

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 08.10.18.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 10.04.20 Bulletin 20/15.

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) : DRAKA COMTEQ FRANCE Société par actions simplifiée — FR.

72 Inventeur(s) : BIGOT MARIANNE, TRINEL JEAN-BAPTISTE, SILLARD PIERRE et DE MONTMORILLON LOUIS-ANNE.

73 Titulaire(s) : DRAKA COMTEQ FRANCE Société par actions simplifiée.

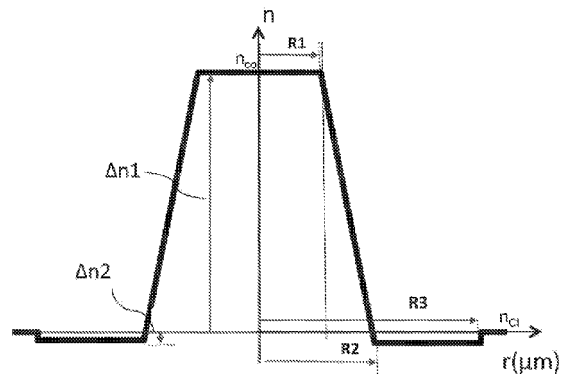
74 Mandataire(s) : CABINET PATRICE VIDON.

54 Fibres optiques à peu de modes et faiblement couplées pour multiplexage par répartition de mode et système de transmission correspondant.

57 L'invention concerne une fibre optique à peu de modes comprenant un profil d'indice de réfraction du cœur  $\Delta n(r)$  de forme de type trapézoïde, le cœur optique ayant une partie centrale de rayon  $R1$  et une partie de transition va du rayon  $R1$  à un rayon  $R2$ , tel que  $R2 > R1$  avec  $R2$  compris entre  $6,8$  et  $11,5 \mu\text{m}$ , ledit profil d'indice de réfraction étant défini par :

- une intégrale de surface du profil d'indice du cœur comprise entre  $180 \cdot 10^{-3}$  et  $270 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ ;
- une pente de transition  $S$  comprise entre  $1,7 \cdot 10^{-3}$  et  $12 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ ;

avec  $\Delta n1$  et  $\Delta n2$  la différence d'indice de réfraction respectivement de la partie centrale du cœur optique et de la partie de gaine adjacente au cœur optique, par rapport à la gaine optique externe.



# Fibres optiques à peu de modes et faiblement couplées pour multiplexage par répartition de mode et système de transmission correspondant

## 1. DOMAINE DE L'INVENTION

La présente divulgation concerne le domaine de la transmission par fibre optique, et, plus spécifiquement, de la conception améliorée de fibres à peu de modes pour un multiplexage par répartition de mode.

## 2. ARRIÈRE-PLAN TECHNOLOGIQUE

5 Une fibre optique est habituellement constituée d'un cœur optique, qui transmet un signal optique, et d'une gaine optique, qui confine le signal optique au sein du cœur optique. À cette fin, l'indice de réfraction du cœur,  $n_{co}$ , est plus grand que celui de la gaine,  $n_{cl}$ . Une fibre optique est généralement caractérisée par un profil d'indice de réfraction qui associe l'indice de réfraction ( $n$ ) au rayon ( $r$ ) de la fibre optique : la distance  $r$  par rapport au centre  
10 de la fibre optique est définie sur l'axe  $x$  et la différence  $\Delta n$  entre l'indice de réfraction au rayon  $r$ ,  $n(r)$ , et l'indice de réfraction de la gaine optique  $n_{cl}$  est défini sur l'axe  $y$ .

Il existe aujourd'hui deux catégories principales de fibres optiques : les fibres multimodes et les fibres monomodes. Dans une fibre multimode, pour une longueur d'onde donnée, plusieurs modes optiques peuvent se propager simultanément le long de la fibre  
15 optique, tandis que dans une fibre monomode, les modes d'ordre supérieur (appelés ci-après HOM pour « Higher Order Modes ») sont interrompus ou hautement atténués.

Les fibres monomodes sont couramment utilisées pour les applications longue distance, telles que des réseaux d'accès, des réseaux métropolitains ou des réseaux grande distance. Pour obtenir une fibre optique capable de transmettre un signal optique  
20 monomode, un cœur de diamètre relativement petit est requis (typiquement comprise entre  $5 \mu\text{m}$  et  $13 \mu\text{m}$ ). Pour satisfaire des exigences d'applications à haute vitesse ou à débit binaire élevé (par exemple 10 Gbps), des fibres monomodes standards requièrent l'utilisation d'un émetteur laser monomode modulé accordé pour fonctionner typiquement à une longueur d'onde de 1 550 nm. Néanmoins, les fibres monomodes rencontrent des  
25 problèmes de non-linéarité, qui constituent des limitations majeures sur la capacité de transmission par fibre.

Les fibres multimodes sont couramment utilisées pour les applications courte distance requérant une large bande passante, telles que des réseaux locaux (LAN pour « Local Area Networks ») et des unités résidentielles multiples (MDU pour multi-dwelling units), plus généralement connues sous le nom de réseaux intra-immeuble. Le cœur d'une fibre multimode a typiquement un diamètre de 50  $\mu\text{m}$ , ou de 62,5  $\mu\text{m}$ . Les fibres multimodes les plus répandues en télécommunications sont les fibres optiques à profil d'indice de réfraction graduel. En minimisant la dispersion intermodale (c'est-à-dire la différence entre les délais d'attente de propagation des modes optiques le long de la fibre optique, également appelés DMGD pour « Differential Mode Group Delay »), un tel profil d'indice de réfraction garantit une large bande passante modale pour une longueur d'onde donnée.

