

19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

11) N° de publication : **2 902 190**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

21) N° d'enregistrement national : **06 05239**

51) Int Cl⁸ : G 01 N 21/41 (2006.01), G 02 B 6/032

12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22) Date de dépôt : 13.06.06.

30) Priorité :

43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 14.12.07 Bulletin 07/50.

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 :

71) Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE Etablissement public à caractère industriel et commercial — FR.

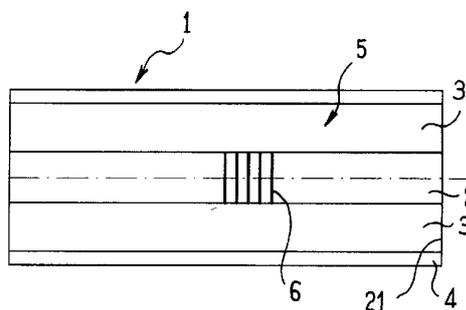
72) Inventeur(s) : PHAN HUY MINH CHAU, DEWYNTER MARTY VERONIQUE, LAFFONT GUILLAUME, FERDINAND PIERRE, BLANC WILFRIED, DUSSARDIER BERNARD, PAGNOUX DOMINIQUE et ROY PHILIPPE.

73) Titulaire(s) :

74) Mandataire(s) : REGIMBEAU.

54) CAPTEUR A BASE DE FIBRE OPTIQUE MICROSTRUCTUREE ET A RESEAU DE BRAGG.

57) Capteur à fibre à réseau de Bragg comportant une source et un système de détection fonctionnant à une longueur d'onde d'étude donnée, ainsi qu'une fibre (1) à réseau de Bragg (6) reliée à ladite source et au dit système, ladite fibre étant une fibre optique microstructurée dont la gaine (5) comprend des canaux (3) adjacents au coeur (2) et aptes à recevoir un produit à analyser, le diamètre du coeur (2) étant de l'ordre de la longueur d'onde d'étude.



FR 2 902 190 - A1



DOMAINE GENERAL

L'invention concerne les fibres optiques et les capteurs à fibres optiques.

Une des applications classiques des fibres optiques concerne en effet le domaine de l'instrumentation optique et des capteurs.

Dans ce domaine, d'importants besoins sont exprimés pour des systèmes intégrés, interrogeables à distance et très sensibles à des paramètres divers comme la température, l'indice de réfraction etc.

Pour répondre à ces besoins, des solutions consistant à associer la technologie des fibres optiques à celle des réseaux de Bragg ont été proposées, notamment pour améliorer la sensibilité de la mesure de paramètres optiques tels que l'indice de réfraction, ou le coefficient d'absorption d'un milieu donné.

15 ART ANTERIEUR

Capteurs à fibre optique et à réseau de Bragg (Fiber Bragg Gratings en anglais, ou FBG)

De nombreuses solutions ont déjà été proposées, qui intègrent un réseau de Bragg photo-inscrit à une fibre conventionnelle.

20 Une première solution consiste à associer une fibre optique conventionnelle de section circulaire dont la gaine a été attaquée à l'acide fluorhydrique, avec un réseau de Bragg à traits droits inscrit au cœur de cette fibre.

Le milieu dont un paramètre est à mesurer enrobe la zone « attaquée » par l'acide.

25 La fibre obtenue selon cette première solution présente une grande fragilité puisque le diamètre de la fibre est extrêmement réduit. Cette fragilité s'avère particulièrement préjudiciable pour certaines utilisations de la fibre, et limite par conséquent les applications possibles d'une telle fibre.

30 Un tel capteur à fibre est par exemple décrit dans le document "High resolution refractive index sensor by using thinned Fiber Bragg

Grating," Proceedings of the SPIE 5502, pp 251-254 (2004) (A. Iadicicco, A. Cusano, A. Cutolo et M. Giordano).

Une seconde solution repose sur un profil de section de fibre en forme de D. La gaine de la fibre peut être attaquée chimiquement, voire polie ou attaquée mécaniquement, tandis qu'un réseau de Bragg à traits
5 droits est inscrit dans le cœur de celle-ci (K. Zhou, X. Chen, L. Zhang and I. Bennion, "Optical chemsensors based on etched fiber Bragg gratings in D-shape and multimodes fibers". OFS2005, pp. 158, 161. Proc. SPIE vol. 5855).

10 Le profil en forme de D présente une meilleure sensibilité à l'indice de réfraction du milieu entourant le réseau que dans le cas d'un réseau de Bragg à traits droits inscrit dans une fibre conventionnelle.

Cependant, l'attaque chimique ou l'usinage fragilise la fibre et induit par conséquent les inconvénients précités.

15 D'autres solutions proposent également d'inscrire un réseau de Bragg à pas longs ou à traits inclinés dans le cœur d'une fibre conventionnelle.

Une fibre conventionnelle dans le cœur de laquelle est inscrit un réseau de Bragg à pas longs est décrite par S. Khaliq, S.W. James et R.
20 P. Tatam dans "Enhanced sensitivity fibre optic long period grating temperature sensor," Meas. Sci. Technol. 13, pp. 792-795 (2002).

G. Laffont et P. Ferdinand proposent une fibre conventionnelle dans le cœur de laquelle est inscrit un réseau de Bragg à traits inclinés ("Tilted short-period fiber-Bragg-grating-induced coupling to cladding
25 modes for accurate refractometry," Meas. Sci. Technol. 12 (7) pp765-70 (2001)).

Pour effectuer l'analyse d'un milieu environnant, ce type de réseau de Bragg, la partie de fibre où est localisé ce réseau doit être entièrement plongée dans le milieu à sonder. Cette contrainte restreint
30 sensiblement la flexibilité de l'utilisation d'une telle fibre.

De plus l'obtention et l'utilisation des fibres proposées par ces différentes techniques sont souvent complexes, ce qui limite encore

substantiellement l'étendue des domaines d'application dans lesquels de telles fibres peuvent être utilisées.

Ces différentes solutions ne conduisent pas pour les premières (fibres en D) à un transducteur robuste (fibre fragilisée mécaniquement) et ne permettent pour les secondes (réseaux en angles ou à pas long) qu'un multiplexage réduit à un très petit nombre de capteurs sur une même fibre.

Capteurs à fibres microstructurées

On connaît déjà par ailleurs des capteurs combinant des fibres de type microstructurées et des réseaux de Bragg, notamment afin d'offrir une grande sensibilité à l'indice de réfraction du milieu à analyser (M. C. Phan Huy, G. Laffont, V. Dewynter-Marty, P. Ferdinand, P. Roy, J-M. Blondy, D. Pagnoux, W. Blanc, and B. Dussardier, "Inscription de transducteurs à réseaux de Bragg dans des fibres microstructurées pour des applications en réfractométrie").

Les fibres microstructurées sont généralement réalisées en silice, mais peuvent aussi être réalisées en plastique. Ainsi, ces fibres peuvent être réalisées par exemple en polyméthacrylate de méthyle également désigné PMMA, en Polystyrène, en polymère fluoré ou en CYTOP qui est une fluoro-résine transparente à structure non cristalline et dont la désignation fait l'objet d'une protection par marque. Ces fibres réalisées en plastique peuvent aussi être obtenues par voie sol gel.

