

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

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

3 035 518

②1 N° d'enregistrement national : **15 53710**

⑤1 Int Cl⁸ : **G 02 B 6/036 (2016.01), H 01 S 3/07, 3/067**

①2

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 24.04.15.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 28.10.16 Bulletin 16/43.

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) : UNIVERSITE DE LIMOGES Etablissement public — FR et CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public — FR.

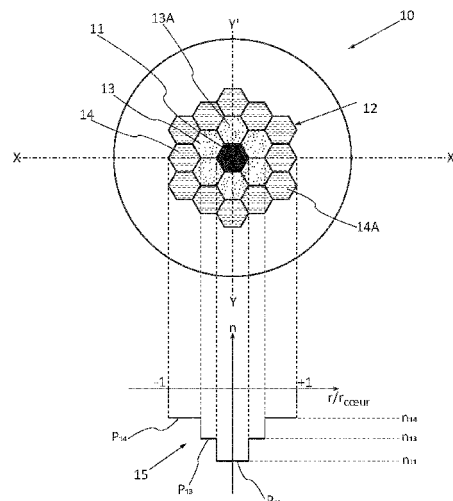
⑦2 Inventeur(s) : ROY PHILIPPE VINCENT, DAULIAT ROMAIN et JAMIER RAPHAEL EMMANUEL.

⑦3 Titulaire(s) : UNIVERSITE DE LIMOGES Etablissement public, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public.

⑦4 Mandataire(s) : ALLICI.

⑤4 FIBRE OPTIQUE MONOMODE CONCUE POUR COMPENSER UNE VARIATION INDICIELLE LIEE AUX EFFETS THERMIQUES ET LASER UTILISANT UNE TELLE FIBRE OPTIQUE COMME MILIEU AMPLIFICATEUR.

⑤7 L'objet de l'invention est une fibre optique monomode (10) comprenant, depuis son centre vers sa périphérie :
- un cœur monomode (12);
- au moins une gaine entourant ledit cœur, caractérisée en ce qu'elle comprend au moins une région (12) configurée pour présenter un profil d'indice (15) comprenant au moins un palier d'indice négatif lorsque ladite fibre optique (10) est dans un état non actif et un profil d'indice positif sensiblement constant lorsque ladite fibre optique est dans un état actif, les écarts indiciels entre les deux états de la fibre optique correspondant aux variations indicielles induites par un effet thermique apparaissant dans ladite au moins une région de la fibre optique lorsque la fibre optique est dans l'état actif.



FR 3 035 518 - A1



**FIBRE OPTIQUE MONOMODE CONÇUE POUR COMPENSER UNE VARIATION INDICIELLE LIÉE
AUX EFFETS THERMIQUES ET LASER UTILISANT UNE TELLE FIBRE OPTIQUE COMME MILIEU
AMPLIFICATEUR**

La présente invention a pour objet une fibre optique monomode conçue pour compenser une variation indicielle liée à des effets thermiques. Une telle fibre optique est particulièrement adaptée, mais non exclusive pour être utilisée comme un milieu de transport et d'amplification dans un laser à fibre optique de forte puissance.

5 Le terme laser à fibre optique recouvre toute application dans laquelle la capacité de la fibre à émettre de la lumière par désexcitation électronique d'éléments ayant préalablement été placés dans un état électronique excité, est mis en œuvre, cela concerne donc aussi bien les lasers que, plus généralement, les amplificateurs optiques. La fibre optique de l'invention peut être utilisée dans des lasers à émission continue ou
10 impulsionnelle.

Le succès des lasers à fibres optiques s'explique par leurs nombreuses propriétés : ils combinent une grande efficacité optique, une bonne capacité à dissiper la chaleur, un potentiel d'intégration élevé et une excellente qualité de faisceau.

De manière connue, dans un laser à fibre optique, la fibre optique est utilisée comme
15 milieu actif lorsqu'elle est dopée d'ions de terres rares (erbium, ytterbium, thulium, holmium, néodyme...). Dans ce cas, la cavité résonante est constituée de la fibre dopée placée entre deux miroirs ou rebouclée sur elle-même.

Pour les lasers de puissance, selon une première forme de réalisation connue, la structure de la fibre est composée d'un cœur monomode (par exemple en silice dopée par
20 des ions de terre rare) et d'une gaine de pompage multimode (par exemple en silice dopée ou non), de plus grande dimension que le cœur, ce qui permet la propagation des différents modes d'une pompe multimode. Selon cette configuration, l'onde de pompe est guidée dans la gaine multimode de la fibre tandis que l'onde laser est générée puis guidée uniquement dans le cœur monomode. Le faisceau laser ainsi généré est un faisceau monomode qui
25 possède toutes les propriétés de cohérence spatiale et temporelle souhaitées avec une puissance significative due au pompage multimode.

On connaît également des fibres optiques monomodes à triple gaine, qui permettent d'améliorer l'efficacité d'amplification tout en maintenant le caractère monomode du cœur. Le brevet FR2 974 637 décrit ainsi une fibre optique comprenant du centre vers sa périphérie :

- 5 - un cœur monomode dopé au moins partiellement par une terre rare ;
- une gaine intermédiaire, optiquement inactive dont l'indice de réfraction effectif diffère de l'indice de réfraction du cœur par au plus 10^{-3} ;
- une gaine de pompage multimode, et
- une gaine externe.

10 En contrôlant le profil de l'indice de réfraction dans la gaine intermédiaire, il est possible d'assurer une faible différence d'indice de réfraction entre le cœur et la gaine intermédiaire tout en disposant d'un cœur dont le diamètre et le taux de dopage sont élevés. La fibre ainsi formée offre donc à la fois une amplification améliorée tout en conservant le caractère monomode.

15 On entend par faisceau monomode, un faisceau dont la divergence est proche du minimum imposé par la diffraction du profil d'intensité dudit faisceau.

 Toutefois dans toutes ces structures de fibre optique, l'accès à de fortes puissances est limité du fait de son très faible volume actif et du confinement élevé de l'énergie lumineuse dans le cœur qui possède un diamètre compris entre quelques μm et quelques
20 dizaines de μm . Les fortes densités de puissance favorisent l'apparition d'effets non linéaires qui altèrent la qualité du faisceau laser émis.

 Pour contourner les problèmes liés aux effets non linéaires, la solution la plus pertinente proposée ces dernières années a consisté à développer des fibres micro-structurées qui permettent d'augmenter l'aire effective du cœur de la fibre tout en
25 préservant le caractère monomode du faisceau de sortie.

 Selon une forme de réalisation, les fibres microstructurées se présentent sous la forme d'un agencement périodique ou aperiodique avec des inclusions de bas indice ou haut indice entourant un défaut qui sert de cœur. Ainsi on peut moduler l'indice effectif de la gaine en ajustant le pas du réseau et le diamètre des inclusions. L'onde est guidée
30 uniquement dans le cœur par un mécanisme de réflexion totale modifiée.

 Afin de réduire les effets non linéaires, on doit donc augmenter la surface de mode tout en demeurant monomode. Pour ce faire, il faut diminuer une différence d'indice $\Delta n =$

$n_{\text{cœur}} - n_{\text{gaine}}$ entre le cœur et la gaine pour assurer le caractère monomodal. La maîtrise de cette différence d'indice de l'ordre 1×10^{-4} a ainsi été rendue possible en modulant l'indice effectif de la gaine micro-structurée.

Toutefois, l'augmentation drastique des dimensions du cœur ne peut se faire qu'en assurant également un contrôle le plus précis possible de la différence d'indice $\Delta n = n_{\text{cœur}} - n_{\text{gaine}}$ entre l'indice du cœur de la fibre et l'indice de la gaine intermédiaire. Ainsi dans les fibres à large cœur ou LMA (Large Mode Area), le paramètre Δn devient un paramètre primordial pour assurer d'une part le phénomène de guidage de l'onde, et d'autre part le caractère monomodal du faisceau laser émis à la sortie de la fibre optique.

