,8 μm . Avec le choix de cette valeur pour le pas Λ , seuls les harmoniques d'ordre compris entre 806 et 2684 sont dans le domaine de l'optique. En particulier, la longueur d'onde λ_B de la fréquence fondamentale du réseau 20 n'est pas dans le domaine de l'optique.
- [0072] Pour cette valeur du pas Λ et pour que la longueur L_{20} du réseau 20 soit inférieure à 10 cm, le nombre p de motifs est choisi inférieur à 185. Ici, p est choisi égal à 120, de

sorte que la longueur L_{20} du réseau 20 est approximativement égale à 65 mm.

[0073] Les motifs M_i sont tous structurellement identiques les uns aux autres et diffèrent les uns des autres seulement par leur position le long de l'axe 4. Ainsi, par la suite, seul le motif M_i est décrit en détail. Ce motif M_i s'étend principalement dans un plan P_i perpendiculaire à l'axe 4. Ce plan P_i est donc parallèle aux directions X et Y. Sur la [Fig.1], seuls les plans P_1 , P_2 , P_{p-1} et P_p dans lesquels s'étendent respectivement, les motifs M_1 , M_2 , M_{p-1} et M_p sont représentés.

[0074] La [Fig.2] représente plus en détail le motif M_i . Sur la [Fig.2], seule la section transversale du cœur 10 est représentée.

[0075] Chaque motif M_i réfléchit une partie du signal optique incident. Une autre partie du signal optique incident traverse le motif M_i . Enfin, chaque motif M_i diffuse une partie de l'énergie du signal optique incident qui n'est alors ni réfléchi ni transmise à travers ce motif M_i . C'est cette énergie diffusée par chaque motif M_i qui crée les pertes d'insertion causées par la présence du réseau 20 dans le cœur 10 de la fibre optique 2. Pour minimiser ces pertes d'insertion, ici, la surface S_{Mi} de la section transversale du motif M_i occupe moins de la moitié de la surface S_{10} de la section transversale du cœur 10. La surface S_{Mi} est égale à la surface de la projection orthogonale du motif M_i sur le plan P_i . La surface S_{10} est égale à la surface de la section transversale du cœur 10. Typiquement, la surface S_{10} est constante le long de toute la longueur de la fibre optique 2.

[0076] De préférence, la surface S_{Mi} est inférieure à $0,1 * S_{10}$ ou à $0,05 * S_{10}$ ou à $0,01 * S_{10}$. Ici, la surface S_{Mi} est inférieure à $0,05 * S_{10}$.

[0077] Pour obtenir une réflectivité suffisante du motif M_i pour limiter le nombre p de motifs et donc pour limiter la longueur L_{20} du réseau 20, la surface S_{Mi} est supérieure à $0,016 \mu m^2$, c'est-à-dire supérieure à deux fois la surface de la projection orthogonale d'une bulle sphérique de 100 nm de diamètre sur le plan P_i . Dans ce mode de réalisation, la surface S_{Mi} est supérieure ou égale à $0,032 \mu m^2$.

[0078] A cette fin, le motif M_i est constitué de plusieurs bulles B_j . L'indice j est un identifiant qui permet d'identifier de façon unique la bulle B_j parmi l'ensemble des autres bulles du même motif M_i . L'indice j est ici un nombre entier compris entre 1 et q , où q est égal au nombre de bulles B_j du motif M_i . Le nombre q est supérieur ou égal à deux ou quatre. Ici, le nombre q est égal à six.

[0079] Dans ce mode de réalisation, toutes les bulles B_j sont structurellement identiques les unes aux autres. Seules leurs positions dans le plan P_i permettent de les distinguer les unes des autres.

[0080] Chaque bulle B_j crée une variation importante de l'indice de réfraction du cœur 10 dans la direction de propagation du signal optique. Pour cela, l'écart entre l'indice n_{r10} de réfraction du cœur 10 et l'indice n_{rB} de réfraction de la bulle B_j est supérieur à 0,3

ou à 0,4. Ici, l'intérieur de chaque bulle est vide ou pratiquement vide ce qui correspond à un écart entre les indices n_{r10} et n_{rB} supérieur ou égal à 0,4.