Puisque le trafic de données sur des réseaux à fibres optiques continue à croître de façon exponentielle, il existe une demande croissante d'augmenter le trafic par fibre en particulier sur de longues distances. À cette fin, des techniques de multiplexage ont été développées, lesquelles permettent à une pluralité de flux de données séparés de partager la même fibre optique. Parmi ces techniques, une approche prometteuse est le multiplexage par répartition spatiale (SDM pour « Space Division Multiplexing »), dans lequel une pluralité de canaux de données au sein d'une fibre optique unique est fournie par une pluralité respective de modes de signal optique guidés par la fibre. Une telle technique a nécessité le développement de nouveaux types de fibres optiques, appelées des fibres optiques à peu de modes (« few mode optical fibers » en anglais), qui prennent en charge plus d'un mode spatial mais un plus petit nombre de modes spatiaux que les fibres multimodes. De telles fibres à peu de modes (ci-après nommées FMF pour « Few-Mode Fibers »), qui sont notamment évoquées dans le document brevet PCT WO2011/094400, prennent en charge au moins deux modes de polarisation linéaire (LP).

Les transmissions par multiplexage par répartition spatiale utilisant des FMF ont donc récemment attiré l'attention en raison de leur potentiel à multiplier la capacité des transmissions monomodes par le nombre de modes qui seront utilisés. Selon la conception

des FMF, les modes spatiaux transmis peuvent être couplés en tirant profit d'un délai de groupe accumulé relativement faible.

Une approche à la conception des FMF consiste à minimiser le couplage de mode (ci-après appelé FMF faiblement couplées) pour que tous les modes LP puissent être simultanément détectés sans technique entrées multiples-sorties multiples (MIMO) ou en utilisant une simple technique MIMO «  $2N \times 2N$  » (par exemple  $N$  étant le nombre total de modes spatiaux qui est égal à 1 ou 2), peu importe le nombre de modes LP qui est l'un des facteurs limitants pour couvrir de longues distances. En conséquence, une telle FMF faiblement couplée permet une simplification du traitement électronique du signal optique.

Afin de garantir un couplage de qualité entre des modes spatiaux, les FMF faiblement couplées sont conçues pour que la différence d'indice effective minimale (ci-après désignée  $\Delta n_{\text{eff min}}$ ) entre des modes spatiaux ultérieurs (ci-après appelés différence d'indice effectif inter-mode minimale) soit l'une des plus hautes valeurs possibles.

L'augmentation du nombre de modes LP qui peuvent être effectivement utilisés dans les FMF faiblement couplées constitue un défi au regard du couplage de mode et des pertes de modes LP transmis.

Une manière d'augmenter le nombre de modes spatiaux sans réduire  $\Delta n_{\text{eff min}}$  serait d'augmenter l'indice de réfraction du cœur. Néanmoins, cela conduirait à augmenter l'atténuation des signaux optiques transmis, ce qui ne serait pas optimal.

Jusqu'ici, les profils de cœur à saut d'indice se sont avérés très bien adaptés aux fibres FMF faiblement couplées car ce type de profil permet d'obtenir un compromis entre :

- la différence d'indice effectif inter-mode (qui doit être aussi élevée que possible : typiquement la plus petite différence d'indice effectif  $\Delta n_{\text{eff min}}$  est supérieure à  $0,9 \times 10^{-3}$  entre deux modes LP successifs) afin de limiter le couplage de mode ; et

- l'aire effective  $A_{\text{eff}}$  de tous les modes spatiaux (qui doit être la plus grande possible : typiquement  $A_{\text{eff}}$  est supérieure à  $80 \mu\text{m}^2$ ) afin de limiter la non-linéarité intra-mode.

Outre le problème d'atténuation des signaux optiques, les concepteurs ont également observé que les FMF faiblement couplées – comme les FMF à saut d'indice – rencontrent une différence d'atténuation significative entre modes spatiaux (également appelés DMA pour « Differential Mode Attenuation », typiquement lorsque

DMA > 0,05 dB/km), qui impacte sévèrement la capacité de transmission. Dans ce cas, un système d'amplification complexe doit être mis en œuvre pour compenser les pertes associées. Plus particulièrement, cette DMA impacte les pertes à dépendance de mode avec les pertes optiques les plus élevées pour les modes d'ordre supérieur. Une origine d'atténuation élevée des modes d'ordre le plus supérieur peut être leur couplage à la gaine et les modes de fuite et les effets de micro-courbure. Une autre origine des pertes supplémentaires inattendues apparaissant pour les modes d'ordre le plus supérieur dans des profils à saut d'indice pourrait être une contribution relativement élevée de l'effet de diffusion de lumière aux petits angles (SALS pour « Small Angle Light Scattering Effect »).