Or le défaut quantique, découlant de l'effet laser, entraîne un échauffement du matériau qui peut, à très forte puissance, provoquer une modification de l'indice de réfraction des matériaux et altérer les propriétés de guidage de la fibre optique. En effet l'indice de réfraction augmente avec la température. Ainsi, à forte puissance, le phénomène d'amplification peut induire une élévation indicielle dans la section transverse de la fibre optique de l'ordre de 10^{-5} à quelques 10^{-4} . Cette valeur peut paraître faible si l'on considère la propagation de l'onde dans une fibre standard présentant un saut d'indice (cœur – gaine) de l'ordre de quelques 1.10^{-3} . Cependant, dans les fibres microstructurées à larges aires modales monomodes, la différence d'indice entre le cœur et la gaine est inférieure à 1.10^{-4} . Dans ces structures, les variations d'indice induites par l'échauffement de la matière peuvent alors affecter la qualité spatiale du faisceau émis, telle qu'une diminution du diamètre de champ de mode et des instabilités modales.

Sur la figure 1A, on a représenté de manière schématique un profil d'indice d'une fibre optique standard à saut d'indice ne subissant aucune perturbation extérieure. Une telle fibre optique est dite « fibre optique froide » correspondant à un état non actif de la fibre optique. Pour des fibres optiques, le profil d'indice correspond à la distribution de l'indice de réfraction de la fibre en fonction du rayon de la fibre optique. On représente de façon classique sur les abscisses la variable r (issu d'un repère r, θ) normalisée par rapport au rayon du cœur, et sur les ordonnées la différence entre l'indice de réfraction du cœur et l'indice de réfraction de la gaine de la fibre. L'abscisse $r = 0$ représente le centre de la fibre optique. Du centre jusqu'à $r/r_{\text{cœur}} = \pm 1$ s'étend le cœur de la fibre d'indice $n_{\text{cœur}}$. Δn représente la différence d'indice entre l'indice de réfraction du cœur de la fibre et celui de la

gaine optique. Selon la figure 1A, l'indice du cœur de la fibre optique présente une valeur sensiblement constante sous la forme d'un échelon.

5 Selon une forme de réalisation, il est possible de ne pas doper activement toute la surface du cœur de la fibre. Le cœur est alors constitué d'une zone centrale dopée activement entourée d'une zone annulaire périphérique ayant le même indice de réfraction que la zone centrale mais dopée passivement ou non dopée. Il est possible d'envisager d'autres formes de distribution de dopants dans le cœur.

Sur la figure 1B, on a représenté schématiquement en 6 le profil d'un gradient de température apparaissant dans le cœur d'une fibre optique lorsqu'elle est dans un état actif.

10 On entend par état actif un état dans laquelle la fibre optique est en train d'être utilisée pour amplifier une onde lumineuse. On peut voir que le maximum de la température est situé au centre du cœur de la fibre optique. La température décroît quadratiquement lorsque l'on s'éloigne du centre du cœur.

Sur la figure 1C, on a représenté schématiquement en 7 un profil d'indice d'une fibre optique dans un état actif. Il ne se présente plus sous la forme d'un palier. En effet la transition indicielle entre la gaine et le cœur n'est plus abrupte mais présente un gradient. Cette modification du profil d'indice dans le cœur et la gaine est induite par des effets thermiques lorsque la densité de puissance optique dans le cœur est très élevée. Typiquement, un gradient d'indice de 10^{-4} peut être observé sur un cœur de $50\mu\text{m}$ de diamètre pour l'absorption de 50W/m de puissance de pompe.

20

Sur la figure 2A, on a représenté schématiquement le profil d'indice d'une fibre optique dans un état non actif et les indices effectifs n_e^{01} , n_e^{11} des deux premiers modes guidés dans le cœur. Seul l'indice effectif n_e^{01} du premier mode est compris entre l'indice du cœur $n_{\text{cœur}}$ et l'indice de la gaine n_{gaine} . De ce fait, seul le premier mode est autorisé à se propager dans le cœur de la fibre. L'indice effectif n_e^{11} du deuxième mode n'étant pas compris entre l'indice du cœur et celui de la gaine, le deuxième mode n'est donc pas autorisé à se propager dans le cœur. L'indice effectif peut être assimilé à l'indice de réfraction vu par la lumière se propageant selon un mode dans la structure du cœur.

25

Sur la figure 2A, on a représenté en 8 la distribution d'intensité en champ proche du mode fondamental en sortie de la fibre optique. On observe que le faisceau émis en sortie d'une telle fibre optique est monomode.

30

Sur la figure 2B, on a représenté le profil d'indice d'une fibre optique dans un état actif. L'indice effectif du deuxième mode n_e^{11} est dorénavant compris entre l'indice du cœur et l'indice de la gaine et est ainsi confiné dans le cœur. Ainsi, le deuxième mode peut se propager dans le cœur. On a représenté en 9 sur la figure 2B sa distribution d'intensité en champ proche en sortie de la fibre optique. On observe que le faisceau émis en sortie est multimode, ce qui confirme l'altération de la qualité spectrale du faisceau due aux effets thermiques.

Ainsi, même si les nouvelles architectures des fibres optiques microstructurées permettent de repousser les seuils d'apparition des effets non linéaires, il n'existe pas pour l'instant de solution technique au problème du contrôle du profil d'indice de la fibre optique, du fait des effets thermiques qui apparaissent dans les fibres opérant dans des plages de puissance importante.

L'invention propose une fibre optique monomode avec un profil d'indice conçu pour pré-compenser les variations indicielles lorsque la fibre optique fonctionne dans des plages de puissance optique élevée. La solution de l'invention permet d'assurer ainsi un meilleur contrôle des caractéristiques modales des fibres optiques.

A cet effet, l'invention concerne une fibre optique monomode comprenant, depuis son centre vers sa périphérie :

- un cœur monomode;
 - au moins une gaine entourant ledit cœur,
- caractérisée en ce qu'elle comprend au moins une région configurée pour présenter un profil d'indice comprenant au moins un palier d'indice négatif lorsque ladite fibre optique est dans un état non actif et un profil d'indice positif sensiblement constant lorsque ladite fibre optique est dans un état actif, les écarts indiciels entre les deux états de la fibre optique correspondant aux variations indicielles induites par un effet thermique apparaissant dans ladite au moins une région de la fibre optique lorsque la fibre optique est dans l'état actif.

On entend par « palier d'indice » une partie d'un profil d'indice de la région qui a une forme de disque ou d'anneau dans laquelle l'indice présente une valeur constante.

On entend par fibre optique dans un état non actif une fibre optique qui n'est pas dans un état de fonctionnement et dont le profil d'indice ne subit pas de perturbations extérieures, telles que l'échauffement dans le cœur de la fibre. Pour la suite de la description, on désigne une telle fibre optique par le terme « fibre optique froide ».

On entend par fibre optique dans un état actif une fibre optique qui est en train d'être utilisée pour amplifier une onde lumineuse. Pour la suite de la description, on désigne une telle fibre optique par le terme « fibre optique chaude ».

Plus précisément, par rapport aux fibres de l'état de la technique, l'invention propose de remplacer la valeur constante de l'indice dans une région de la fibre par une pluralité de valeurs discrètes de l'indice négatif en prévision d'une variation indicielle due aux effets thermiques dans cette région. Ainsi grâce à la présente invention, cette variation indicielle induite dans une région de la fibre lorsque la fibre est dans un état actif est pré-compensées par le profil d'indice négatif lorsque la fibre optique est dans un état non actif. De fait, lorsque la fibre optique est dans un état actif, fonctionnant en configuration amplificateur ou laser, les modifications induites par les effets thermiques sur le profil d'indice de la fibre optique sont pré-compensées et l'indice global du cœur tend à s'aplanir transversalement vers une valeur constante adaptée pour générer un faisceau monomode.