- [0081] De plus, pour que la variation d'indice de réfraction soit brusque, le diamètre D_j de chaque bulle B_j est inférieur à 200 nm et, de préférence, inférieur à 100 nm. Généralement, le diamètre D_j est également supérieur à 10 nm ou 50 nm.
- [0082] Chaque bulle B_j est principalement sphérique. Ainsi, le diamètre D_j de la bulle B_j est égal au diamètre de la sphère de plus petit volume qui contient entièrement la bulle B_j . Ici, ce diamètre D_j est inférieur à 100 nm.
- [0083] Le centre de chaque bulle B_j est contenu dans le plan P_i .
- [0084] Dans ce mode de réalisation, les bulles B_j sont disjointes, c'est-à-dire qu'elles ne se chevauchent pas et qu'elles ne sont pas fluidiquement raccordées les unes aux autres.
- [0085] Le motif M_i est centré sur l'axe 4. Pour cela, les bulles B_j sont disposées les unes à côté des autres de manière à ce que le barycentre du motif M_i soit situé à moins de 100 nm de l'axe 4 et le centre d'au moins une des bulles B_j est situé à moins de 100 nm de l'axe 4.
- [0086] Dans ce premier mode de réalisation, le barycentre du motif M_i est situé sur l'axe 4. De plus, le motif M_i est symétrique par rapport à l'axe 4.
- [0087] Les centres des bulles B_j sont situés les uns derrière les autres sur un axe A_i qui coupe l'axe 4 et qui appartient au plan P_i . Le motif M_i comporte donc une ligne de bulles disjointes. Dans ce cas, l'agencement des bulles disjointes forme ce qui est appelé un « trait pointillé » dans ce texte. Ici, l'axe A_i est parallèle à la direction Y. Dans ce mode de réalisation, les bulles B_3 et B_4 sont situées, respectivement, au-dessus et au-dessous de l'axe 4. Les centres des bulles B_3 et B_4 sont à moins de 100 nm de l'axe 4.
- [0088] La distance entre deux bulles B_j , B_{j+1} immédiatement consécutives le long de l'axe A_i est constante. Autrement dit, quelle que soit la paire de bulle B_j , B_{j+1} immédiatement consécutives le long de l'axe A_i , la distance qui sépare les centres de ces deux bulles est la même.
- [0089] La [Fig.3] représente le spectre de puissance de la fibre optique 2 entre 1545 nm et 1555 nm. La réflectivité des pics du peigne obtenu atteint -21 dBm.
- [0090] La [Fig.4] représente un procédé de fabrication de la fibre optique 2. Ce procédé débute par une étape 50 de fourniture d'une fibre optique dont le cœur 10 est initialement dépourvu de réseau de Bragg. Par exemple, la fibre optique fournie est la fibre optique commercialisée sous la référence SMF-28 par la société Corning®.
- [0091] Ici, la gaine mécanique de cette fibre optique est transparente aux impulsions d'un laser femtoseconde de sorte qu'il n'est pas nécessaire de retirer cette gaine mécanique aux emplacements où doivent être réalisés les motifs M_i .
- [0092] Ensuite, une étape 52 de formation du motif M_i dans le cœur 10 de la fibre optique fournie est réitérée à chaque emplacement où un tel motif M_i doit être formé.