10 Une approche pour réduire la DMA en limitant le couplage de modes d'ordre supérieur à la gaine et les modes de fuite est d'agir sur le profil d'indice de réfraction à l'interface gaine/cœur. Par exemple, le document de brevet US 2016/0306108 divulgue une fibre à peu de modes, ayant une cœur à gradient d'indice et une gaine externe comprenant une couche entre le cœur et la tranchée, une tranchée dopée-à-la-baisse aboutant la

15 couche et une région de gaine non-dopée aboutant la tranchée. Le profil d'indice de réfraction de la fibre est configuré pour supporter au moins neuf modes LP pour la transmission d'un signal optique à multiplexage spatial. Bien que d'autres conceptions soient prometteuses en termes de différence d'atténuation DMA en minimisant le couplage avec des modes de non-guidage, elles ne sont pas adaptées aux FMF faiblement couplées.

20 En effet, les profils de cœur à gradient d'indice permettent de diviser les modes LP pris en charge par la fibre en groupes de modes dont les modes au sein d'un groupe de modes ont le même indice effectif. En conséquence, si les différences d'indice effectif entre groupes de modes sont suffisamment éloignées les unes des autres, un couplage entre groupes de modes peut être faible, mais les modes LP différents au sein d'un groupe de modes sont

25 fortement couplés. Ce profil de cœur à gradient d'indice est ainsi utilisé pour combiner à la fois un délai de groupe différentiel faible et une DMA faible entre modes spatiaux. Or, le compromis entre DMA et  $\Delta n_{\text{eff min}}$  n'est pas assez optimal (notamment lors de l'utilisation de systèmes de détection optique sans MIMO ou avec une simple technique MIMO (2 x 2 ou 4 x 4) qui requiert un faible couplage de mode entre modes LP) et requiert du matériel de

30 transmission complexe et coûteux.

Il existe donc un besoin concernant la conception d'une FMF faiblement couplée affichant une différence d'indice effectif élevée suffisante entre modes LP tout en réduisant la DMA, afin de renforcer la capacité de transmission de signaux optiques à multiplexage spatial.

### 5 3. EXPOSÉ DE L'INVENTION

Dans un mode de réalisation particulier de la présente divulgation, on propose une fibre optique comprenant un cœur optique entouré par une gaine optique, dans laquelle le cœur optique a un profil d'indice de réfraction  $\Delta n(r)$  de forme de type trapézoïde, en fonction d'une distance radiale  $r$  au centre du cœur optique, le cœur optique ayant une  
10 partie centrale de rayon  $R1$  et une partie de transition allant du rayon  $R1$  à un rayon  $R2$ , tel que  $R2 > R1$ , ledit profil d'indice de réfraction étant défini par :

- une intégrale de surface  $A_{\text{core}}$  définie comme suit :  $A_{\text{core}} = 2 \int_0^{R2} \Delta n(r). dr = (\Delta n1 + \Delta n2) \times (R1 + R2)$

- une pente de transition  $S$  définie comme suit :  $S = \left| \frac{\Delta n2 - \Delta n1}{R2 - R1} \right|$

15 avec :

$\Delta n1$ , la différence d'indice de réfraction de la partie centrale du cœur optique par rapport à la gaine optique externe ;

$\Delta n2$ , la différence d'indice de réfraction d'une partie de gaine, adjacente à le cœur optique, par rapport à la gaine optique externe ;

20 et dans laquelle :

- l'intégrale de surface  $A_{\text{core}}$  est comprise entre  $180.10^{-3}$  et  $270.10^{-3} \mu\text{m}$  ;

- le rayon  $R2$  est compris entre 6,8 et 11,5  $\mu\text{m}$  ;

- la pente de transition  $S$  est comprise entre  $1,7.10^{-3}$  et  $12.10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ .

25 Une telle fibre optique à peu de modes faiblement couplée affichant une différence d'indice de réfraction effectif élevée suffisante entre modes spatiaux, en comparaison à des fibres FMF de l'art antérieur, tout en maintenant une atténuation en mode différentiel aussi faible que possible. La présente invention repose sur une forme de type trapézoïde de profil d'indice ingénieuse entre le cœur et la gaine optiques conçue pour diminuer les phénomènes de diffusion à l'interface cœur/gaine, de façon à diminuer notablement la  
30 composante SALS de la DMA. Une telle forme trapézoïdale permet de réduire les pertes de

diffusion supplémentaires dans la FMF. En conséquence, plutôt que de se concentrer sur des effets de couplage entre des modes d'ordre le plus supérieur et des modes de gaine qui pénalisent l'atténuation des modes d'ordre supérieur comme dans les solutions de l'art antérieur, la présente invention est basée sur la conception du profil d'indice pour la FMF qui réduit la contribution de la SALS de façon à réduire la DMA.

Une telle approche permet d'améliorer significativement le compromis entre une différence d'indice effectif inter-mode élevée et une faible DMA aussi. Typiquement, une telle FMF faiblement couplée permet d'obtenir une différence d'indice effectif inter-mode  $\Delta n_{\text{eff min}}$  supérieure ou égale à  $0,9 \times 10^{-3}$  combinée à une DMA inférieure ou égale à 0,05 dB/km.

Selon une caractéristique particulière, la différence d'indice de réfraction  $\Delta n_1$  est comprise entre  $13 \cdot 10^{-3}$  et  $18 \cdot 10^{-3}$ .

Selon une caractéristique particulière, un rapport  $R_1/R_2$  du rayon de ladite partie centrale sur le rayon de ladite partie de transition est compris entre 0,30 et 0,85.

Un tel rapport garantit d'obtenir une FMF à couplage de mode faible comme souhaité tout en gardant une DMA aussi faible que possible.