Dans différents modes de réalisation possibles, la présente invention concerne également des caractéristiques qui ressortiront au cours de la description qui va suivre et qui devront être considérées isolément ou selon toutes leurs combinaisons techniquement possibles :

- ladite au moins une région comprend une succession de couches concentriques, chacune des couches présentant un indice de réfraction constant (n_{11} , n_{13} , n_{14}) ;
- ladite au moins une région comprend un ensemble d'éléments longitudinaux, chacun des éléments présentant un indice de réfraction homogène, lesdits éléments longitudinaux étant agencés de manière à former une succession de couches concentriques (11, 13, 14), chacune des couches présentant un indice de réfraction constant (n_{11} , n_{13} , n_{14}) ;
- les éléments longitudinaux présentent une section transversale de forme hexagonale ;
- ladite au moins une région forme le cœur de la fibre ;
- ladite au moins une région forme le cœur et au moins une partie de la gaine située à l'interface entre le cœur et ladite première gaine entourant le cœur.

Selon une forme de réalisation de l'invention, le profil d'indice comprend une pluralité de paliers d'indice négatif pour définir un profil à gradient d'indice négatif qui croît depuis le centre de la fibre optique vers la périphérie de la fibre optique lorsque la fibre optique est dans un état non actif pour pré-compenser une variation indicielle induite par un

gradient de température dans ladite au moins une région de la fibre optique lorsque la fibre optique est dans l'état actif.

De préférence, la différence Δn entre l'indice de réfraction du cœur monomode lorsque la fibre optique est dans un état actif et l'indice de réfraction de la première gaine entourant le cœur est au moins inférieure à 10^{-5} .

De préférence, le diamètre du cœur est compris entre 35 μm et 200 μm .

La présente invention concerne également un laser à fibre optique de forte puissance comprenant une fibre optique monomode telle que définie ci-dessus en tant que milieu d'amplification optique de manière à générer un faisceau laser de forte puissance et monomode.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description suivante de modes particuliers de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

Figure 1A est une représentation schématique d'un profil d'indice du cœur d'une fibre optique dans un état non actif selon l'état de la technique, Δn représentant la différence indicielle entre l'indice de réfraction du cœur de la fibre et celui de la première gaine optique entourant le cœur ;

Figure 1B est une représentation schématique d'un gradient de température apparaissant dans le cœur d'une fibre optique dans un état actif ;

Figure 1C est une représentation schématique d'un profil d'indice modifié lié aux effets thermiques lorsque la fibre optique est dans un état actif;

Figure 2A est une représentation schématique du profil d'indice d'une fibre optique froide avec les indices effectifs associés aux deux premiers modes guidés dans le cœur n_e^{01} , n_e^{11} et la distribution d'intensité en champ proche en sortie d'une telle fibre optique ;

Figure 2B est une représentation schématique du profil d'indice d'une fibre optique chaude avec les indices effectifs associés aux deux premiers modes guidés dans le cœur et la distribution d'intensité en champ proche en sortie d'une telle fibre comprenant une combinaison spatiale des deux modes guidés ;

Figure 3A est une représentation schématique d'un profil à gradient d'indice négatif radial d'une fibre optique froide ;

Figure 3B est une représentation schématique d'un profil d'indice de la fibre optique de la figure 3a lorsque la fibre optique est chaude, c'est-à-dire fonctionnant dans une gamme de puissance déterminée pour une émission monomode ;

Figure 4A et Figure 4B illustrent respectivement une vue en coupe d'une fibre optique comportant un cœur composé d'un ensemble d'éléments longitudinaux formant trois couches concentriques selon un premier mode de réalisation de l'invention et un profil d'indice correspondant comportant trois paliers d'indice négatif selon une forme de réalisation de l'invention;

Figure 5A et Figure 5B illustrent respectivement une vue en coupe d'une fibre optique semblable à celle de la figure 4A et un profil d'indice correspondant comportant un palier d'indice négatif enterré ;

Figure 6A et Figure 6B illustrent respectivement une vue en coupe d'une fibre optique semblable à celle de la figure 4A et un profil d'indice correspondant comportant un palier d'indice négatif enterrée ;

Figure 7 est une représentation schématique d'une fibre optique selon un deuxième mode de réalisation de l'invention ;

Figure 8 illustre les différentes phases de l'évolution du profil d'indice d'une fibre optique à gradient d'indice négatif selon l'invention en fonction de la puissance optique.

Une fibre optique monomode 10 prévue pour émettre un rayonnement lumineux à une longueur d'onde donnée comprend depuis son centre vers sa périphérie un cœur monomode au moins partiellement dopé ou non par des ions de terres rares et au moins une gaine entourant ledit cœur. Une section transversale dans un plan (X-X' ; Y-Y') d'une telle fibre est représentée sur la figure 4A.

Selon une forme connue telle que décrite dans le document FR2 974 637, la fibre comprend une première gaine entourant le cœur, optiquement inactive mais qui contribue à conférer au cœur son caractère monomode et une deuxième gaine de pompage et une gaine extérieure.

Selon l'invention, lorsque cette fibre optique est mise dans un état actif, le profil d'indice de certaines régions de la fibre optique est modifié par un effet thermique. A titre d'exemple, lorsque la fibre optique est dans un état actif, on voit apparaître essentiellement un gradient de température qui s'étend depuis le centre de la fibre optique jusqu'à une

partie de la première gaine entourant le cœur (figure 1B). Ce gradient de température entraîne une modification du profil d'indice de la fibre optique qui peut affecter le caractère monomode du faisceau émis.

Selon l'invention, on propose de configurer cette région de la fibre optique de sorte qu'il présente un profil d'indice comprenant au moins un palier d'indice négatif lorsqu'il est dans un état non actif déterminé pour pré-compenser les variations indicielles induites par un gradient de température apparaissant dans cette région de la fibre optique.

Selon l'invention, ce profil d'indice comprend une pluralité de paliers d'indice négatif de manière à pouvoir compenser plus précisément les variations indicielles induites dans la fibre optique dans cette région. L'invention propose donc de remplacer la valeur constante de l'indice dans une région donnée de la fibre optique qui est affectée par les effets thermiques, par une pluralité de valeurs d'indices de réfraction négatif ; l'accroissement du nombre de valeurs discrètes de l'indice dans cette région permet de mieux contrôler le profil d'indice de la fibre en fonction des variations indicielles.

Selon une forme de réalisation, cette région concerne uniquement le cœur.

Selon une autre forme de réalisation, cette région concerne le cœur et une partie de la première gaine entourant le cœur.

Selon une première forme de réalisation de l'invention, le profil d'indice de cette région comprend une pluralité de paliers d'indice négatif qui croît depuis le centre de la fibre optique jusqu'à la périphérie de la fibre optique. Cette pluralité de paliers d'indice négatif définit un profil à gradient d'indice négatif. Ce profil à gradient d'indice négatif est déterminé pour compenser les variations indicielles induites par un gradient de température apparaissant dans cette région de la fibre optique lorsque la fibre optique est dans un état actif. De fait, ce profil à gradient d'indice négatif est déterminé pour une puissance optique visée correspondant à un gradient de température donné.

Sur la figure 3A, on a représenté un exemple d'un profil à gradient d'indice négatif lorsque ladite fibre optique est dans un état non actif. Ce profil comporte trois paliers d'indice négatif. La région concerne uniquement le cœur et l'indice de réfraction croît depuis le centre du cœur jusqu'à la périphérie du cœur. Comme l'illustre la figure 4B, chacun des trois paliers correspond à une zone du cœur ayant un indice de réfraction négatif constant. Chacune des parties présente un indice négatif constant qui croît depuis le cœur de la fibre jusqu'à la périphérie du cœur. Ainsi, le cœur comporte une partie centrale avec un indice

négatif n_{11} , une première partie annulaire avec un indice négatif n_{13} qui est supérieur à n_{11} et une troisième partie annulaire avec un indice négatif n_{14} qui est supérieur à n_{13} . Bien entendu, il est possible d'augmenter le nombre de paliers d'indice négatif ou d'induire des paliers supplémentaires au sein d'une partie annulaire afin de mieux ajuster le profil d'indice de la fibre en fonction des variations indicielles.