- [0093] Lors de l'étape 52, chaque bulle B_j est créée par une seule impulsion du laser femtoseconde. Plus précisément, lors d'une opération 54 de création d'une bulle B_j , le faisceau du laser femtoseconde est focalisé sur le centre de la bulle B_j à créer puis une impulsion d'une durée inférieure à 500 fs ou à 250 fs est émise et irradie le point du cœur 10 où doit se situer le centre de la bulle B_j . La bulle B_j est alors créée dans le cœur 10.
- [0094] Ensuite, la fibre optique est déplacée par rapport au laser femtoseconde pour que le faisceau du laser femtoseconde soit maintenant focalisé sur le centre de la prochaine bulle B_{j+1} à créer, puis l'opération 54 est répétée.
- [0095] Dans ce mode de réalisation, les bulles B_j sont donc créées les unes après les autres.
- [0096] Les valeurs des différents paramètres d'un laser femtoseconde pour créer une bulle telle que la bulle B_j dépendent des caractéristiques de la fibre optique fournie ainsi que des caractéristiques du laser femtoseconde utilisé. Le réglage de ces différents paramètres pour créer les bulles B_j précédemment caractérisées, fait parti des compétences de l'homme du métier. Par exemple, à titre d'illustration, le lecteur peut consulter à ce sujet la demande CN211603608U qui décrit en détail un exemple d'installation permettant de former des bulles telles que les bulles B_j dans le cœur d'une fibre optique. Ici, les paramètres suivants ont été utilisés pour à fabriquer la fibre optique 2 :
- [0097] - la longueur d'onde centrale de l'impulsion du laser femtoseconde est égale à 512 nm,
- [0098] - la durée de chaque impulsion du laser femtoseconde est égale à 160 fs, et
- [0099] - la puissance de chaque impulsion du laser femtoseconde est égale à 45 nJ.
- [0100] La [Fig.5] représente un motif $M2_i$ qui peut être utilisé à la place du motif M_i pour réaliser un réseau de Bragg d'ordre très élevé. Le motif $M2_i$ est identique au motif M_i sauf que les bulles B_j se chevauchent. Il existe donc entre chaque paire de bulles B_j, B_{j+1} immédiatement consécutives, une zone Z_c de chevauchement. Pour cela, la distance entre les centres de chaque paire de bulles B_j, B_{j+1} immédiatement consécutives est choisie inférieure à D_j . Typiquement, cette distance est comprise entre $0,05 \cdot D_j$ et $0,9 \cdot D_j$ ou entre $0,5 \cdot D_j$ et $0,9 \cdot D_j$. Dans ce mode de réalisation, puisque les bulles B_j se chevauchent, elles sont fluidiquement raccordées les unes aux autres.
- [0101] La [Fig.6] représente un motif $M3_i$ qui peut être utilisé à la place du motif M_i pour réaliser un réseau de Bragg d'ordre très élevé. Le motif $M3_i$ comporte un premier et un second traits en pointillés. Le premier trait en pointillés comporte quatre bulles disjointes $B1_1$ à $B1_4$ alignées les unes derrière les autres le long d'un axe $A1_i$ appartenant au plan P_i . Le second trait en pointillés comporte quatre bulles disjointes $B2_1$ à $B2_4$ alignées les unes derrière les autres le long d'un axe $A2_i$ appartenant au plan P_i . Ici, les axes $A1_i$ et $A2_i$ sont tous les deux parallèles à la direction Y. De plus, les axes

$A1_i$ et $A2_i$ sont symétriques l'un de l'autre par rapport à l'axe 4. Par exemple, la distance la plus courte entre l'axe $A1_i$ et l'axe 4 est comprise entre 50 nm et 100 nm.

[0102] Les bulles $B1_j$ et $B2_j$ sont chacune identiques à la bulle B_j et disposées le long de leurs axes $A1_i$ et $A2_i$ respectifs pour que le motif $M3_i$ soit centré sur l'axe 4.

[0103] Chapitre II : Variantes :

[0104] Variantes du réseau de Bragg :

[0105] L'ordre k_c de l'harmonique qui se trouve au centre du peigne à réaliser est ici supérieur à 100 et, de préférence, choisi supérieur à 500 ou 1000. Cet ordre k_c peut aussi être choisi supérieur 2000 ou 4000 ou 10000. Théoriquement, il n'existe pas de limite supérieure pour cet ordre k_c . Toutefois, il découle de la relation (1) que plus l'ordre k_c est grand, plus le pas Λ du réseau de Bragg est grand et donc que le réseau de Bragg est plus long. En pratique, c'est donc la longueur maximale souhaitée pour le réseau de Bragg qui impose une limite supérieure pour l'ordre k_c . Ici, cette longueur maximale est fixée à 1 m.