Ces fibres microstructurées comportent un certain nombre de canaux longitudinaux au sein de la gaine optique, ces canaux pouvant éventuellement être remplis d'un matériau solide, liquide ou gazeux, convenablement choisi pour la transduction. Ces fibres microstructurées comprennent également un cœur solide, liquide ou gazeux permettant le guidage de la lumière par réflexion totale ou par Bandes Interdites Photoniques, suivant la configuration.

Ces fibres permettent de définir avec souplesse, lors de leur conception, les caractéristiques optogéométriques du guide optique et

de sa gaine et de définir des fibres dédiées à des fonctions optiques spécifiques (télécommunications, métrologie...).

Toutefois, les fibres microstructurées classiquement développées, pour les besoins des télécoms par exemple, ne permettent pas d'obtenir
5 la forte sensibilité recherchée dans des applications telles que les mesures d'indices de réfraction, d'absorption, de fluorescence etc. Le profil de ces fibres n'autorise en effet pas une interaction suffisante entre le mode de l'onde optique guidée se propageant dans le cœur et le produit à analyser.

10

PRESENTATION DE L'INVENTION

Un but de l'invention est de proposer un capteur à réseau de Bragg présentant une sensibilité améliorée, pour la détection et la mesure de tout paramètre physico-chimique ayant une influence sur l'indice effectif
15 du mode de propagation d'une onde électromagnétique, comme par exemple l'indice de réfraction, la densité, la concentration, la luminescence, la fluorescence, la phosphorescence, le temps de décroissance de la fluorescence etc.

Un autre but de l'invention est de proposer une fibre
20 microstructurée à réseau de Bragg offrant une grande souplesse d'utilisation et notamment (mais non limitativement) permettant d'obtenir une grande sensibilité à l'indice de réfraction du produit à analyser.

Notamment, l'invention propose un capteur à fibre à réseau de
25 Bragg comportant une source et un système de détection fonctionnant sur une plage de longueurs d'onde donnée, ainsi qu'une fibre à réseau de Bragg reliée à ladite source et au dit système, ladite fibre étant une fibre optique microstructurée dont la gaine comprend des canaux adjacents au cœur et aptes à recevoir un produit à analyser, caractérisé
30 en ce que le diamètre du cœur est de l'ordre de la longueur d'onde d'étude.

Avec un tel capteur, l'interaction entre le champ évanescent de l'onde guidée et le produit à analyser est augmentée. La sensibilité du capteur en est améliorée.

- Un tel capteur peut en outre être défini par les caractéristiques
- 5 suivantes prises seules ou en combinaison :
- diamètre du cœur est compris entre 0,5 μm et 20 μm .
 - le diamètre du cœur est compris entre 1 μm et 10 μm pour une longueur d'onde d'étude de l'ordre de 1,55 μm ,
 - le réseau de Bragg est à pas inférieur à 10 μm ,
 - 10 - les canaux sont séparés les uns des autres par des ponts radiaux dont l'épaisseur est comprise entre 0,01 μm et 10 μm ,
 - la fibre comporte un nombre de canaux adjacents au cœur compris entre 2 et 5,
 - 15 - la fibre comporte exactement trois canaux adjacents au cœur,
 - la fibre est réalisée en silice ou en plastique, le plastique étant notamment fabriqué à partir de PMMA, de polystyrène, d'un polymère fluoré ou de CYTOP,
 - 20 - le cœur de la fibre est réalisé en silice pure, ou dopée, ou en matériau plastique, le plastique étant notamment fabriqué à partir de PMMA, de polystyrène, d'un polymère fluoré ou de CYTOP,
 - le capteur comporte également un système d'introduction et/ou d'extraction du produit à analyser dans au moins l'un
 - 25 des canaux.
 - le capteur est agencé pour recueillir les ondes réfléchies ou transmises par le réseau de Bragg.

L'invention concerne également une fibre microstructurée à

30 réseau de Bragg que comporte un capteur selon l'invention.

L'invention concerne en outre un procédé pour la détermination de la structure d'une telle fibre selon lequel on détermine le diamètre du cœur de la fibre en se fixant un niveau donné de confinement et un

diamètre donné de cœur, en ce qu'on détermine par modélisation la sensibilité de la fibre comportant un cœur du diamètre donné à l'indice de réfraction d'un produit à analyser, et en ce qu'on fait évoluer ce diamètre donné du cœur de manière itérative en fonction des sensibilités déterminées par les modélisations.

Egalement, l'invention propose l'utilisation du capteur selon l'une quelconque des caractéristiques précédentes pour la mesure d'un paramètre physico-chimique ayant une influence sur l'indice effectif du mode de propagation comme par exemple l'indice de réfraction, le coefficient d'absorption, la densité, la concentration, la luminescence, la fluorescence, la phosphorescence, le temps de décroissance de la fluorescence.

15 PRESENTATION DES DESSINS

D'autres caractéristiques, buts et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui va suivre, et en regard des dessins annexés, donnés à titre d'exemples non limitatifs et sur lesquels :

20 La figure 1a est une coupe radiale de la fibre selon un mode de réalisation.

La figure 1b est une coupe axiale de la fibre selon la figure 1.

Les figures 2a à 2d sont des coupes radiales de fibres selon d'autres modes de réalisation.

25 La figure 3a, est un schéma d'un capteur selon un mode de réalisation.

Les figures 3b et 4a à 4c, sont des schémas de capteurs selon d'autres modes de réalisation.

30 DESCRIPTION DE FIBRES MICROSTRUCTUREES A RESEAU DE BRAGG SELON UN MODE DE REALISATION.

Structure générale

En référence aux figures 1a et 1b, on a illustré une fibre selon un exemple de réalisation.

Cette fibre 1 se compose d'un coeur 2, entouré d'une gaine 5.

5 La gaine 5 présente une pluralité de canaux 3 longitudinaux parallèles.

La présence de ces canaux 3 dans la gaine 5 est caractéristique des fibres dites microstructurées.

10 Ces canaux 3 sont adjacents au coeur 2 et disposés de manière à former une couronne.

En outre, ces canaux 3 sont séparés les uns des autres par des ponts radiaux 7 très fins s'étendant depuis la périphérie 4 de la gaine 5 jusqu'au coeur 2. Ainsi, chaque canal 3 est délimité radialement par la périphérie 4 de la gaine 5 vers l'extérieur, et par le coeur 2 vers
15 l'intérieur.

Chaque canal 3 est également délimité tangentiellement par les ponts radiaux 7.

Le coeur 2 peut être réalisé en silice pure, par omission de canal 3 dans la zone centrale (défaut central) de la matrice de silice. Le coeur 2
20 peut également être dopé, au germanium par exemple. Ce dopage permet de modifier les caractéristiques de transmission dans le coeur 2, tout en conférant au cœur un caractère photosensible autorisant la photo-inscription de réseaux de Bragg.

La gaine 5 et les ponts radiaux 7 sont en silice éventuellement
25 dopée, et les canaux 3 sont remplis d'air ou d'un milieu d'indice de réfraction inférieur à celui du cœur (2).

Dans d'autres modes de réalisation la fibre microstructurée pourrait être réalisée en plastique, et notamment à partir de polyméthacrylate de méthyle également désigné PMMA, de polystyrène, d'un polymère
30 fluoré, ou encore de CYTOP.