Lorsque la fibre optique est placée dans l'état actif, le profil de l'indice négatif du cœur tend vers un indice positif $n_{\text{cœuractif}}$ sensiblement constant sous l'effet thermique telle qu'illustrée sur la figure 3B. Les écarts indiciels entre le profil à gradient d'indice négatif 15 et le profil d'indice positif constant du cœur 16 correspondent aux variations indicielles induites le long de toute direction radiale de la fibre optique par les effets thermiques générés par une plage de valeurs de puissance optique déterminée et souhaitée par l'utilisateur.

Sur la figure 1C, on peut noter qu'une partie de la première gaine se trouvant à l'interface entre le cœur et la première gaine présente également une variation d'indice liée aux effets thermiques. Pour compenser également cette variation indicielle dans la région d'interface entre le cœur et la gaine, le cœur et une partie de la première gaine entourant le cœur sont configurés pour présenter un profil d'indice comprenant une pluralité de paliers d'indice négatif qui croît depuis le centre de la fibre optique jusqu'à la périphérie de la première gaine.

Selon l'invention, la région concernée présente une structure particulière afin de pouvoir ajuster son profil d'indice en terme du nombre de paliers d'indice négatif ou du positionnement du ou des palier(s) dans le profil d'indice.

Selon un premier mode de réalisation de l'invention, cette région comprend un ensemble d'éléments longitudinaux, chacun des éléments longitudinaux présentant un indice de réfraction homogène, ces éléments étant agencés de manière à former une succession de couches concentriques pour définir un profil d'indice souhaité pour pré-compenser les variations indicielles.

Ces éléments sont agencés de façon adjacente de manière à couvrir toute la surface de cette région dans un plan transversal de la fibre optique. Ils présentent chacun une section de forme hexagonale dont les côtés sont en contact avec ceux des éléments longitudinaux limitrophes. Toutefois, toute autre forme de section peut être adaptée, en particulier une forme circulaire, rectangulaire ou triangulaire.

Sur la figure 4A, on a représenté une fibre optique monomode 10 conforme à une première forme de réalisation de l'invention. Elle comporte depuis son centre vers sa périphérie un cœur monomode 12 ayant un profil à gradient d'indice négatif et au moins une gaine entourant le cœur. Le cœur 12 est formé d'une pluralité d'éléments longitudinaux 11, 13A, 14A agencés de manière à former une partie centrale 11 et deux couches concentriques 13, 14 entourant la partie centrale, chacun des éléments longitudinaux présentant un indice de réfraction homogène n_{11} , n_{13A} , n_{14A} . Chacune des couches 11, 13, 14 est formée d'éléments longitudinaux identiques pour présenter un indice de réfraction constant n_{11} , n_{13} , n_{14} .

10 Selon une première forme de réalisation de l'invention, le profil d'indice conféré par les trois couches est un profil à gradient d'indice négatif qui croît depuis la partie centrale du cœur vers la périphérie du cœur. Le profil comporte ici un premier palier d'indice négatif noté P_{11} correspondant à l'indice de la partie centrale 11, un deuxième palier d'indice négatif noté P_{13} correspondant à l'indice de la couche intermédiaire 13 et un troisième palier d'indice négatif noté P_{14} correspondant à l'indice de la couche 14. L'indice de la partie centrale n_{11} est supérieur à l'indice n_{13} de la couche intermédiaire qui est lui-même supérieur à l'indice n_{14} de la couche 14. Ce gradient d'indice négatif permet de pré-compenser les variations indicielles induites par un gradient de température tel qu'illustré sur la figure 1B.

20 Une des caractéristiques intéressantes de la solution de la présente invention est de pouvoir moduler le profil d'indice pour pré-compenser les variations indicielles en fonction des applications.

Sur la figure 5A, on a représenté une fibre optique monomode 20 semblable à celle de la figure 4A. Elle comporte un cœur monomode 22 et une première gaine entourant le cœur. Le cœur 22 est formé d'une pluralité d'éléments longitudinaux 21, 23A, 24A agencés de manière à former une partie centrale 21 et deux couches concentriques 23, 24 entourant la partie centrale, chacun des éléments longitudinaux présentant un indice de réfraction homogène n_{21} , n_{23A} , n_{24A} . Chacune des couches 21, 23, 24 est formée d'éléments longitudinaux identiques pour présenter un indice de réfraction homogène n_{21} , n_{23} , n_{24} .

30 Sur la figure 5B, on a représenté une variante du profil d'indice de la figure 4B. Le profil d'indice 25 conféré par les trois couches de la figure 5A comporte ici un seul palier d'indice négatif enterré P_{24} correspondant à la couche 24.

Sur la figure 6A, on a représenté une fibre optique monomode 30 semblable à celle de la figure 4A. Elle comporte un cœur monomode 32 et une première gaine entourant le cœur. Le cœur 32 est formé d'une pluralité d'éléments longitudinaux 31, 33A, 34A agencés de manière à former une partie centrale 31 et deux couches concentriques 33, 34 entourant
5 la partie centrale, chacun des éléments longitudinaux présentant un indice de réfraction homogène n_{31} , n_{33A} , n_{34A} . Chacune des couches 31, 33, 34 est formée d'éléments longitudinaux identiques pour présenter un indice de réfraction homogène n_{31} , n_{33} , n_{34} .

Selon la figure 6B, le profil d'indice conféré 35 par les trois couches de la figure 6A comporte un seul palier d'indice négatif enterré P_{33} correspondant à la couche 34.

10 L'invention a été décrite ci-dessus, en référence aux figures 4A, 5A et 6A pour une région intégralement constituée d'éléments longitudinaux, mais il va de soi que cette région peut n'être que partiellement formée de tels éléments, et le reste de la région pouvant être formé d'un seul élément longitudinal présentant un unique indice de réfraction.

De même, si l'invention a été décrite ci-dessus pour une région formant uniquement
15 le cœur, il va de soi que cette région peut former également le cœur et une partie de la première gaine entourant le cœur.

Selon un deuxième mode de réalisation de l'invention, cette région comprend une succession de couches concentriques, chacune des couches concentriques présentant un indice de réfraction constant, l'ensemble définit un profil d'indice négatif souhaité pour pré-
20 compenser les variations indicielles.

Un exemple d'une telle fibre optique 40 est illustré sur la figure 7. Elle comporte depuis son centre vers sa périphérie un cœur monomode 42 et une première gaine entourant le cœur. Le cœur 42 est formé d'une succession de trois couches concentriques circulaires 41, 43, 44, chacune des couches étant constituée d'un unique élément
25 longitudinal de section annulaire. Chacune des couches présente un indice de réfraction constant, l'ensemble définit un profil d'indice négatif souhaité pour pré-compenser les variations indicielles. Ce profil d'indice négatif est par exemple un profil à gradient d'indice négatif qui croît depuis le centre du cœur jusqu'à la périphérie du cœur tel qu'illustré sur la figure 4B. Il peut également comporter un seul palier d'indice négatif tel qu'illustré sur les
30 figures 5B et 5C ou une pluralité de paliers d'indice négatif.

Sur la figure 8, on a représenté l'évolution du profil d'indice du cœur de la fibre optique en fonction de la puissance optique du faisceau émise depuis le cœur. Dans cet

exemple, la variation d'indice de réfraction de la gaine qui est considérée comme très faible par rapport à la variation du cœur n'est pas représentée sur la figure 8. On distingue trois zones. Dans une première zone (I), le cœur présente un profil à gradient d'indice négatif lorsque la fibre optique est dans un état non actif, correspondant à une gamme de puissance
5 optique nulle ou très faible. On entend par une puissance optique très faible une puissance optique ne générant pas d'effets thermiques suffisant pour altérer l'indice de réfraction. Dans une deuxième zone (II), lorsque la fibre optique est dans un état actif, correspondant à une gamme de puissance optique souhaitée pour laquelle on a déterminé les écarts indiciels entre la fibre optique dans un état non actif et la fibre optique dans un état actif, l'indice du
10 cœur est homogène sur toute la surface du cœur et le profil d'indice comprend un palier d'indice positif. La qualité du faisceau émis est excellente. Dans une troisième zone (III), lorsque la fibre optique fonctionne avec une gamme de puissances optiques supérieures à la gamme de puissances optiques souhaitées, le profil à gradient d'indice négatif n'est plus suffisant pour compenser les variations indicielles du fait des effets thermiques. La fibre
15 optique devient alors multimode.