Selon une autre caractéristique particulière, la différence d'indice de réfraction  $\Delta n_2$  est comprise entre  $-1 \cdot 10^{-3}$  et  $1 \cdot 10^{-3}$ , et plus particulièrement entre  $-0,5 \times 10^{-3}$  et  $0,5 \times 10^{-3}$ .

Selon une caractéristique particulièrement avantageuse, la partie centrale du cœur optique comprend une région d'indice de réfraction diminué, appelée cœur à indice diminué interne, allant du centre du cœur optique à un rayon  $R_0$  et ayant une différence d'indice de réfraction par rapport à la gaine optique externe  $\Delta n_0$  tel que  $\Delta n_1 \geq \Delta n_0 \geq (\Delta n_1 - 6 \cdot 10^{-3})$ .

Ajouter une telle portion d'indice de réfraction diminué dans la partie centrale du cœur optique (cœur à indice diminué interne) permet un réajustement de la différence d'indice de réfraction effectif inter-mode  $\Delta n_{\text{eff}}$  de façon à garantir une séparation adéquate entre des modes spatiaux qui sont guidés dans la FMF, augmentant ainsi la capacité de transmission de signaux optiques à multiplexage spatial, en comparaison aux FMF de l'art antérieur.

Selon une autre caractéristique particulière, le cœur à indice diminué interne a une intégrale de surface  $A_0$  et en posant une intégrale de surface  $A_{\text{trap}}$  comme l'intégrale de surface de profil d'indice de réfraction du cœur sans diminution, lesdites intégrales de surface  $A_0$  et  $A_{\text{trap}}$  étant définies comme suit :

$$A_0 = 2 \int_0^{R0} (\Delta n1 - \Delta n(r)) dr$$

$$A_{\text{trap}} = 2 \left( \Delta n1 \cdot R1 + \int_{R1}^{R2} \Delta n(r) dr \right)$$

5 avec un rapport  $A_0/A_{\text{trap}}$  inférieur ou égal à 0,01.

Ainsi, avec un tel rapport, le compromis entre DMA et différence d'indice effective inter-mode est encore amélioré.

Selon une autre caractéristique particulière, la pente de transition  $S$  satisfait l'inégalité suivante :

$$S \geq J \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right)^2 + K \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right) + L$$

10 avec  $J = 650$ ,  $K = -78$  et  $L = 4,0$ .

Un tel profil permet d'obtenir une différence d'indice effectif inter-mode améliorée  $\Delta n_{\text{eff min}}$  supérieure ou égale à  $0,9 \times 10^{-3}$ .

Selon une autre caractéristique particulière, la pente de transition  $S$  satisfait l'inégalité suivante :

$$S \geq J \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right)^2 + K \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right) + L$$

15 avec  $J = 1900$ ,  $K = -209$  et  $L = 7,6$ .

Un tel profil permet d'obtenir une différence d'indice effectif inter-mode  $\Delta n_{\text{eff min}}$  encore améliorée supérieure ou égale à  $1,3 \times 10^{-3}$ .

Selon une autre caractéristique particulière, la pente de transition  $S$  satisfait l'inégalité suivante :

$$S \geq J \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right)^2 + K \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right) + L$$

20 avec  $J = 5800$ ,  $K = -580$  et  $L = 17$ .

Un tel profil permet d'obtenir une différence d'indice de réfraction effectif inter-mode  $\Delta n_{\text{eff min}}$  encore plus améliorée supérieure ou égale à  $1,5 \times 10^{-3}$ .

Selon une autre caractéristique particulière, chaque mode de polarisation linéaire guidé par ladite fibre optique a une aire effective  $A_{\text{eff}}$ , telle que  $A_{\text{eff}} > 80 \mu\text{m}^2$ .

5 Une telle aire effective limite une non-linéarité intra-mode dans la FMF.

Selon un aspect particulier de l'invention, au moins cinq modes LP sont guidés dans la fibre optique.

Selon une autre caractéristique particulière, une atténuation en mode différentiel, DMA, pour tous les modes guidés par ladite fibre optique est telle que :  $\text{DMA} \leq 0,050 \text{ dB/km}$   
10 et plus particulièrement  $\text{DMA} \leq 0,020 \text{ dB/km}$ .

Selon une autre caractéristique particulière, la partie de transition du profil d'indice de réfraction du cœur de type trapézoïde comprend au moins un matériau dopant de concentration changeant graduellement en fonction de la distance radiale  $r$  allant d'une concentration dans la partie centrale du cœur optique à une concentration dans ladite  
15 partie de gaine adjacente au cœur optique.

L'application d'une transition douce d'un ou de plusieurs dopants peut ainsi être utilisée dans le cœur de la fibre pour créer la partie de transition du profil d'indice du cœur (allant du rayon  $R1$  au rayon  $R2$ ).

Selon une autre caractéristique particulière, ledit au moins un matériau dopant  
20 appartient au groupe comprenant : l'oxyde de germanium, l'oxyde de phosphore, l'oxyde de bore, le fluor, ou un autre matériau dopant qui affecte l'indice de réfraction de la silice.

Selon une autre caractéristique particulière, la gaine optique a un indice de réfraction compris entre 1,437 et 1,458.

Un autre aspect de la divulgation concerne un système optique comprenant au  
25 moins une fibre optique telle que décrite ci-dessus dans l'un quelconque de ses modes de réalisation.