Dans le cas où la longueur d'onde d'étude est comprise entre 0,5 μm et 2 μm , le diamètre de la gaine périphérique 4 est par exemple

compris entre 50 μm et 500 μm , et celui de coeur 2 entre 1 μm et 20 μm .

Dans le coeur 2 de la fibre 1 est inscrit un réseau de Bragg 6.

Un réseau de Bragg inscrit dans le coeur d'une fibre constitue un
5 réseau présentant plusieurs dizaines voire quelques milliers de périodes
ou « pas » modifiant l'indice de réfraction du coeur de la fibre optique.
Ce type de réseau se comporte comme un filtre pour une bande
spectrale centrée sur une longueur d'onde caractéristique λ_B dite de
Bragg. Cette longueur d'onde dépend du pas Λ du réseau, et de l'indice
10 de réfraction que « voit » le mode de propagation appelé indice effectif
 n_{eff} du mode guidé.

Ainsi par exemple pour le réseau de Bragg à traits droits, la
longueur d'onde caractéristique λ_B est définie par la relation

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (1)$$

15 Ainsi, toute modification de l'indice effectif n_{eff} ou du pas Λ du
réseau entraîne une variation proportionnelle de la longueur d'onde λ_B .

Le suivi de ce déplacement spectral permet de détecter ou de
mesurer la variation du paramètre physique inducteur de cette
modification.

20 Si l'indice de réfraction effectif du mode de l'onde guidée est
influencé par un produit environnant la fibre, la précision de la détection
de la variation du paramètre à mesurer de ce produit dépend donc
notamment de la sensibilité du réseau de Bragg à l'indice de réfraction
de ce produit.

25 Ce réseau de Bragg 6 est à pas court, le pas étant typiquement
compris entre 0,1 μm et 10 μm .

Selon un premier exemple, le réseau de Bragg 6 peut être inscrit à
l'aide d'un laser continu (par exemple à 244 nm), notamment si le coeur
est en silice dopée par exemple au Germanium. Selon un deuxième
30 exemple, le réseau de Bragg 6 peut également être inscrit à l'aide d'un
laser fonctionnant en régime impulsionnel (comme à 193 nm), si le
coeur est par exemple en silice pure ou de type plastique.

Comportement en fonctionnement, contraintes qui influencent les performances, avantages procurés par cette fibre.

Dans une première phase, la lumière incidente se propage dans le
5 coeur 2 de la fibre 1 entourée de canaux 3.

Dans le cas où la fibre guide la lumière par réflexions totales, alors l'indice de réfraction du coeur 2 de la fibre est nécessairement supérieur à celui de l'air.

L'indice effectif du mode guidé présente alors une valeur initiale,
10 comprise entre la valeur de l'indice de réfraction de la gaine 5 et la valeur de l'indice de réfraction du coeur 2.

La longueur d'onde caractéristique du réseau de Bragg 6 étant définie par l'équation (1), ce réseau 6 extrait une fine bande spectrale centrée autour de la longueur d'onde caractéristique λ_B .

15 Dans une deuxième phase un produit à analyser est introduit dans au moins l'un des canaux 3, par exemple sous forme de liquide ou de gaz.

Cette introduction de produit peut être obtenue en immergeant une extrémité de la fibre, ou peut être effectuée au moyen d'un dispositif
20 d'injection et de retrait ou d'extraction du produit à l'intérieur des canaux.

L'indice de réfraction du produit, supérieur à l'indice de réfraction de l'air tend à augmenter sensiblement l'indice moyen de réfraction de la gaine 5.

25 La différence entre les indices de réfraction de la gaine 5 et du coeur 2 est donc réduite. La lumière se propageant dans la fibre 1 n'est plus exclusivement guidée par réflexion totale et le nombre de modes guidés diminue. L'indice de réfraction du mode guidé, toujours compris entre les indices de réfraction de la gaine 5 et du coeur 2, augmente.

30 Quand le liquide atteint le réseau de Bragg 6, la variation de l'indice de réfraction du mode guidé entraîne à son tour, conformément à l'équation (1), une variation de la longueur d'onde caractéristique du réseau 6. L'indice de réfraction du mode guidé augmentant, la longueur

d'onde caractéristique de Bragg se déplace vers les grandes longueurs d'ondes.

Ainsi, l'amplitude du décalage spectral est liée à la variation de l'indice de réfraction du mode guidé et donc à l'indice de réfraction du produit inséré.

Le suivi de l'indice de réfraction du produit introduit permet, in fine, de détecter ou de mesurer tout paramètre physico-chimique ayant une influence sur l'indice effectif du mode de propagation, comme par exemple l'indice de réfraction, la concentration, la densité etc.

La fibre selon le mode de réalisation présenté permet d'améliorer considérablement la sensibilité de la détection de ce paramètre physico-chimique en offrant un profil de fibre particulièrement optimisé.

Cette sensibilité améliorée est obtenue grâce à un profil de fibre permettant d'augmenter l'interaction entre le produit inséré dans les canaux 3 et le mode guidé.

La pénétration du champ électromagnétique dans la gaine 5 et les canaux 3 dépend étroitement de la longueur d'onde. Aux courtes longueurs d'onde, la lumière reste confinée dans le coeur 2 de la fibre 1 et pénètre peu dans les canaux 3 de la fibre, alors qu'aux longueurs d'ondes plus grandes, la lumière s'étend plus profondément dans les canaux 3.

Il convient donc de réduire au maximum le diamètre du coeur 2, et de rapprocher au maximum du coeur 2 le produit présent dans les canaux 3 afin d'accroître le recouvrement entre le champ évanescent et le milieu à analyser.

Dimensions et dispositions des canaux.

Ainsi, le profil est déterminé de façon à obtenir des canaux 3 de grande taille et qui soient rapprochés au plus près du coeur 2. Le recouvrement entre le champ évanescent et le produit à analyser est alors étendu, et l'interaction entre le mode fondamental et le produit inséré est accrue.

L'augmentation de la taille des canaux 3 permet d'introduire aisément le produit à analyser et d'obtenir une gaine 5 dont l'indice moyen de réfraction est fortement influencé par l'indice de réfraction du produit emplissant les canaux 3. Ainsi, afin d'assurer la plus grande interaction possible entre le champ électromagnétique de l'onde guidée et le milieu à analyser, l'idéal serait de disposer d'une fibre microstructurée constituée d'un anneau d'air entourant le coeur 2. Une telle fibre 1 est représentée en figure 2a.

La présence de ponts radiaux 7 s'avère cependant indispensable à la tenue physique de la fibre 1. La fibre 1 selon ce mode de réalisation présente donc un rapport de l'aire de silice constituant la gaine 5 sur l'aire des canaux 3 aussi faible que possible, l'épaisseur des ponts radiaux 7 étant réduite au minimum techniquement réalisable afin de n'assurer qu'une fonction de maintien physique du coeur 2.

Ainsi l'épaisseur des ponts 7 de silice, selon une section radiale de la fibre, est typiquement comprise entre 0,01 μm et 10 μm .

La présence de canaux 3 permet également d'amener le produit jusqu'au réseau de Bragg 6, et ne nécessite pas de plonger le réseau 6 dans le produit à analyser. Cette particularité procure de nombreux avantages en terme de simplicité et de flexibilité d'utilisation.

Diamètre du cœur.

Le diamètre du cœur doit également être réduit au maximum afin d'accroître le recouvrement entre le champ évanescent et le milieu à analyser et de manière à ce que la fibre soit monomode ou faiblement multimode.