La présente invention permet donc d'assurer le bon fonctionnement de la fibre optique active dans une gamme de puissance souhaitée par l'utilisateur.

De manière connue, l'indice de réfraction global du cœur 12, 22, 32, 42 doit être déterminé de sorte que la différence Δn entre l'indice de réfraction du cœur lorsque la fibre
20 optique est dans un état actif et celui de la première gaine entourant le cœur soit aussi faible que possible, par exemple de l'ordre de 10^{-5} permettant d'assurer l'émission d'un faisceau lumineux monomode à une longueur d'onde donnée.

Par ailleurs, selon la condition sur le rayon de cœur a et sur la différence d'indice Δn , le diamètre $2a$ du cœur est déterminé pour permettre un confinement de la lumière dans le
25 cœur. Le diamètre $2a$ du cœur est typiquement compris entre 35 et 200 μm .

Selon un mode de réalisation de l'invention, le procédé pour fabriquer une fibre optique 10, 20, 30 conforme au premier mode de réalisation et une fibre optique monomode 40 conforme au deuxième mode de réalisation comprend les étapes suivantes :

- on dispose une poudre dans des préformes correspondant respectivement à des éléments
30 longitudinaux du cœur monomode,
- on vitrifie lesdites préformes,

- on adapte les dimensions desdites préformes par fibrage afin de former lesdits éléments longitudinaux,
- on agence lesdits éléments longitudinaux de manière à former le cœur monomode, et
- on établit le vide entre lesdits éléments longitudinaux.

5 On peut référer au brevet FR2 974 637 pour connaître plus en détail ce procédé.

D'autres procédé de fabrication pourraient être mis en œuvre pour réaliser et assembler entre eux les éléments longitudinaux tels que le procédé de dépôt chimique modifié par voie gazeuse, plus connu sous l'abréviation « MCVD » (de l'expression anglo-saxon : « modified chemical vapor phase deposition »).

REVENDEICATIONS

1. Fibre optique monomode (10) comprenant, depuis son centre vers sa périphérie :

- un cœur monomode (12);
- au moins une gaine entourant ledit cœur,

5 caractérisée en ce qu'elle comprend au moins une région(12) configurée pour présenter un profil d'indice (15) comprenant au moins un palier d'indice négatif lorsque ladite fibre optique (10) est dans un état non actif et un profil d'indice positif sensiblement constant lorsque ladite fibre optique est dans un état actif, les écarts indiciels entre les deux états de la fibre optique correspondant aux variations indicielles induites par un effet thermique

10 apparaissant dans ladite au moins une région de la fibre optique lorsque la fibre optique est dans l'état actif.

2. Fibre optique monomode selon la revendication 1, caractérisée en ce que ladite au moins une région comprend une succession de couches concentriques (41, 43, 44), chacune des couches présentant un indice de réfraction constant.

15 3. Fibre optique monomode selon la revendication 1, caractérisée en ce que ladite au moins une région comprend un ensemble d'éléments longitudinaux (11, 13A, 14A), chacun des éléments présentant un indice de réfraction homogène, lesdits éléments longitudinaux étant agencés de manière à former une succession de couches concentriques (11, 13, 14), chacune des couches présentant un indice de réfraction (n_{11} , n_{13} , n_{14}).

20 4. Fibre optique monomode selon la revendication 3, caractérisée en ce que les éléments longitudinaux (11, 13A, 14A) présentent une section transversale de forme hexagonale.

5. Fibre optique monomode selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que ladite au moins une région forme le cœur (12, 22, 32, 42) de la fibre.

25 6. Fibre optique monomode selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que ladite au moins une région forme le cœur (12, 22, 32, 42) de la fibre et au moins une partie de la gaine située à l'interface entre le cœur et ladite première gaine entourant le cœur.

30 7. Fibre optique monomode selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisée en ce que le profil d'indice comprend une pluralité de paliers d'indice négatif (P_{11} , P_{13} , P_{14}) pour

définir un profil à gradient d'indice négatif (15) qui croît depuis le centre de la fibre optique vers la périphérie de la fibre optique lorsque la fibre optique est dans un état non actif pour pré-compenser une variation indicielle induite par un gradient de température dans ladite au moins une région de la fibre optique lorsque la fibre optique est dans l'état actif.

5 8. Fibre optique monomode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que la différence Δn entre l'indice de réfraction du cœur monomode lorsque la fibre optique est dans un état actif et l'indice de réfraction de la première gaine entourant le cœur est au moins inférieure à 10^{-5} .

10 9. Fibre optique monomode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que le diamètre du cœur est compris entre 35 μm et 200 μm .

10 10. Laser à fibre optique de forte puissance comprenant une fibre optique monomode (10, 20, 30, 40) selon l'une des revendications 1 à 9 en tant que milieu d'amplification optique afin de générer un faisceau laser de forte puissance et monomode.