#### 4. LISTE DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages des modes de réalisation de la présente divulgation apparaîtront dans la description suivante, donnée à titre d'exemples indicatifs et  
30 non exhaustifs et à partir des dessins annexés, dont :

- la **figure 1** représente graphiquement le profil d'indice de réfraction d'un exemple de FMF faiblement couplée selon un premier mode de réalisation de la présente divulgation ;

5 - la **figure 2** représente graphiquement le profil d'indice de réfraction d'un exemple de FMF faiblement couplée selon un deuxième mode de réalisation de la présente divulgation ;

- la **figure 3** illustre un graphique montrant l'impact de la pente de transition du profil d'indice trapézoïdal et du rapport  $A_0/A_{\text{trap}}$  sur la différence d'indice inter-mode  $\Delta n_{\text{eff min}}$  de la FMF.

## 10 **5. DESCRIPTION DÉTAILLÉE**

Le principe général de la présente divulgation repose sur une approche novatrice et inventive de conception de FMF avec une transition douce du profil d'indice de réfraction du cœur optique à la gaine, de sorte que les pertes de diffusion de lumière supplémentaires dans la FMF soient significativement réduites tout en maintenant une FMF faiblement  
15 couplée. Plus précisément, le but d'une telle conception est d'optimiser le profil d'indice de réfraction du cœur optique, afin que la FMF soit apte à guider une pluralité de modes spatiaux faiblement couplée (typiquement au moins cinq modes LP avec une différence d'indice de réfraction effectif inter-mode  $\Delta n_{\text{eff min}}$  minimale supérieure ou égale à  $0,9 \times 10^{-3}$ ) tout en ayant moins de DMA par rapport aux FMF de l'art antérieur (typiquement une DMA  
20 de moins de 0,05 dB/km).

La lumière parcourant une fibre optique forme en réalité des modes de type hybride, qui sont habituellement désignés par des modes LP (polarisation linéaire). Les modes  $LP_{0p}$  ont deux degrés de liberté en polarisation et sont dégénérés deux fois, les modes  $LP_{mp}$  avec  $m \geq 1$  sont dégénérés quatre fois. Ces dégénérescences ne sont pas comptées lors de la  
25 désignation du nombre de modes LP se propageant dans la fibre. Ainsi, une fibre optique à peu de modes ayant deux modes LP prend en charge la propagation de tous les modes  $LP_{01}$  et  $LP_{11}$ , ou une fibre à peu de modes guidant six modes LP prend en charge la propagation de tous les modes  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{02}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{12}$  et  $LP_{31}$ .

On fait maintenant référence de manière détaillée à des modes de réalisation  
30 relatifs à des fibres optiques à peu de modes selon l'invention, dont des exemples sont

illustrés dans les dessins annexés. Chaque fois que possible, on utilisera les mêmes références numériques sur la totalité des dessins pour se référer aux parties identiques ou similaires.

La description propose donc deux exemples de modes de réalisation pour obtenir le compromis souhaité entre  $\Delta n_{\text{eff min}}$  et DMA : une FMF faiblement couplée de profil d'indice trapézoïdal et une FMF faiblement couplée assistée par un cœur à indice diminué interne. Le deuxième mode de réalisation est détaillé plus tard dans la description.

Tel qu'utilisé ici,  $\Delta n_{\text{eff min}}$  signifie la valeur minimale de la différence d'indice effective, en valeur absolue, entre deux modes LP ultérieurs guidés dans la fibre optique, et  $\Delta n_{\text{eff}}$  est la différence d'indice effectif d'un mode LP donné par rapport à l'indice de réfraction de la gaine.

➤ FMF faiblement couplée avec cœur sans indice diminué

La **figure 1** représente le profil d'indice de réfraction  $n(r)$  d'une fibre optique selon un premier mode de réalisation de la présente invention. Elle décrit la relation entre la différence d'indice de réfraction  $\Delta n$  en fonction de la distance radiale  $r$ , exprimée en micromètres, depuis le centre de la fibre optique. L'axe  $x$  représente une position radiale,  $x = 0$  représentant le centre du cœur optique, et l'axe  $y$  représente l'indice de réfraction, exprimé comme une différence d'indice de réfraction  $\Delta n$ . Telle qu'utilisée ici, l'expression « différence d'indice de réfraction » n'exclut pas une différence d'indice de réfraction de zéro.

La fibre optique a un cœur optique entouré par une gaine optique, et un revêtement entourant la gaine. Le revêtement peut comprendre plusieurs couches ; par exemple, le revêtement peut être un revêtement à double couche. La gaine est formée de deux portions : une portion intermédiaire adjacente au cœur optique et une portion externe (également désignées par gaine intermédiaire et gaine externe respectivement).

Dans ce mode de réalisation particulier, le profil d'indice de réfraction a une forme de trapézoïde, et il présente (en partant du centre de la fibre) :

- une partie centrale du cœur optique ayant un rayon  $R1$  et une différence d'indice de réfraction  $\Delta n1$  sensiblement constante par rapport à la gaine externe ;

- une partie annulaire du cœur optique, dans laquelle l'indice de réfraction diminue, de manière sensiblement linéaire, jusqu'à la distance radiale R2 depuis l'indice de la partie centrale du cœur optique jusqu'à l'indice de la gaine intermédiaire ;

5 - une gaine intermédiaire ayant un rayon R3 et une différence d'indice de réfraction  $\Delta n2$  sensiblement constante par rapport à la gaine externe ;

- une gaine externe allant du rayon R3 à l'extrémité de la partie en verre de la FMF.