[0106] De même, la valeur minimale du pas Λ est supérieure à 20 μm et, typiquement, supérieure à 50 μm pour que des harmoniques d'ordre très élevé soient compris dans le domaine de l'optique. Théoriquement, il n'existe pas de valeur maximale pour le pas Λ . En effet, quelle que soit la valeur retenue pour le pas Λ , il est possible de trouver une valeur pour l'ordre k_c qui permet de placer la longueur d'onde λ_c entre 600 nm et 2000 nm. Toutefois, plus le pas Λ est grand, plus le réseau de Bragg est long. En pratique, c'est donc aussi la longueur maximale souhaitée pour le réseau de Bragg qui impose une limite supérieure pour la valeur du pas Λ .

[0107] La plage de longueurs d'onde d'intérêt peut être plus large que 100 nm. Par exemple, la largeur de cette plage de longueur d'onde d'intérêt est, en variante, supérieure à 200 nm ou 300 nm. Il n'existe pas de limite supérieure pour sur cette plage de longueur d'onde d'intérêt si ce n'est qu'elle doit se situer dans le domaine de l'optique. A titre d'exemple, en appliquant l'enseignement donné dans le chapitre I, il est possible d'obtenir des peignes centrés sur les longueurs d'onde couramment utilisées en optique tel que, notamment, la longueur d'onde de 800 nm, 1000 nm, 1300 nm ou 1500 nm.

[0108] Variantes du motif :

[0109] Dans un autre mode de réalisation, le motif M_i n'est pas centré sur l'axe 4.

[0110] Les bulles B_j d'un motif peuvent être disposées de manière non-symétrique par rapport à l'axe 4.

[0111] En variante, la distance entre deux bulles B_j , B_{j+1} immédiatement consécutives le long de l'axe A_i n'est pas constante et varie en fonction de l'indice j .

[0112] De nombreuses formes sont possibles pour les motifs. Par exemple, au lieu de comporter un trait en pointillés, le motif comporte plusieurs traits en pointillés, par exemple, parallèles les uns aux autres dans le plan du motif. Le motif peut aussi prendre

d'autre forme que la forme d'un trait en pointillés. Par exemple, en variante, le motif comporte des bulles dont les centres sont situées sur chacun des sommets d'un polygone à au moins trois sommets. Par exemple, le polygone est un triangle ou un rectangle.

[0113] Variantes du procédé de fabrication :

[0114] En variante, si la gaine mécanique de la fibre optique n'est pas transparente ou semi-transparentes vis-à-vis des impulsions du laser femtoseconde utilisé, la gaine mécanique est retirée à l'emplacement où doit être fabriqué chaque motif du réseau de Bragg avant d'appliquer les impulsions du laser femtoseconde.

[0115] D'autres valeurs sont possibles pour les paramètres du laser femtoseconde pour créer des bulles telles que les bulles B_i . En particulier, la longueur d'onde centrale de l'impulsion du laser femtoseconde peut être choisie entre 233 nm et 1300 nm. La durée de l'impulsion peut être choisie entre 10 fs et 500 fs. La puissance de l'impulsion peut être choisie entre 10 nJ et 250 nJ.

[0116] Dans un autre mode de réalisation, l'impulsion du laser femtoseconde est simultanément focalisée sur différents points de la section transversale du cœur de la fibre optique pour former simultanément plusieurs bulles avec une seule impulsion du laser femtoseconde. Pour cela un modulateur spatial de lumière, plus connu sous l'acronyme SLM (« Spatial Light Modulator») est, par exemple, utilisé.

[0117] Pour garantir qu'un trait en pointillés traverse de part en part la section transversale du cœur 10, la formation des bulles disposées le long de l'axe A_i peut commencer dans la gaine 12 et se terminer dans la gaine 12.

[0118] Dans un autre mode de réalisation, lors de la formation d'un motif, la puissance du laser est modifiée pour obtenir des bulles de différents diamètres. Dans ce cas, les bulles qui constituent un même motif du réseau de Bragg n'ont pas toutes le même diamètre.