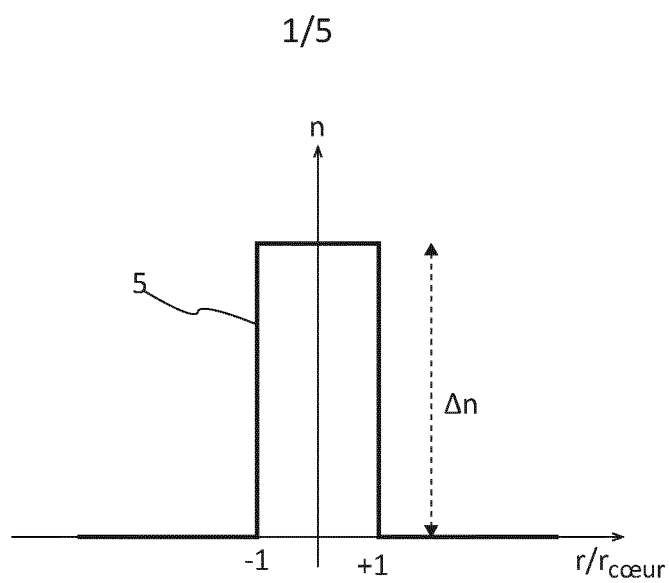


Fig. 1A

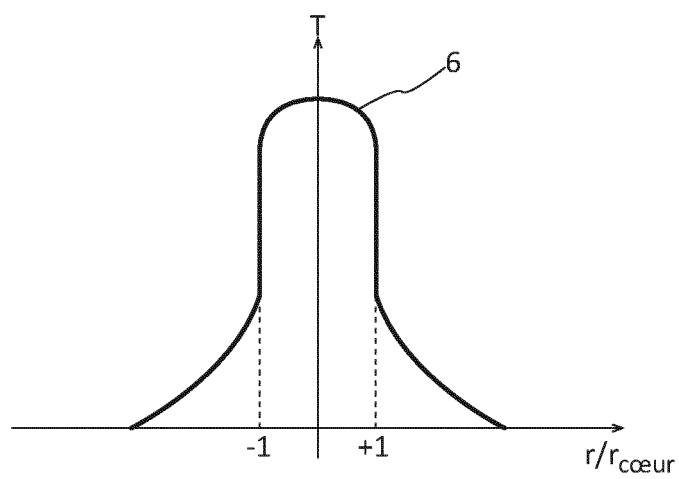


Fig. 1B

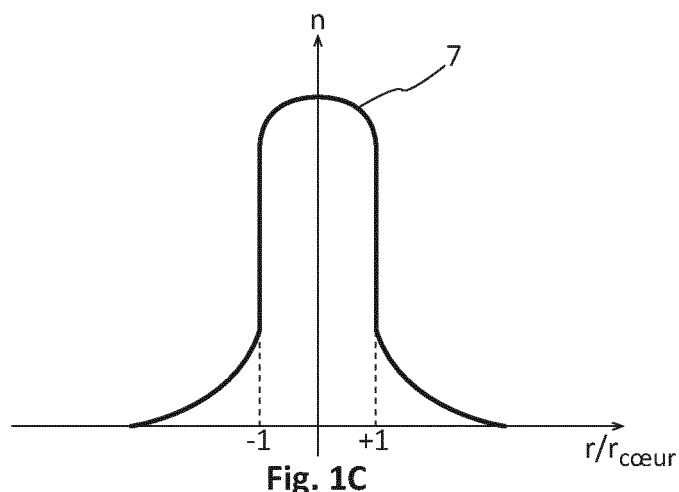


Fig. 1C

2/5

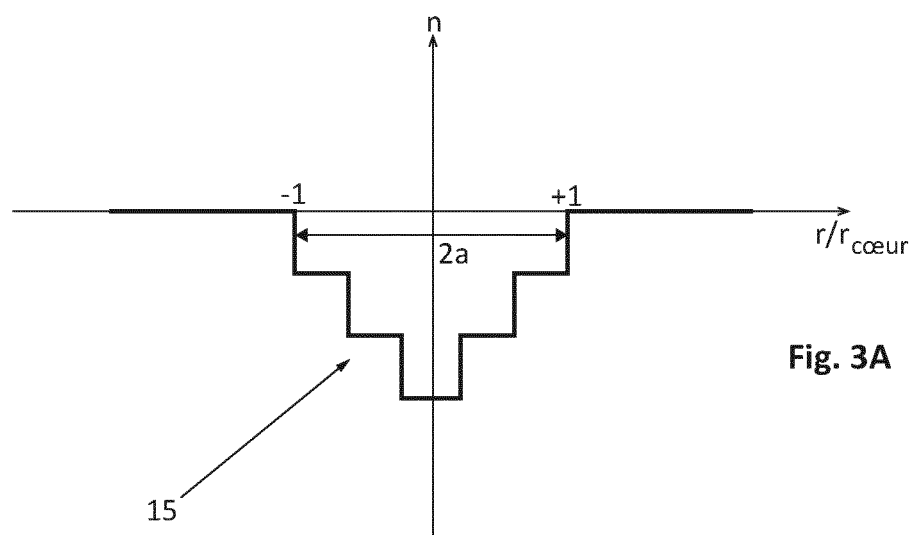
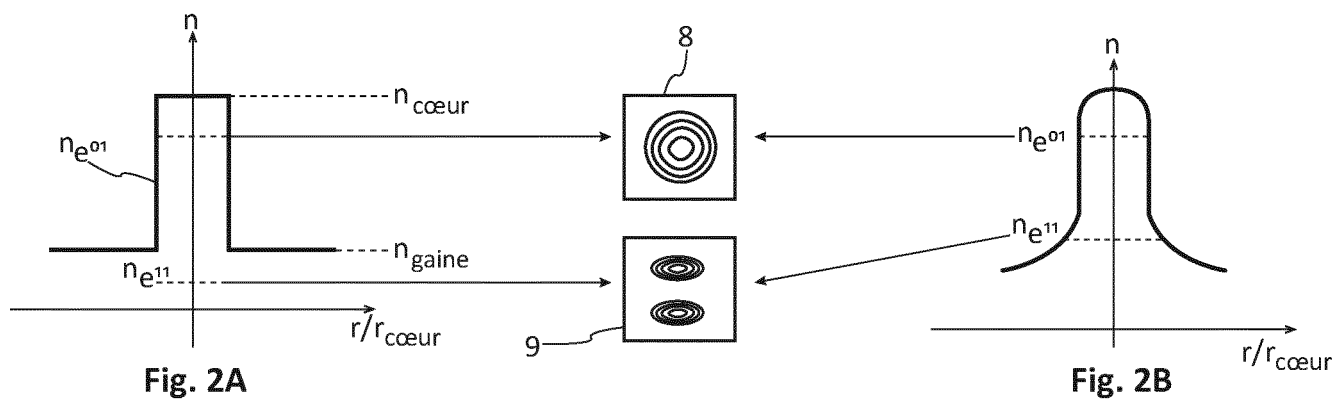