Tout au long du présent document, la portion annulaire précitée du cœur optique est également appelée « partie de transition » du profil d'indice de type trapézoïde du cœur.

10 La fibre constitue donc globalement une fibre ayant un profil dit « de type trapézoïde ».

Comme la section transversale de la FMF montrée sur la figure 1 est circulaire-symétrique par rapport au centre du cœur optique, le profil d'indice de réfraction du cœur résultant a une forme de trapézoïde isocèle (le profil d'indice est de forme symétrique par rapport au centre du cœur optique (axe y)).

15 Comme précisé ci-dessus, la partie centrale du profil de cœur a une différence d'indice de réfraction  $\Delta n1$  sensiblement constante par rapport à la gaine externe ( $n_{cl}$ ), la partie de transition du profil de cœur a une différence d'indice de réfraction qui diminue sensiblement linéairement par rapport à la distance radiale. Cette diminution linéaire est définie comme une pente S, dite « pente de transition », définie par l'équation suivante :

$$S = \left| \frac{\Delta n2 - \Delta n1}{R2 - R1} \right|$$

20 Ci-après, chaque section ou partie du profil de fibre optique est définie à l'aide d'intégrales de surface. Le terme « surface » ne doit pas être compris géométriquement mais plutôt doit être compris comme l'aire sous la courbe de profil ayant deux dimensions (exprimées ici en micromètres).

25 Selon l'invention, la partie centrale du cœur optique est définie par une intégrale de surface  $A_{core}$ , définie par les équations suivantes :

$$A_{core} = 2 \int_0^{R2} \Delta n(r) \cdot dr = (\Delta n1 + \Delta n2) \times (R1 + R2)$$

Les paramètres de la fibre, tels que les rayons R1 et R2, les différences d'indice de réfraction  $\Delta n_1$  et  $\Delta n_2$ , sont choisis pour avoir une intégrale de surface  $A_{\text{core}}$  variant dans une plage prédéterminée de valeurs.

La FMF selon cet exemple de mode de réalisation présente typiquement en outre les propriétés suivantes :

- une intégrale de surface  $A_{\text{core}}$  du profil d'indice de cœur variant entre  $180 \cdot 10^{-3}$  et  $270 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$  ;

- un rapport R1/R2 du rayon de la partie centrale sur le rayon de la partie de transition variant entre 0,30 et 0,85 ;

10 - un rayon R2 de la partie de transition variant entre 6,8 et 11,5  $\mu\text{m}$  ;

- une différence d'indice de réfraction  $\Delta n_1$  variant entre  $13 \cdot 10^{-3}$  et  $18 \cdot 10^{-3}$  ;

- une différence d'indice de réfraction  $\Delta n_2$  variant entre  $-1 \cdot 10^{-3}$  et  $1 \cdot 10^{-3}$  et plus particulièrement entre  $-0,5 \times 10^{-3}$  et  $0,5 \times 10^{-3}$  ;

- une pente de transition S variant entre  $1,7 \cdot 10^{-3}$  et  $12 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ .

15 Grâce à ces paramètres de profil, des FMF selon l'invention sont aptes à guider au moins cinq modes LP tout en affichant un compromis optimisé entre  $\Delta n_{\text{eff min}}$  et DMA. Ici, les inventeurs de la présente invention ont découvert que de tels paramètres de profil permettent d'obtenir un faible couplage de mode (c.-à-d. une différence d'indice de réfraction effectif inter-mode minimale  $\Delta n_{\text{eff min}}$  accrue) et une faible DMA aussi.

20 Par « faible couplage de mode », on entend la différence d'indice de réfraction effectif inter-mode minimale  $\Delta n_{\text{eff min}} \geq 0,9 \times 10^{-3}$  et par « faible DMA », on veut dire l'atténuation en mode différentiel  $\text{DMA} \leq 0,050 \text{ dB/km}$ .

25 Une telle forme de profil trapézoïdale est obtenue par un changement graduel dans la concentration d'un ou de plusieurs matériaux dopants dans la partie de transition du cœur optique de R1 à R2. Le changement graduel dans la concentration en dopant est basé sur la valeur souhaitée de la pente de transition S (définie ci-dessus). De nombreux dopants peuvent être utilisés dans le contexte de la présente invention, tels que, par exemple, le germanium et le phosphore, qui tous deux permettent l'augmentation de l'indice de réfraction, et le bore et le fluor, qui tous deux permettent de diminuer l'indice de réfraction.

30 La personne qualifiée dans l'art comprendra facilement que ces dopants (à l'exception du

fluor) sont présents dans la matrice de silice sous la forme d'oxydes. D'où, l'utilisation de germanium comme moyen dopant, par exemple, l'utilisation de dioxyde de germanium ( $\text{GeO}_2$ ).

5      ➤ FMF faiblement couplée avec cœur à indice diminué interne

La **figure 2** représente le profil d'indice de réfraction  $n(r)$  d'une fibre optique selon un deuxième mode de réalisation de la présente invention. La figure 2 diffère de la figure 1 par la présence d'un cœur à indice diminué interne ingénieusement dimensionné dans le profil d'indice de réfraction de la FMF, afin d'assurer une séparation adéquate entre des  
10 modes LP guidés dans la fibre.