[0119] Il est également souligné que la fibre optique 2 peut être fabriqué en utilisant un autre procédé de fabrication que ceux utilisant un laser femtoseconde si cet autre procédé permet d'obtenir, dans le cœur 10, des variations de l'indice de réfraction aussi franches que celles obtenues à l'aide d'un laser femtoseconde.

[0120] Autres variantes :

[0121] D'autres fibres optiques que la fibre SMF-28 peuvent être utilisée. Par exemple, la fibre optique peut être une fibre optique multimode ou MMF (Multi-Mode Fiber).

[0122] Il n'est pas nécessaire que le cœur de la fibre optique soit constitué d'un dopage spécifique. Ainsi, le procédé de fabrication décrit peut être mis en œuvre avec des fibres optiques dont le cœur est réalisé en germanosilicates, en silice pure, en aluminosilicates dopés aux terres rares ou en saphir.

[0123] Chapitre III : Avantages des modes de réalisation décrits :

- [0124] Les différents modes de réalisation de la fibre optique décrits présentent les mêmes avantages que la fibre optique de l'article LUO2022 tout en présentant des pertes d'insertion plus faibles. En effet, l'utilisation de plusieurs bulles dans chaque motif permet d'obtenir un motif plus petit que celui utilisé dans l'article de LUO2022 et donc de réduire substantiellement les pertes d'insertion. De plus, le fait d'utiliser plusieurs bulles permet d'obtenir un motif suffisamment réfléchissant pour diminuer le nombre de motifs et donc pour conserver la compacité du réseau de Bragg tout en limitant les pertes par insertion.
- [0125] Le fait que les bulles qui constituent un motif du réseau de Bragg soient toutes disjointes, diminue les pertes par diffusion au niveau de chaque motif et donc les pertes d'insertion. En effet, lorsque les bulles se chevauchent, les zones de chevauchement entre plusieurs bulles sont soumises à plusieurs impulsions successives du laser femtoseconde. Il a été observé qu'une zone du cœur de la fibre optique qui est soumise à plusieurs impulsions du laser femtoseconde, se dégrade. Cette dégradation augmente les pertes par diffusion. A l'inverse, lorsque les bulles sont disjointes, de telles zones de chevauchement n'existent pas, ce qui limite les pertes par diffusion.
- [0126] Le fait que la surface de la projection orthogonale du motif sur le plan du motif soit inférieure à 5 % de la surface de la section transversale de la fibre optique, permet d'obtenir un réseau de Bragg dont les pertes par diffusion sont très faibles, notamment par comparaison au réseau de Bragg de l'article LUO2022.
- [0127] Le fait que le motif soit uniquement constitué d'une ligne de bulles disjointes permet à la fois d'augmenter la réflectivité du motif tout en limitant l'augmentation de ses pertes par diffusion. De plus, un tel motif reste simple à fabriquer.
- [0128] Le fait que le motif soit constitué de plusieurs lignes de bulles disjointes permet d'augmenter la réflectivité de ce motif.
- [0129] Le fait que le nombre de motifs du réseau de Bragg soit supérieur ou égal à dix permet de limiter la largeur de chacune des raies du spectre de puissance comprises entre 600 nm et 2000 nm.
- [0130] Le fait que le motif soit centré sur l'axe 4 de la fibre optique 2 permet d'augmenter les interactions entre le motif et le signal optique qui se propage. Cela permet donc, à performance égale, de diminuer le nombre de motifs et donc d'obtenir un réseau de Bragg moins long que si le motif n'était pas centré sur l'axe 4.