Fig. 3A

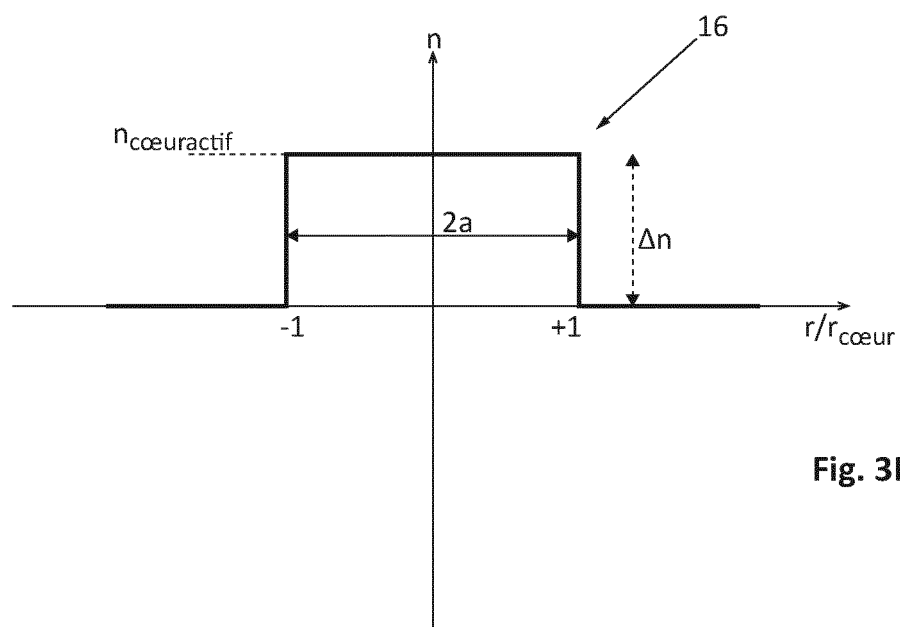


Fig. 3B

3/5

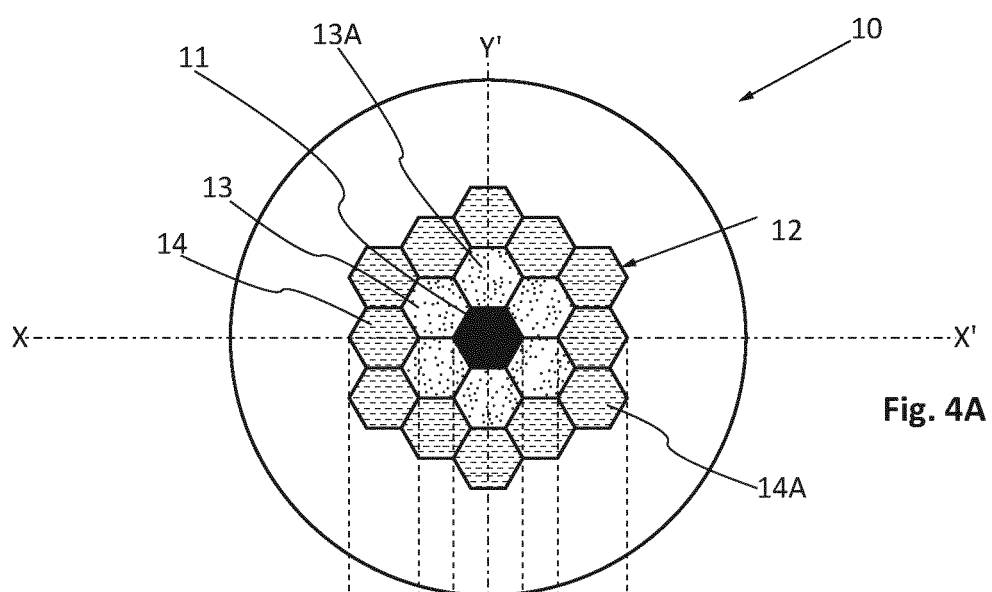


Fig. 4A

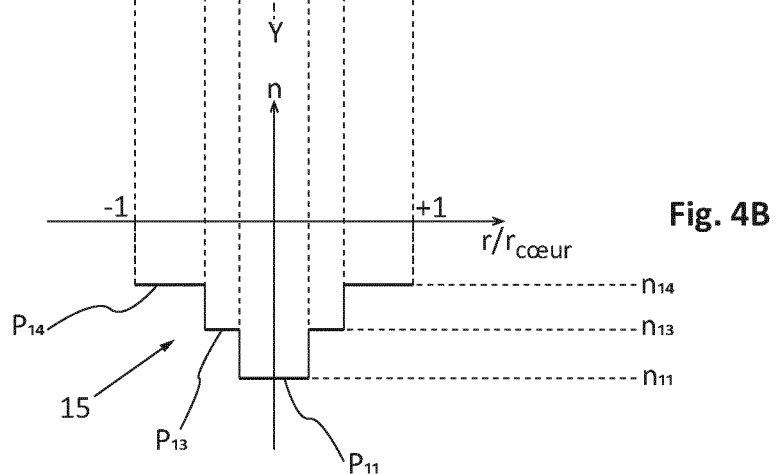


Fig. 4B

4/5

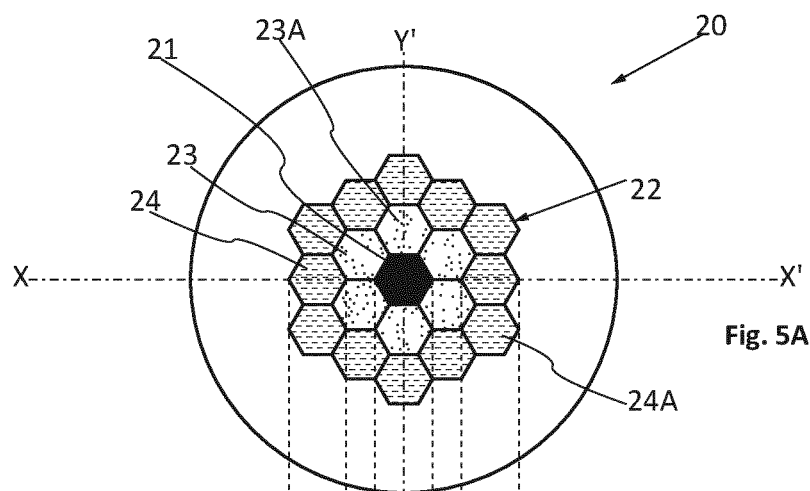


Fig. 5A

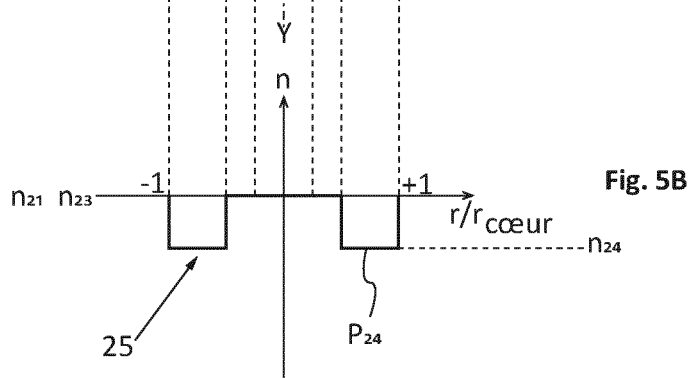


Fig. 5B

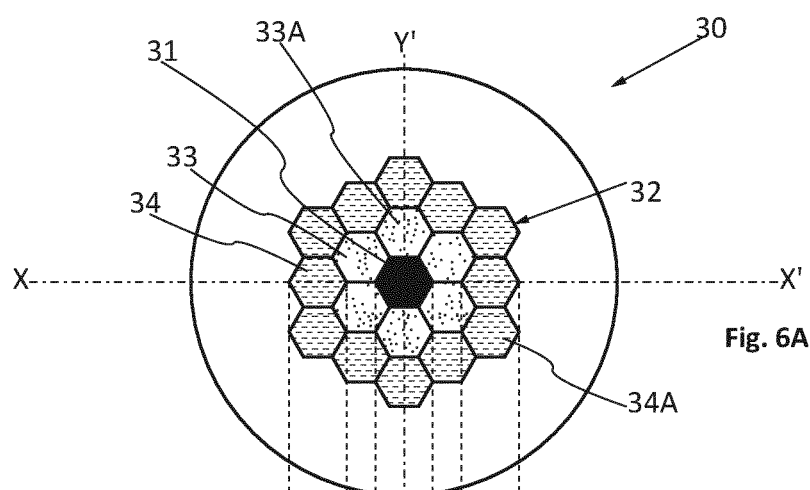


Fig. 6A

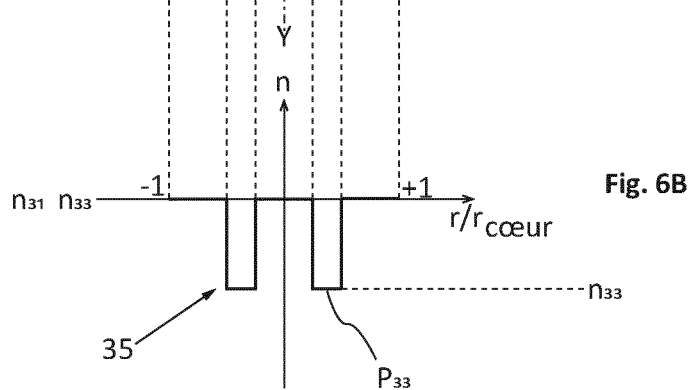


Fig. 6B

5/5

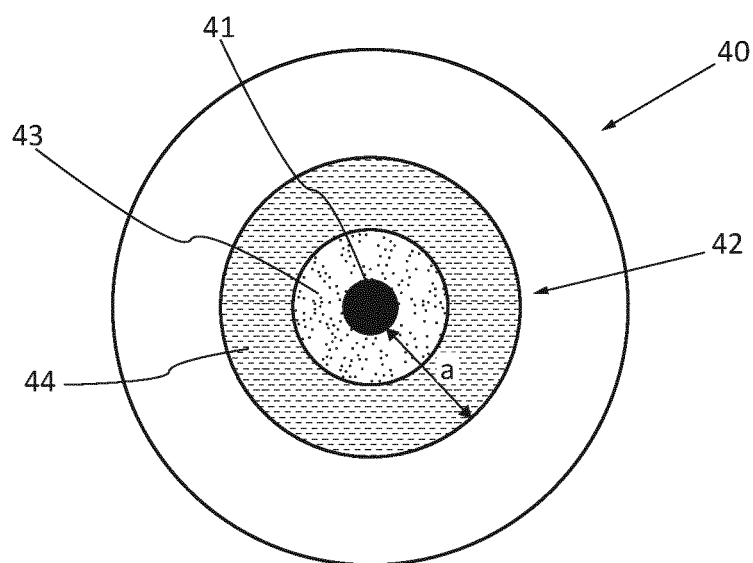


Fig. 7

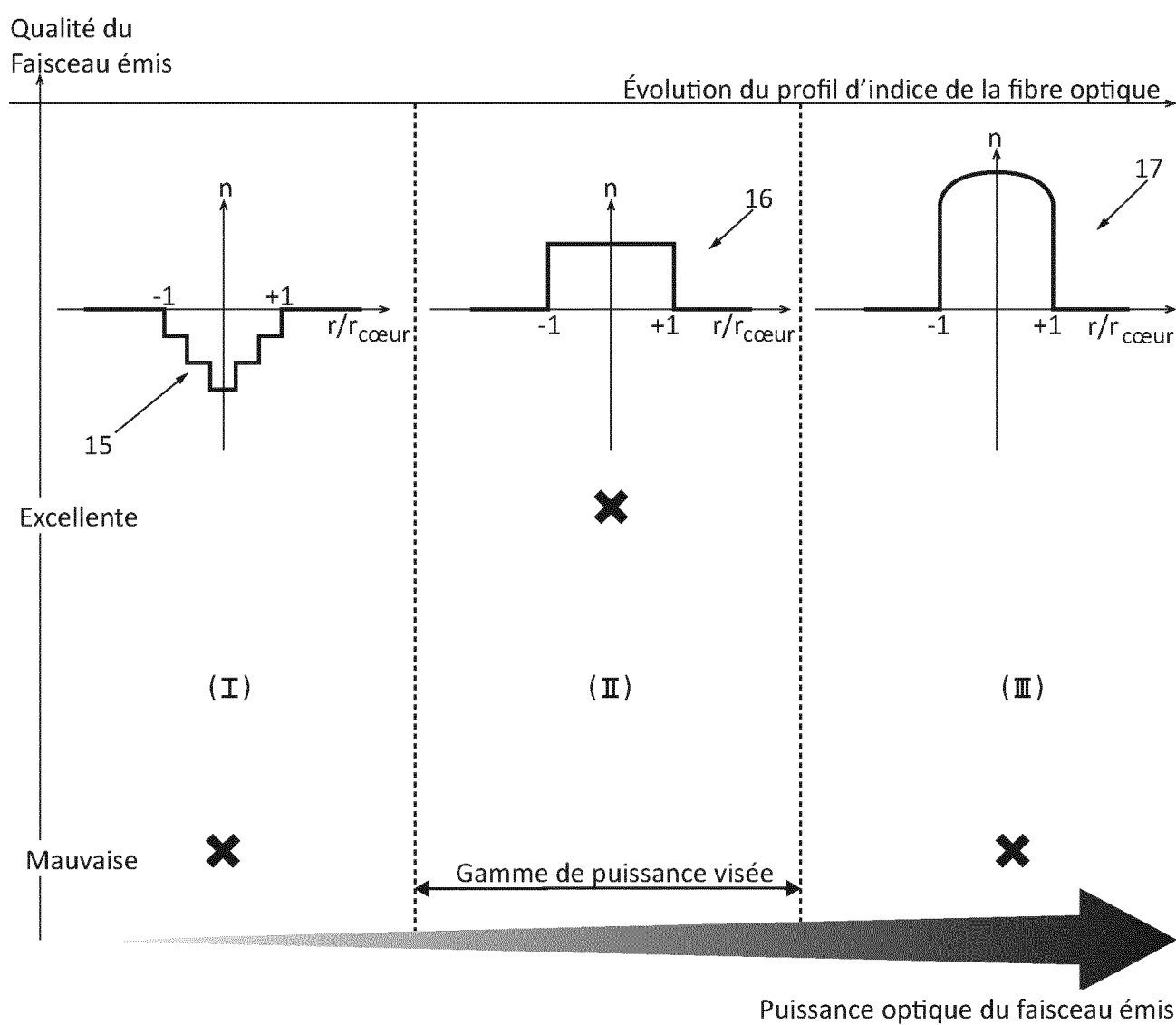


Fig. 8



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement
national

FA 812382
FR 1553710

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	ENRICO COSCELLI ET AL: "Thermal effect-resilient design of large mode area double-cladding Yb-doped photonic crystal fibers", PROCEEDING OF SPIE, FIBER LASERS X: TECHNOLOGY, SYSTEMS, AND APPLICATIONS, vol. 8601, 26 février 2013 (2013-02-26), pages 860120-1-86010-7, XP055250241, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.2004048 ISBN: 978-1-5106-0167-3 * page 1 - page 4; figures 1,3 * * abrégé *	1,5,6, 8-10	G02B6/036 H01S3/07 H01S3/067
X	FLORIAN JANSEN ET AL: "High-power thermally guiding index-antiguinding-core fibers", OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, US, vol. 38, no. 4, 15 février 2013 (2013-02-15), pages 510-512, XP001580519, ISSN: 0146-9592, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.1364/OL.38.000510 * page 510, colonne de gauche - page 511, colonne de gauche; figure 1 *	1,5,6, 8-10	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H01S
X	COSCELLI E ET AL: "Tm-doped rod-type photonic crystal fibers with symmetry-free cladding", 2014 CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS (CLEO) - LASER SCIENCE TO PHOTONIC APPLICATIONS, THE OPTICAL SOCIETY, 8 juin 2014 (2014-06-08), pages 1-2, XP032708057, [extrait le 2014-12-16] * page 1, alinéa 2 - page 2, alinéa 1 *	1,5,6, 8-10	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
18 février 2016		Riechel, Stefan	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		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	
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			

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement national

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

FA 812382
FR 1553710

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	US 2007/206912 A1 (MINELLY JOHN D [US] ET AL) 6 septembre 2007 (2007-09-06) * alinéas [0008], [0042] - [0005], [0056], [0058], [0070]; figures 1e, 1g, 4a *	1-7, 9, 10	
A	----- DAULIAT R ET AL: "Large mode area aperiodic fiber designs for robust singlemode EMI ion under high thermal load", PROCEEDINGS OF SPIE, CONFERENCE ON MICRO-STRUCTURED AND SPECIALTY OPTICAL FIBRES IV, 15 APRIL 2015 TO 16 APRIL 2015, PRAGUE, CZ, vol. 9507, 15 avril 2015 (2015-04-15), XP060053243, DOI: 10.1117/12.2178935 * le document en entier *	3, 4	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		18 février 2016	Riechel, Stefan
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		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	
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			