Comme le montre la figure, la partie centrale du profil de cœur comprend une région d'indice de réfraction diminué, appelée cœur à indice diminué interne, allant du centre du cœur optique au rayon  $R_0$  et ayant une différence d'indice de réfraction  $\Delta n_0$  sensiblement constante par rapport à la gaine externe ( $n_{cl}$ ) telle que :  $\Delta n_1 \geq \Delta n_0 \geq (\Delta n_1 - 6 \cdot 10^{-3})$ . L'ajout d'un tel cœur à indice diminué interne dans la partie centrale du cœur  
15 optique comme le montre la figure 2 permet de réajuster la différence d'indice effective inter-mode  $\Delta n_{eff}$  et d'améliorer la capacité de transmission de signaux optiques à multiplexage spatial, en comparaison aux FMF de l'art antérieur. En conséquence, dans cet exemple de mode de réalisation, le profil trapézoïdal du cœur est d'une certaine manière  
20 tronqué vers son centre avec une région d'indice de réfraction diminué pour améliorer le couplage de mode de la FMF. Une telle tranchée a par exemple un rayon externe  $R_0$  compris entre 0,8 et  $R_1 - 0,8 \mu\text{m}$ .

Telle qu'utilisée ici, l'expression « cœur à indice diminué interne » est utilisée pour désigner une portion radiale de la fibre optique ayant un indice de réfraction plus faible que  
25 l'indice de réfraction de la partie centrale du cœur optique.

Ci-après, chaque section ou partie du profil de fibre optique est à nouveau définie à l'aide d'intégrales de surface. Le terme « surface » ne doit pas être compris géométriquement mais plutôt doit être compris comme l'aire sous la courbe de profil ayant deux dimensions (exprimées ici en micromètres).

Selon l'invention, le cœur à indice diminué interne est défini par une intégrale de surface  $A_0$  comme suit :

$$A_0 = 2 \int_0^{R0} (\Delta n1 - \Delta n(r)) dr$$

Considérons à présent l'intégrale de surface  $A_{\text{trap}}$  comme l'intégrale de surface du profil d'indice de réfraction du cœur sans tranchée, définie par l'équation suivante :

$$A_{\text{trap}} = 2 \left( \Delta n1 \cdot R1 + \int_{R1}^{R2} \Delta n(r) dr \right)$$

5 Les intégrales de surface  $A_0$  et  $A_{\text{trap}}$  sont choisies pour avoir un rapport  $A_0/A_{\text{trap}}$  inférieur ou égal à 0,01. Avec un tel rapport, le compromis entre DMA et  $\Delta n_{\text{eff min}}$  est encore plus amélioré.

Il convient de noter qu'un rapport choisi avec  $A_0$  égal à zéro revient à afficher le profil d'indice du premier mode de réalisation. Il convient également de noter que les propriétés évoquées ci-dessus en relation avec la figure 1 ( $R1/R2$ ,  $R2$ ,  $\Delta n1$ ,  $\Delta n2$ ,  $S$ ) s'appliquent à nouveau ici pour ce second exemple de mode de réalisation.

Les inventeurs de la présente invention ont en outre découvert que la pente et le rapport  $A_0/A_{\text{trap}}$  ont un effet sur la différence d'indice de réfraction effectif inter-mode  $\Delta n_{\text{eff}}$ , et ils ont développé l'inégalité suivante pour assurer un guidage d'au moins cinq modes LP avec un faible couplage de mode, tout en gardant une DMA faible (c.-à-d.,  $DMA \leq 0,050$  dB/km) :

$$S \geq J \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right)^2 + K \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right) + L$$

avec  $J = 650$ ,  $K = -78$  et  $L = 4,0$  pour obtenir  $\Delta n_{\text{eff min}} \geq 0,9 \times 10^{-3}$  (désigné par « critère 1 ») ; ou

avec  $J = 1\,900$ ,  $K = -209$  et  $L = 7,6$  pour obtenir  $\Delta n_{\text{eff min}} \geq 1,3 \times 10^{-3}$  (désigné par « critère 2 ») ; ou

avec  $J = 5\,800$ ,  $K = -580$  et  $L = 17$  pour obtenir  $\Delta n_{\text{eff min}} \geq 1,5 \times 10^{-3}$  (désigné par « critère 3 »).

Des dopants peuvent être utilisés dans la matrice de silice, tels que, par exemple, le dioxyde de bore et/ou le fluor, pour diminuer l'indice de réfraction par rapport à l'indice de

réfraction ( $n_{co}$ ) de la partie centrale du cœur de façon à obtenir le cœur à indice diminué interne avec la différence d'indice  $\Delta n_0$  souhaitée. Cette portion de cœur est dite « dopée à la baisse » par rapport à la partie centrale du cœur.

5 En variante, la concentration de dopants augmentant l'indice de réfraction, tels que, par exemple, l'oxyde de germanium et/ou l'oxyde de phosphore, est plus faible dans le cœur à indice diminué interne ayant une différence d'indice  $\Delta n_0$  que dans la partie centrale du cœur ayant une différence d'indice  $\Delta n_1$  de R0 à R1.