Cependant la détermination du diamètre du coeur 2 résulte d'un compromis entre le confinement du champ électromagnétique et l'intensité du signal optique.

En effet, la réduction du diamètre du coeur 2 est limitée car elle induit une perte du signal optique. Il convient donc de maintenir une dimension du diamètre du coeur 2 suffisante pour assurer le guidage de la lumière.

Un diamètre de coeur 2 trop réduit a également pour conséquence de rendre complexe l'inscription du réseau de Bragg 6.

En choisissant un profil de fibre 1 dont le diamètre du coeur 2 est de l'ordre de la longueur d'onde d'étude, on obtient un champ électromagnétique qui ne demeure pas confiné dans le coeur 2, mais qui s'étend au contraire dans les canaux 3, sans pour autant induire les inconvénients liés à un diamètre de cœur trop petit.

Un diamètre du coeur 2 est considéré, au sens de la présente demande, comme étant de l'ordre de la longueur d'onde d'étude lorsqu'il permet de respecter de façon optimale le compromis entre la qualité de guidage et le confinement du champ électromagnétique.

En pratique, le diamètre du cœur 2 est déterminé en fixant un niveau de confinement souhaité, puis en exécutant un logiciel de modélisation, par éléments finis typiquement, avec un diamètre de cœur donné. En fonction des résultats obtenus par modélisation portant sur la sensibilité de la longueur d'onde de résonance du réseau de Bragg 6 à l'indice de réfraction du produit, on fait évoluer le diamètre du cœur 2 de la fibre 1.

On procède donc selon une approche itérative, à partir d'une géométrie donnée de fibre que l'on adapte en fonction des résultats des modélisations successives.

Ainsi, et de manière générale, le profil de la fibre 1 présente un coeur 2 dont le diamètre est d'autant plus petit que la longueur d'onde d'étude est courte.

La fibre 1 dont le profil est ainsi optimisé en fonction de la longueur d'onde d'étude permet d'assurer une forte interaction entre le champ évanescent et le produit à analyser, et présente par conséquent une grande sensibilité de la longueur d'onde de résonance du réseau de Bragg 6 à l'indice de réfraction de ce produit.

De plus cette sensibilité élevée est obtenue sur une grande plage d'indices de réfraction, et ceci même pour des liquides d'indice de réfraction proche de celui de l'eau.

Les dimensions d'une telle fibre 1 sont indiquées, à titre d'exemple non limitatif, dans la suite de cette description.

Autres paramètres.

5 Le profil de la fibre 1 doit être adapté à la longueur d'onde étudiée comme indiqué précédemment. En outre l'application qui est faite de la fibre 1 doit également être prise en compte dans la conception du profil de cette fibre. Les contraintes imposées par les utilisations particulières de la fibre 1 varient d'une application à l'autre, et influencent par
10 conséquent la conception du profil de cette fibre. Par exemple, le nombre et l'épaisseur des ponts radiaux 7 peuvent être adaptés en fonction des contraintes mécaniques imposées par une utilisation particulière de la fibre 1.

La présence de ponts radiaux 7 en plus de la gaine 5 périphérique
15 entourant le coeur 2 assure un bon maintien de l'ensemble de la structure de la fibre, offrant ainsi à celle-ci une grande robustesse et de nombreuses possibilités d'utilisation.

La sensibilité de la détection de la fibre proposée étant indépendante du diamètre total de la fibre, celui-ci peut être augmenté
20 pour améliorer les caractéristiques mécaniques de la fibre. Cette augmentation du diamètre total de la fibre, effectuée en conservant un profil en conformité avec l'enseignement précédemment indiqué ne diminue pas la sensibilité de la détection de l'indice de réfraction du produit.

25 Pour adapter aux contraintes d'utilisation les caractéristiques opto-géométriques de la fibre telles que le nombre de ponts radiaux 7, l'épaisseur de ces ponts 7, la dimension des ponts 7, on procède selon la méthode itérative mentionnée précédemment à propos de la détermination du diamètre du coeur 2 de la fibre 1.

30 Cette même méthode itérative permet également de prendre en compte les contraintes de fibrage dans la conception du profil de la fibre.

Ainsi, de nombreux profils de fibre peuvent être envisagés en respectant l'enseignement présenté précédemment. Plusieurs de ces profils sont représentés aux figures 2a à 2d.

Ainsi, la figure 2a présente une fibre comportant un cœur entouré
5 d'un anneau d'air ou d'un matériau d'indice inférieur à celui du cœur 2.

La fibre représentée en figure 2b comprend un seul pont radial, la fibre de la figure 2c présente 2 ponts radiaux disposés sur un même diamètre, et la fibre de la figure 2d comporte 5 ponts radiaux.

La fibre 1 selon l'un des modes de réalisation mentionnés, associée
10 à un dispositif d'analyse du signal provenant du réseau de Bragg 6, permet donc de quantifier ou détecter la variation de tout paramètre physico-chimique ayant une influence sur l'indice effectif du mode de propagation comme par exemple l'indice de réfraction, la densité, la concentration, la luminescence, la fluorescence, la phosphorescence, le
15 temps de décroissance de la fluorescence etc.

Les domaines d'application d'une telle fibre 1 sont donc particulièrement variés et incluent notamment l'analyse de produits dans l'agroalimentaire, la microbiologie, l'environnement, la biologie, biochimie, les mesures en solution aqueuse, les nouvelles techniques
20 d'analyse biologique, l'immuno analyse, etc.

Exemple d'un profil de fibre à réseau de Bragg.

A titre d'exemple non limitatif, un mode de réalisation va maintenant être exposé en référence aux figures 1a et 1b.

25 Selon ce mode de réalisation, la fibre 1 comporte un cœur 2 dopé au Germanium.

La fibre 1 comprend trois canaux 3 entourant le cœur 2. Les canaux 3 sont adjacents au cœur 2. Ces canaux 3 sont séparés les uns des autres par des ponts radiaux 7 très fins s'étendant depuis la
30 périphérie 4 de la gaine 5 en silice jusqu'au cœur 2 dopé au Germanium. Ainsi, chaque canal 3 est délimité radialement par la périphérie 4 de la gaine 5 et par le cœur 2, ainsi que tangentiellement par les ponts radiaux 7.

Les canaux présentent une section sensiblement identique selon une coupe radiale de la fibre.

Le profil de cette fibre 1 respecte les principes de conception de profils énoncés précédemment afin d'augmenter l'interaction entre le
5 champ électromagnétique et le milieu inséré dans les canaux 3.

Notamment, le profil de la fibre 1 est défini de manière à ce que le diamètre du cœur 2 soit de l'ordre de la longueur d'onde d'étude. Ainsi, pour une longueur d'onde d'étude de l'ordre de 1.5 μm , le diamètre du cœur est compris entre 3 μm et 5 μm . Pour des raisons de clarté, les
10 proportions du coeur 2 représenté sur les schémas des figures 1a et 1b ne respectent volontairement pas les proportions réelles.

L'aire de chacun des canaux 3 est de l'ordre de 1500 μm^2 .

L'épaisseur des ponts 7 de silice est définie de manière à ce que le rapport de l'aire de silice composant la gaine 5 sur l'aire des canaux 3
15 soit réduit au maximum tout en assurant un maintien physique de la fibre. Ainsi, l'épaisseur de ces ponts 7 peut être comprise entre 0,01 μm et 10 μm .