Revendications

- [Revendication 1] Fibre optique comportant :
- un cœur (10) qui s'étend le long d'un axe longitudinal (4) de la fibre optique et à l'intérieur duquel un signal optique guidé par la fibre optique est apte à se propager le long de l'axe longitudinal de la fibre optique,
 - un réseau (20) de Bragg réalisé dans le cœur de la fibre optique, ce réseau de Bragg comportant au moins trois motifs (M_i ; $M2_i$; $M3_i$) identiques alignés les uns derrière les autres le long de l'axe longitudinal de la fibre optique, ce réseau de Bragg présentant les caractéristiques suivantes :
 - chaque motif s'étend principalement dans un plan, appelé « plan du motif », perpendiculaire à l'axe longitudinal de la fibre optique, et
 - le spectre de puissance en réflexion du réseau de Bragg présente des harmoniques discernables d'ordre supérieur à cent dans la plage de longueurs d'onde allant de 600 nm à 2000 nm, caractérisé en ce que :
 - chaque motif est constitué de plusieurs bulles (B_j ; $B1_j$, $B2_j$) disposées les unes à côté des autres dans le plan du motif, et
 - la surface de la projection orthogonale de toutes les bulles du motif sur le plan du motif est inférieure à 50 % de la surface de la section transversale du cœur de la fibre optique.
- [Revendication 2] Fibre optique selon la revendication 1, dans laquelle toutes les bulles d'un même motif sont disjointes.
- [Revendication 3] Fibre optique selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle la surface de la projection orthogonale de toutes les bulles du motif sur le plan du motif est inférieure à 5 % de la surface de la section transversale du cœur de la fibre optique.
- [Revendication 4] Fibre optique selon la revendication 3, dans laquelle le motif est constitué d'une seule ligne de bulles disjointes.
- [Revendication 5] Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 2 à 3, dans laquelle le motif est constitué de plusieurs lignes de bulles disjointes.
- [Revendication 6] Fibre optique selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle le nombre de motifs (M_i ; $M2_i$; $M3_i$) est supérieur ou égal à dix.
- [Revendication 7] Fibre optique selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel :

- le centre d'au moins une bulle du motif est situé à moins de 100 nm de l'axe longitudinale de la fibre optique, et
- le barycentre du motif (M_i ; $M2_i$; $M3_i$) formé par ces bulles est situé à moins de 100 nm de l'axe longitudinale de la fibre optique.

[Revendication 8]

Fibre optique selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle :

- les motifs (M_i ; $M2_i$; $M3_i$) du réseau de Bragg sont espacés les uns des autres par un pas constant supérieur ou égal à 20 μm , et
- l'écart entre l'indice de réfraction du cœur de la fibre optique et l'indice de réfraction de chaque motif du réseau de Bragg est supérieur à 0,3.

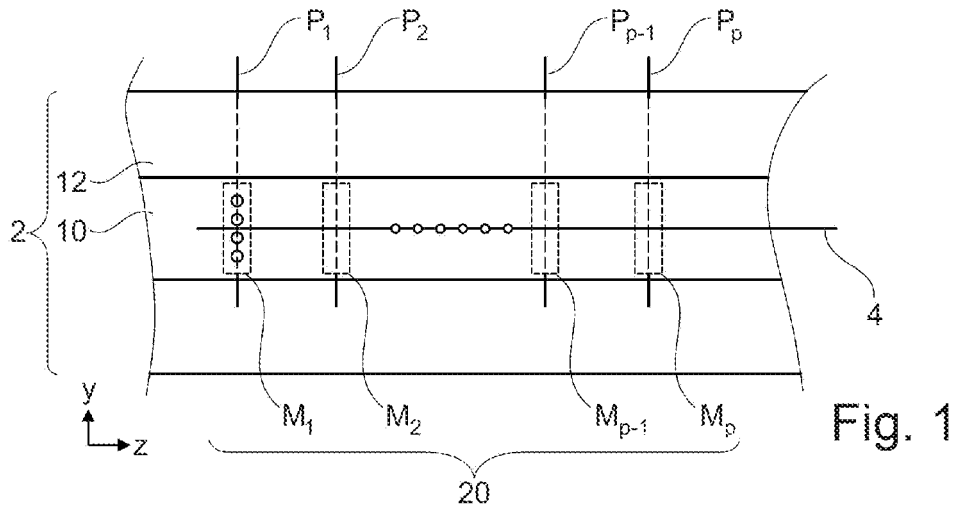
[Revendication 9]

Fibre optique selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle chaque bulle est principalement sphérique et les centres de toutes ces bulles qui constituent un même motif du réseau de Bragg sont tous contenus dans le plan (P_i) du motif.