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1553710 FA 812382**

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 **18-02-2016**

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
US 2007206912	A1	06-09-2007	AUCUN



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement
national

FA 812382
FR 1553710

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	ENRICO COSCELLI ET AL: "Thermal effect-resilient design of large mode area double-cladding Yb-doped photonic crystal fibers", PROCEEDING OF SPIE, FIBER LASERS X: TECHNOLOGY, SYSTEMS, AND APPLICATIONS, vol. 8601, 26 février 2013 (2013-02-26), pages 860120-1-86010-7, XP055250241, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.2004048 ISBN: 978-1-5106-0167-3 * page 1 - page 4; figures 1,3 * * abrégé *	1,5,6, 8-10	G02B6/036 H01S3/07 H01S3/067
X	FLORIAN JANSEN ET AL: "High-power thermally guiding index-antiguinding-core fibers", OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, US, vol. 38, no. 4, 15 février 2013 (2013-02-15), pages 510-512, XP001580519, ISSN: 0146-9592, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.1364/OL.38.000510 * page 510, colonne de gauche - page 511, colonne de gauche; figure 1 *	1,5,6, 8-10	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H01S
X	COSCELLI E ET AL: "Tm-doped rod-type photonic crystal fibers with symmetry-free cladding", 2014 CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS (CLEO) - LASER SCIENCE TO PHOTONIC APPLICATIONS, THE OPTICAL SOCIETY, 8 juin 2014 (2014-06-08), pages 1-2, XP032708057, [extrait le 2014-12-16] * page 1, alinéa 2 - page 2, alinéa 1 *	1,5,6, 8-10	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
18 février 2016		Riechel, Stefan	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		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	
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			

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement national

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

FA 812382
FR 1553710

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	US 2007/206912 A1 (MINELLY JOHN D [US] ET AL) 6 septembre 2007 (2007-09-06) * alinéas [0008], [0042] - [0005], [0056], [0058], [0070]; figures 1e, 1g, 4a *	1-7, 9, 10	
A	----- DAULIAT R ET AL: "Large mode area aperiodic fiber designs for robust singlemode EMI ion under high thermal load", PROCEEDINGS OF SPIE, CONFERENCE ON MICRO-STRUCTURED AND SPECIALTY OPTICAL FIBRES IV, 15 APRIL 2015 TO 16 APRIL 2015, PRAGUE, CZ, vol. 9507, 15 avril 2015 (2015-04-15), XP060053243, DOI: 10.1117/12.2178935 * le document en entier *	3, 4	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		18 février 2016	Riechel, Stefan
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		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	
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			

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1553710 FA 812382**

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 **18-02-2016**

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
US 2007206912	A1	06-09-2007	AUCUN