L'exo-diffusion de l'hydrogène est réduite selon la méthode proposée par Beugin et al. [V. Beugin, V. Pureur, L. Provino, L. Bigot, G.
20 Mélin, A. Fleureau, S. Lempereur, and L. Gasca, "Intérêt Du Dopage Phosphore Pour la Photoinscription de Réseaux de Bragg Dans Une Fibre MicroStructurée," Actes Conférence 24ème Journées Nationales d'Optique Guidée (Chambéry), pp 292 - 294 (2005)].

La fibre 1 est ensuite introduite dans le tube d'hydrogénation et est
25 suffisamment hydrogénée, par exemple pendant deux semaines à 180 bar et à 25 °C.

Dans le coeur 2 de la fibre 1 est photo-inscrit un réseau de Bragg 6 par exemple à pas courts, dont le pas est de l'ordre de 0,5 μm pour une longueur d'onde de travail de 1.5 μm . La photo-inscription du réseau de
30 Bragg 6 est effectuée avec un laser continu (par exemple à 244 nm).

L'inscription du réseau de Bragg 6 se fait à l'aide d'un banc d'inscription utilisé pour l'inscription de réseaux dans les fibres conventionnelles : soit un banc à miroir de Lloyd, soit un banc à masque

de phase, soit tout système optique permettant de créer la figure d'interférences requise. Les réseaux 6 inscrits dans cette fibre 1 microstructurée présentent typiquement une réflectivité de l'ordre de 70%, mais peuvent tout aussi bien atteindre tout coefficient de réflexion
5 choisi lors de la photo-inscription.

Le profil de la fibre induit une biréfringence qui lève la dégénérescence des modes. Un dédoublement du pic de Bragg associé au mode fondamental correspondant aux états de polarisation de la lumière apparaît. L'ajout d'un contrôleur de polarisation entre la source
10 et la fibre microstructurée, favorise l'une des polarisations et donc l'une des raies de résonance. En modifiant l'état de polarisation de la lumière de la source, en se plaçant dans le cas où l'une des polarisations est favorisée, l'une seulement des résonances est observée sur la réponse spectrale en transmission et réflexion du réseau de Bragg. Le contrôleur
15 de polarisation ainsi disposé permet de suivre l'évolution de cette résonance en fonction de l'indice de réfraction du produit inséré dans les canaux de la fibre.

Ce dispositif permet de suivre l'évolution de cette résonance en fonction de l'indice de réfraction du milieu inséré dans les canaux 3 de la
20 fibre.

Le réseau de Bragg 6 est disposé dans la fibre 1 de manière à ne laisser environ qu'1 cm de fibre microstructurée entre ce réseau 6 et l'extrémité aval 21 de cette fibre 1 (l'extrémité aval 21 étant déterminée en référence au sens de propagation de la lumière incidente). Par
25 exemple, en clivant l'extrémité de la fibre, on rend débouchants tous les canaux, ce qui permet d'introduire un liquide par capillarité dans chacun de ces canaux simultanément. Un clivage consiste à créer une petite amorce de rupture en périphérie de la fibre, puis à la courber jusqu'à ce qu'elle casse. La cassure se produit à l'endroit de l'amorce et on obtient
30 une coupe franche et perpendiculaire à l'axe de la fibre.

De plus, le fait que le réseau de Bragg soit situé près de l'extrémité réduit la longueur de fibre qu'il est nécessaire de remplir avant d'atteindre le réseau. L'association d'une fibre microstructurée à un

réseau de Bragg 6 à pas court permet de recueillir la lumière réfléchie par le réseau de Bragg 6. Ainsi l'extrémité aval 21 de la fibre 1 est plongée dans un produit dont un paramètre physique est étudié.

La fibre 1 décrite dans ce mode de réalisation présente une grande
5 sensibilité de transduction lors des mesures, et ainsi permet d'obtenir des résultats particulièrement satisfaisants.

En effet, le déplacement spectral de la résonance de Bragg est de plusieurs nm lorsque l'on insère dans les trois canaux 3 de la fibre 1 un liquide d'indice de réfraction de l'ordre de 1,3 (indice de réfraction
10 proche de celui de l'eau). A titre de comparaison, lorsque l'on insère un liquide similaire, le déplacement spectral n'est que de 0,1 nm pour une fibre présentant six canaux et qui n'a pas été optimisée selon les principes précédemment mentionnés (M. C. Phan Huy *et al.*, "*Fibre Bragg Grating photowriting in microstructured optical fibres for refractive index measurement*", Meas. Sci. Technol. 17, pp 992-997
15 (2006).

La sensibilité de cette fibre 1 représente ainsi une amélioration de plus d'un ordre de grandeur et de plus de deux ordres de grandeurs par rapport aux sensibilités obtenues avec une fibre à 18 trous et une fibre à
20 6 trous respectivement.

En effet, la sensibilité obtenue avec une fibre 1 présentant un profil selon cet exemple est de l'ordre de 10^{-5} u.i.r./pm (unité d'indice de réfraction par picomètre) alors que cette sensibilité est de l'ordre de 10^{-4} u.i.r./pm et 10^{-3} u.i.r./pm pour une fibre à 18 trous et une fibre à 6
25 trous respectivement.

Le profil de la fibre 1, réalisée selon cet exemple de réalisation permet donc une remarquable sensibilité de la longueur d'onde de résonance du réseau de Bragg 6 à la valeur de l'indice de réfraction du produit présent dans les canaux 3 de la fibre.

30

Exemples de réalisation de capteurs à fibre microstructurée et à réseau de Bragg.

On a représenté sur les figures 3a et 3b un capteur 100 comprenant une fibre 1 du type de celles décrites précédemment.

Le capteur 100 peut être décliné selon plusieurs modes de réalisation. Ces différents modes de réalisation peuvent être classés en deux catégories, selon que le réseau de Bragg 6 inscrit dans le coeur 2
5 de la fibre 1 fonctionne en réflexion ou en transmission.

Les capteurs 100 fonctionnant en réflexion comportent une source 105 de lumière, un système de détection 101, un coupleur 102, des fibres conventionnelles formant des bras de raccordement 110, 112,
10 113, une fibre 1 microstructurée à réseau de Bragg, un système d'alignement 103 d'une extrémité 111 du bras de raccordement 113 à la fibre microstructurée 1. Deux exemples de ces capteurs 100 sont représentés en figure 3a et 3b.

En référence à la figure 3a, la source 105 émet une lumière qui
15 parvient à un coupleur 102 via un premier bras 110. La moitié du faisceau est guidée jusqu'à la fibre microstructurée à réseau de Bragg par un second bras 113 du coupleur.

Un troisième bras 112 du coupleur 102 est relié au système de détection 101 qui permet d'acquérir les données et de suivre en temps
20 réel le décalage spectral de la longueur d'onde de Bragg du mode guidé avec la progression du liquide dans les canaux 3 de la fibre.

La fibre 1 microstructurée est reliée à l'extrémité 111 du bras de raccordement 113 de la fibre optique provenant du coupleur 102 par un système 103 permettant d'aligner ces deux fibres et d'optimiser le
25 niveau du signal en sortie. Une autre possibilité est de souder ces deux fibres entre elles.