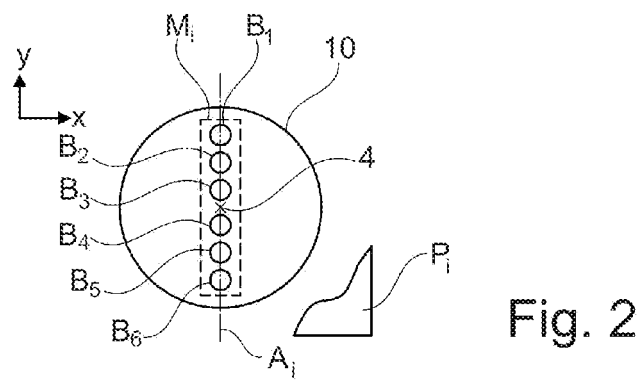
[Revendication 10]

Procédé de fabrication d'une fibre optique conforme à l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel, pour chaque emplacement où un motif du réseau de Bragg doit être formé, le procédé comporte une étape (52) de formation de ce motif à l'aide d'un laser femtoseconde, caractérisé en ce que chaque étape (52) de formation d'un motif comporte au moins une opération (54) de création d'une ou plusieurs bulles dans le cœur de la fibre optique par irradiation du cœur de la fibre optique à l'aide d'une impulsion du laser femtoseconde de manière à former, à l'emplacement de ce motif, plusieurs bulles disposées les unes à côté des autres dans le plan du motif, les dimensions de ces bulles formées étant telles que la surface de la projection orthogonale de toutes les bulles du motif sur le plan du motif est inférieure à 50 % de la surface de la section transversale du cœur de la fibre optique.

[Fig. 1]



[Fig. 2]



[Fig. 3]

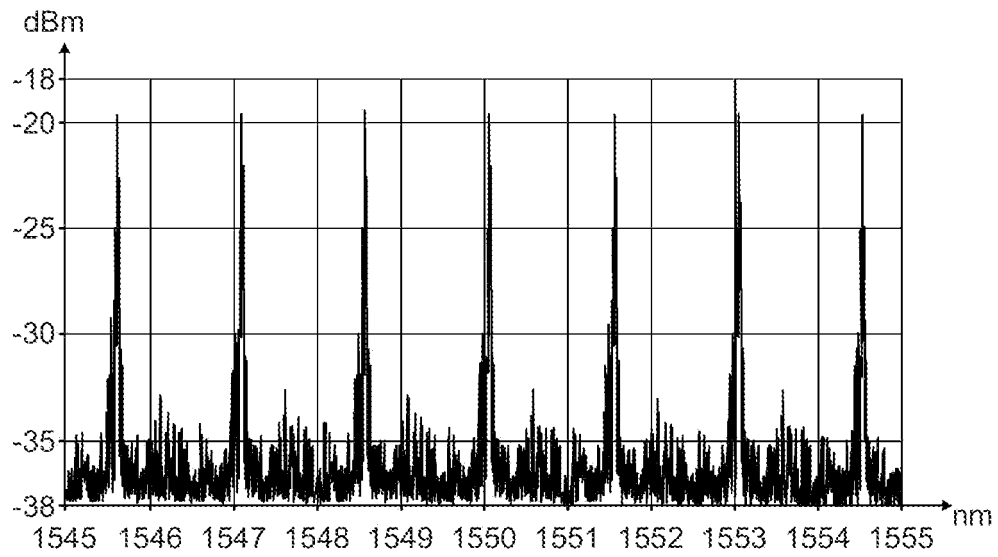


Fig. 3

[Fig. 4]

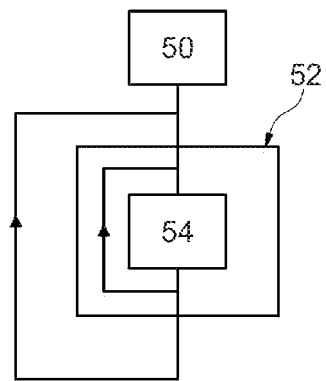


Fig. 4

[Fig. 5]

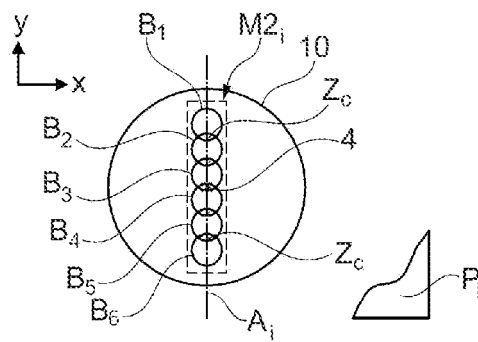


Fig. 5

[Fig. 6]

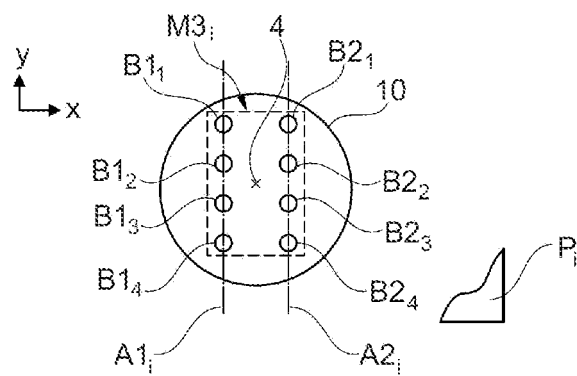


Fig. 6

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 910481
FR 2207936

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	LUO PENGTAO ET AL: "Femtosecond laser plane-by-plane inscribed ultrahigh-order fiber Bragg grating and its application in multi-wavelength fiber lasers", OPTICS LETTERS, vol. 47, no. 12, 15 juin 2022 (2022-06-15), page 3127, XP093023982, US ISSN: 0146-9592, DOI: 10.1364/OL.460261 * page 3127 – page 3128; figures 1(a), 1(b), 4 * -----	1-10	G02B6/02
A	CA 2 512 327 A1 (CA NAT RESEARCH COUNCIL [CA]) 30 septembre 2006 (2006-09-30) * alinéas [0018], [0052], [0053]; figure 11 * -----	1-10	
A	JENS U THOMAS ET AL.: "Mode selective fiber Bragg gratings", PROCEEDINGS OF SPIE CONFERENCE FRONTIERS IN ULTRAFAST OPTICS: BIOMEDICAL, SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL APPLICATIONS X, 24 janvier 2010 (2010-01-24), - 26 janvier 2010 (2010-01-26), pages 75890J-1-75890J-9, XP040517921, SPIE, PO BOX 10 BELLINGHAM WA 98227-0010 USA * page 75890J6 * -----	1-10	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
A	FR 3 082 954 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]; SAFRAN [FR]) 27 décembre 2019 (2019-12-27) * page 10, ligne 7 – page 13, ligne 12; figures 1, 3 * ----- -/--	1-10	G02B H01S
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
17 février 2023		Bourhis, J	
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	

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 910481
FR 2207936

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	US 2019/064432 A1 (CHEN PENG KEVIN [US] ET AL) 28 février 2019 (2019-02-28) * alinéa [0033] - alinéa [0043]; figure 5 * -----	1-10	
A	SASCHA LIEHR ET AL: "Femtosecond Laser Structuring of Polymer Optical Fibers for Backscatter Sensing", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, IEEE, USA, vol. 31, no. 9, 1 mai 2013 (2013-05-01), pages 1418-1425, XP011496826, ISSN: 0733-8724, DOI: 10.1109/JLT.2013.2250483 * page 1419; figure 2 * -----	1-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
17 février 2023		Bourhis, J	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2207936 FA 910481**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **17-02-2023**
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
CA 2512327	A1	30-09-2006	AUCUN	
FR 3082954	A1	27-12-2019	CN 112534319 A	19-03-2021
			EP 3811130 A1	28-04-2021
			FR 3082954 A1	27-12-2019
			US 2021271019 A1	02-09-2021
			WO 2019243745 A1	26-12-2019
US 2019064432	A1	28-02-2019	US 2019064432 A1	28-02-2019
			US 2020200968 A1	25-06-2020