L'extrémité libre de la fibre 1 microstructurée est quant à elle plongée dans le produit à analyser.

Le réseau de Bragg 6 inscrit dans le coeur 2 de la fibre 1 est à pas
30 court. Ce type particulier de réseau de Bragg 6 présente comme avantage d'offrir la possibilité de fonctionner en réflexion. Ainsi le réseau 6 peut être disposé en extrémité de fibre. Cette disposition du réseau 6

offre des avantages considérables se traduisant notamment par une grande souplesse d'utilisation.

Ainsi, un tel capteur 100 présente une configuration simple, ce qui est particulièrement avantageux pour certaines applications.

5 Un autre avantage réside également dans la possibilité de multiplexer plusieurs capteurs avec un nombre de réseaux ad hoc, et ce de manière plus dense qu'avec des réseaux à traits inclinés. En effet les réseaux à traits droits présentent une largeur de spectre (0,2 nm typiquement) environ cent fois inférieure à la largeur de spectre des
10 réseaux à traits inclinés. Ainsi, sur une largeur donnée de spectre d'analyse il est possible de multiplexer un nombre de réseaux à traits droits bien supérieur au nombre de réseaux à traits inclinés.

Le capteur 100 représenté en figure 3b fonctionne selon le même principe général que le capteur 100 de la figure 3a. En outre, ce capteur
15 100 comprend, en extrémité de la fibre 1 microstructurée, un système 300 permettant l'insertion et l'extraction dans les canaux 3 du produit à analyser.

Les capteurs 100 de la seconde catégorie fonctionnent en transmission.

20 Dans le capteur 100 représenté en figure 4a, la source 105 est reliée à une extrémité d'une fibre 1 selon l'un des modes de réalisation indiqués précédemment. L'autre extrémité de cette fibre 1 est reliée au système de détection 101.

Des moyens 301, 302 permettent la circulation du produit à
25 analyser dans les canaux 3 de la fibre. La circulation du produit à analyser dans les canaux 3 peut être effectuée dans les deux sens.

Dans les capteurs 100 représentés en figures 4b et 4c, la source 105 optique est directement reliée à une extrémité de la fibre 1. A l'autre extrémité de la fibre 1 est intégré un système 300 permettant
30 l'insertion et/ou l'extraction du produit par l'extrémité d'un ou de plusieurs canaux (3) de fibre 1, et de récupérer et d'analyser le signal optique en sortie du cœur (2) de la fibre 1.

Avantages

Comme on l'aura compris, les fibres microstructurées à réseau de Bragg qui viennent d'être décrites présentent un profil de fibre optimisé permettant une importante amélioration de la mesure de l'indice de réfraction d'un milieu à analyser. Le profil optimisé de ces fibres accroît l'interaction entre le mode guidé et le milieu inséré dans les canaux et permet par conséquent d'offrir une grande sensibilité de la longueur d'onde de la résonance de Bragg à l'indice de réfraction du milieu à analyser.

10 Il en résulte en outre une grande sensibilité aux modifications des paramètres optiques et notamment à l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde de résonance sur une large plage d'indices de réfraction.

On notera que la sensibilité de la détection de ce type de fibre n'étant pas dépendante du diamètre total de fibre, celui-ci peut être augmenté pour améliorer certaines caractéristiques de la fibre, notamment mécaniques, sans pour autant diminuer les performances de détection.

La présence de canaux ne nécessite pas de plonger le réseau dans le produit à analyser ce qui procure de nombreux avantages en terme de flexibilité d'utilisation.

De manière générale, les fibres qui viennent d'être décrites permettent la détection et la mesure de tout paramètre physico-chimique ayant une influence sur l'indice effectif du mode de propagation, comme par exemple l'indice de réfraction, le coefficient d'absorption, la densité, la concentration, la luminescence, la fluorescence, la phosphorescence, le temps de décroissance de la fluorescence etc.

L'agencement du capteur, qui permet de fonctionner en réflexion, offre également souplesse et simplicité de mise en œuvre, ce qui contribue également à accroître l'étendue des domaines d'application envisageables.

Bien entendu, des multiplexages de plusieurs points de mesure sont possibles sur une même fibre.

REVENDEICATIONS

- 5 1. Capteur (100) à fibre à réseau de Bragg comportant une source (105) et un système de détection (101) fonctionnant à une longueur d'onde d'étude donnée, ainsi qu'une fibre (1) à réseau de Bragg (6) reliée à ladite source et au dit système, ladite fibre étant une fibre optique microstructurée dont la gaine (5) comprend des canaux (3)
10 adjacents au cœur (2) et aptes à recevoir un produit à analyser, caractérisé en ce que le diamètre du cœur (2) est de l'ordre de la longueur d'onde d'étude.
2. Capteur (100) selon la revendication précédente, caractérisé en
15 ce que le diamètre du cœur (2) est compris entre 0,5 μm et 20 μm .
3. Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que pour une longueur d'onde d'étude de l'ordre de 1.55 μm , le diamètre du cœur (2) est compris entre 1 μm et 10 μm .
20
4. Capteur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'au moins un réseau de Bragg est inscrit dans le cœur (2) de la fibre (1).
- 25 5. Capteur (100) selon la revendication 3, caractérisé en ce que le réseau de Bragg (6) est à pas inférieur à 10 μm .
6. Capteur (100) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les canaux (3) sont séparés les uns
30 des autres par des ponts radiaux (7) dont l'épaisseur est comprise entre 0,01 μm et 10 μm .

7. Capteur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la fibre (1) comporte un nombre de canaux (3) adjacents au cœur (2) compris entre 2 et 5.
- 5 8. Capteur selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la fibre (1) comporte exactement trois canaux (3) adjacents au cœur (2).
9. Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la fibre (1) est réalisée en silice ou en plastique, le plastique étant notamment fabriqué à partir de PMMA, de polystyrène, d'un polymère fluoré ou de CYTOP.
- 10 10. Capteur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le cœur (2) de la fibre (1) est réalisé en silice pure, ou dopée, ou en matériau plastique, le plastique étant notamment fabriqué à partir de PMMA, de polystyrène, d'un polymère fluoré ou de CYTOP.
- 15 11. Capteur (100) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte également un système (300) d'introduction et/ou d'extraction du produit à analyser dans au moins l'un des canaux (3).
- 20 12. Fibre microstructurée (1) à réseau de Bragg d'un capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes.
- 25 13. Procédé de détermination de la structure d'une fibre microstructurée selon la revendication 12, caractérisé en ce que le diamètre du cœur (2) de la fibre (1) est déterminé en se fixant un niveau de confinement donné et un diamètre donné de cœur (2), en ce qu'on détermine par modélisation la sensibilité de la fibre (1) comportant un cœur du diamètre donné à l'indice de réfraction d'un produit à analyser, et en ce qu'on fait évoluer ce diamètre donné du
- 30

cœur (2) de manière itérative en fonction des sensibilités déterminées par les modélisations.

14. Utilisation du capteur (100) selon l'une quelconque des
5 revendications 1 à 11 pour la mesure d'un paramètre physico-chimique ayant une influence sur l'indice effectif du mode de propagation comme par exemple l'indice de réfraction, le coefficient d'absorption, la densité, la concentration, la luminescence, la fluorescence, la phosphorescence, le temps de décroissance de la fluorescence.

1/3

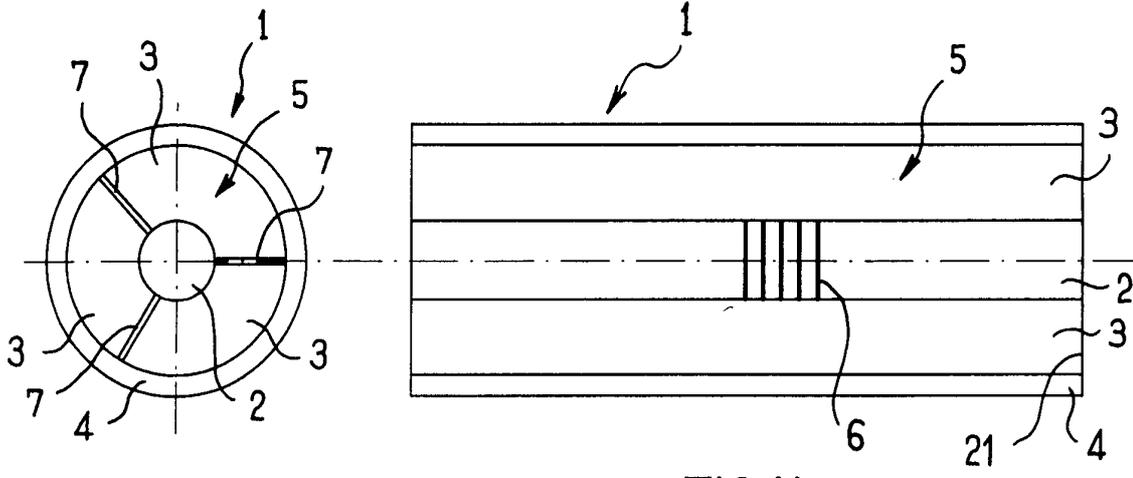


FIG.1a

FIG.1b

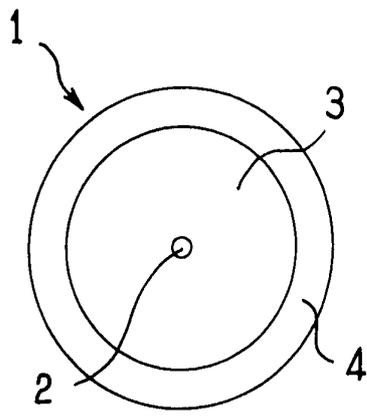


FIG.2a

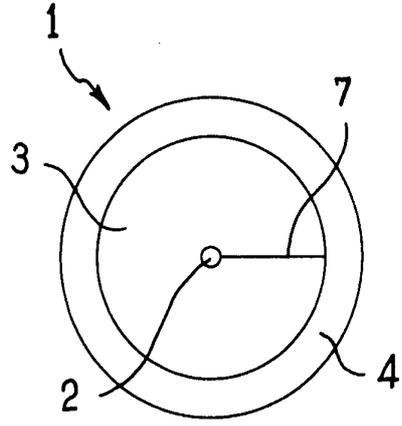


FIG.2b

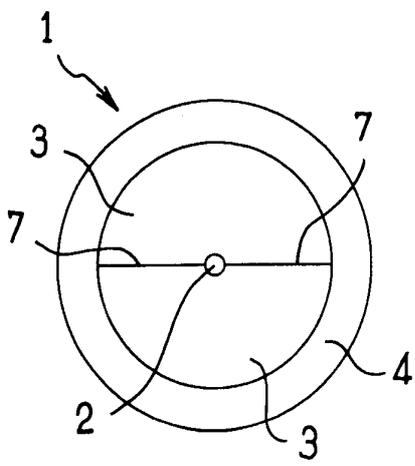


FIG.2c

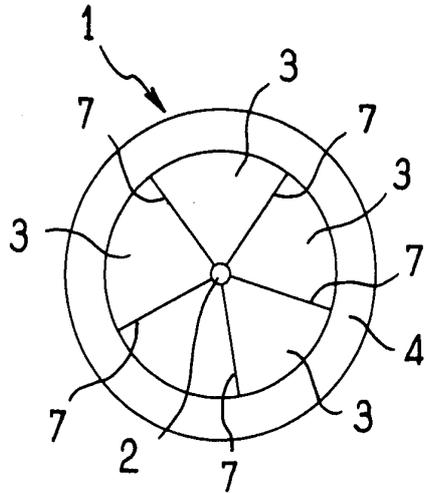
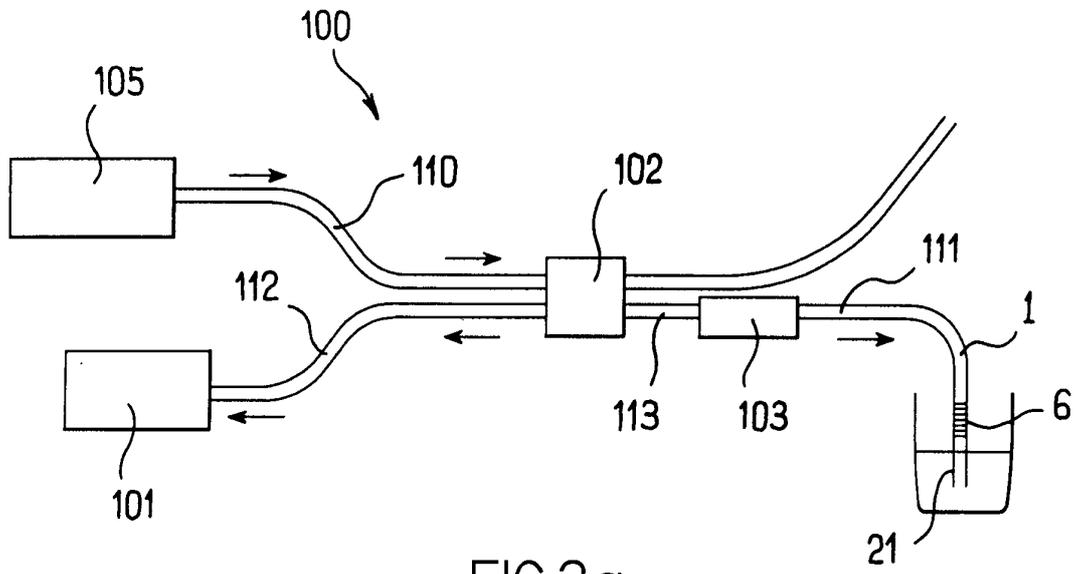
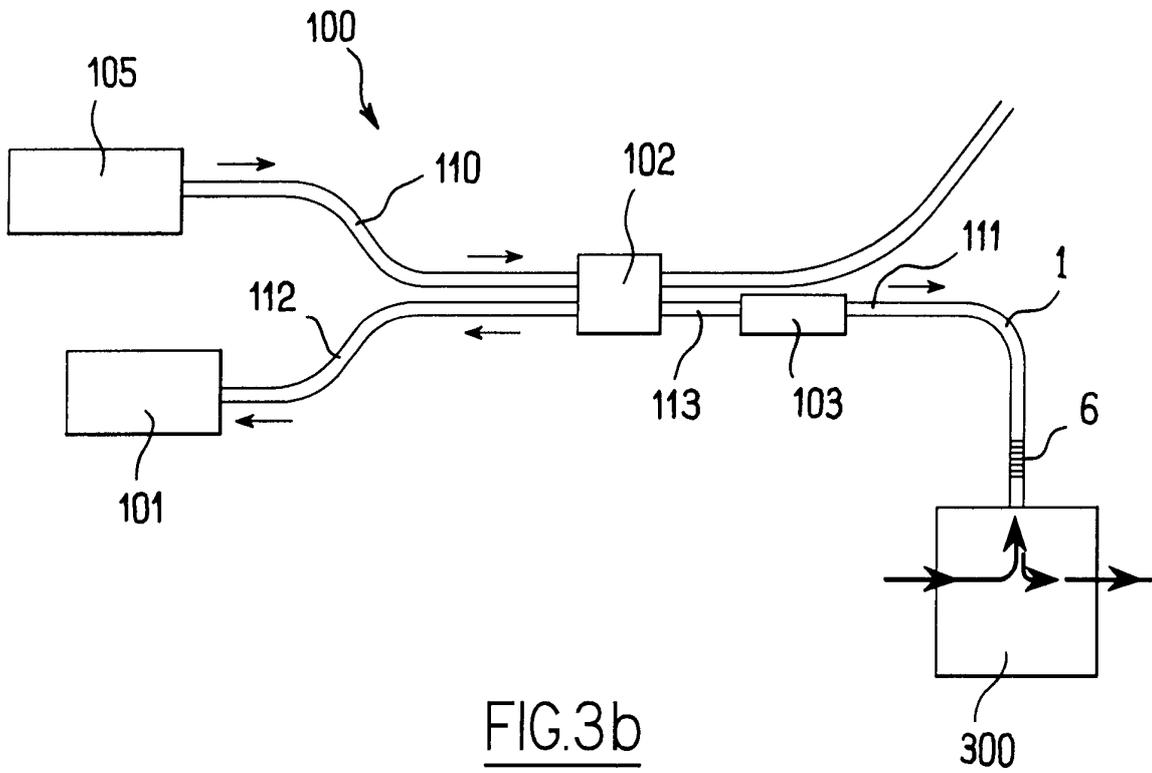


FIG.2d

2 / 3

FIG.3aFIG.3b

3 / 3

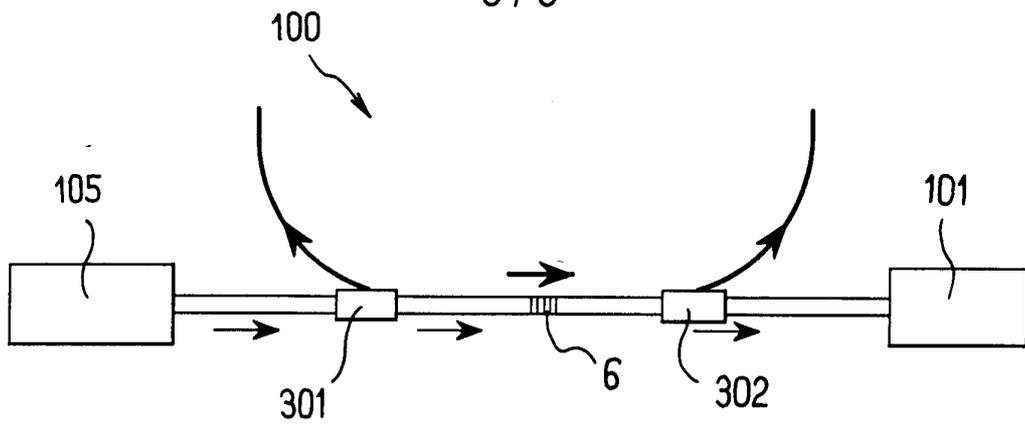


FIG. 4a

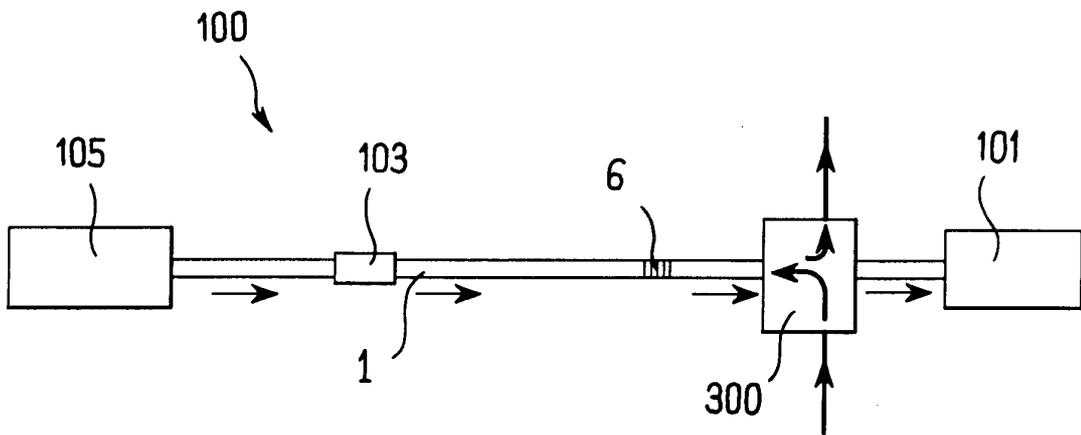


FIG. 4b

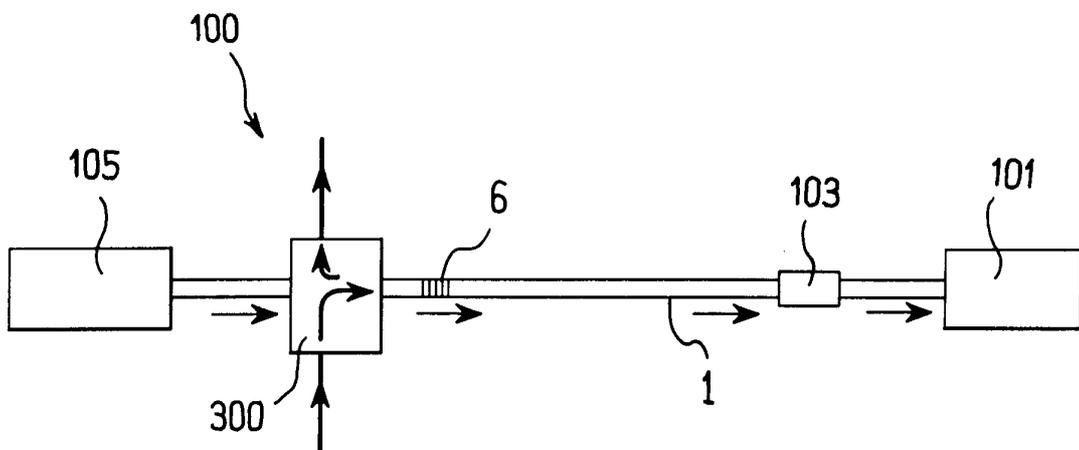


FIG. 4c



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement
national

FA 682955
FR 0605239

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,D	<p>PHAN HUY M C ET AL: "Fibre Bragg grating photowriting in microstructured optical fibres for refractive index measurement" MEAS. SCI. TECHNOL., vol. 17, 6 avril 2006 (2006-04-06), pages 992-997, XP002415534 * le document en entier *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-14	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G01N
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		18 janvier 2007	Hoogen, Ricarda
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		<p>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</p>	
<p>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</p>			