10 La **figure 3** illustre un graphique montrant l'impact de la pente de transition S du profil d'indice trapézoïdal de la  $\Delta n_{eff\ min}$  de la FMF. Ce graphique présente la relation entre la pente S du profil d'indice trapézoïdal (axe y) en fonction du rapport d'intégrale de surface  $A_0/A_{trap}$  (axe x) ( $x = 0$  représentant le premier exemple de mode de réalisation et  $x > 0$  représentant le second exemple de mode de réalisation). Les courbes 10, 20 et 30 représentent les courbes obtenues par simulation numérique avec des paramètres de fibre qui donnent, respectivement, les différences d'indice effectif inter-mode minimales suivantes :  $\Delta n_{eff\ min} \geq 0,9 \times 10^{-3}$  (ligne continue),  $\Delta n_{eff\ min} \geq 1,3 \times 10^{-3}$  (ligne discontinue) et  $\Delta n_{eff\ min} \geq 1,5 \times 10^{-3}$  (ligne pointillée). Les lignes noires, les cercles noirs et les étoiles noires sur le graphique sont des exemples issus du tableau 1 évoqué ci-dessous satisfaisant respectivement les conditions suivantes :  $\Delta n_{eff\ min} \geq 0,9 \times 10^{-3}$ ,  $\Delta n_{eff\ min} \geq 1,3 \times 10^{-3}$  et  $\Delta n_{eff\ min} \geq 1,5 \times 10^{-3}$ .

20 Le tableau 1 donne les paramètres de profils d'indice de douze exemples de FMF selon les exemples de modes de réalisation des figures 1 (Ex. 1) et 2 (Ex. 2 à Ex. 12) selon l'invention. Les paramètres de profil ont été établis à une longueur d'onde de 633 nm.

Tableau 1

Exemples	R0 ( $\mu\text{m}$ )	R1 ( $\mu\text{m}$ )	R2 ( $\mu\text{m}$ )	R3 ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta n0$ ( $10^{-3}$ )	$\Delta n1$ ( $10^{-3}$ )	$\Delta n2$ ( $10^{-3}$ )	Acore ( $10^{-3} \times \mu\text{m}$ )	AO/Atrap	S ( $10^{-3}/\mu\text{m}$ )	f	$n_{cl}$
Ex.1	-	5,54	8,54	19,75	-	13,5	0	190	0,000	4,5	0,65	1,4573
Ex.2	1,05	4,93	9,30	19,75	14,7	16,7	-0,2	234	0,017	3,9	0,53	1,4573
Ex.3	1,55	6,51	9,30	19,75	14,2	16,2	-0,2	250	0,023	5,9	0,70	1,4573
Ex.4	4,55	5,46	10,30	19,75	14,2	16,2	-0,2	237	0,071	3,4	0,53	1,4573
Ex.5	1,55	4,93	9,30	19,75	14,7	16,7	-0,2	232	0,025	3,9	0,53	1,4573
Ex.6	3,55	5,19	9,80	19,75	14,7	16,7	-0,2	236	0,036	2,7	0,53	1,4573
Ex.7	3,55	5,46	10,30	19,75	14,2	16,2	-0,2	241	0,055	3,4	0,53	1,4573
Ex.8	2,08	6,51	9,30	19,75	14,7	16,7	-0,2	256	0,030	6,1	0,70	1,4573
Ex.9	3,05	6,86	9,80	19,75	14,2	16,2	-0,2	258	0,044	5,6	0,70	1,4573
Ex.10	1,40	6,99	9,57	19,75	10,7	15,7	-0,2	249	0,053	6,1	0,73	1,4573
Ex.11	3,57	5,94	10,62	19,75	12,7	15,7	-0,2	241	0,081	3,4	0,56	1,4573
Ex.12	3,55	5,46	10,30	19,75	14,2	16,2	-0,2	241	0,055	3,4	0,53	1,4411

Il convient de noter que seul le 1<sup>er</sup> exemple (Ex. 1) illustre l'exemple de la figure 1 (c.-à-d. la FMF faiblement couplée sans diminution), tandis que les onze autres exemples (Ex. 2 à Ex. 12) illustrent l'exemple de la figure 2 (c.-à-d. la FMF faiblement couplée de cœur à indice diminué interne). Le 12<sup>e</sup> exemple (Ex. 12) illustre un profil trapézoïdal identique à celui du 7<sup>e</sup> exemple (Ex. 7) mais avec un indice de réfraction  $n_{cl}$  de 1,4411 et une différence d'indice de réfraction  $\Delta n1$  proche de celui de la silice. Les résultats obtenus avec ces paramètres de profil sont établis plus tard dans le tableau 2.

Comme évoqué ci-dessus en relation avec le contexte de l'invention, la DMA impacte les pertes à dépendance de mode avec des pertes optiques les plus élevées pour les modes d'ordre supérieur. Une origine de la DMA élevée peut être due au couplage des modes d'ordre le plus supérieur avec la gaine ou des modes à fuite lorsque les indices effectifs des modes d'ordre supérieur sont trop proches de l'indice de réfraction de la gaine. Or, lorsqu'une différence d'indice effectif entre le mode d'ordre supérieur et les modes de gaine est suffisamment élevée (de préférence plus grande que  $0,8 \times 10^{-3}$ ), les inventeurs attribuent l'origine des pertes supplémentaires inattendues apparaissant pour les modes d'ordre supérieur à des contributions de diffusion de lumière aux petits angles (SALS). Pour chaque mode LP guidé dans la FMF à une longueur d'onde de 1 550 nm, plus de 70 % des pertes sont dues à la diffusion de Rayleigh. Les pertes restantes couvrent, d'une part, les pertes induites par des mécanismes d'absorption (pertes conjointes par pertes de pic OH, infrarouge et ultraviolet) et, d'autre part, des pertes induites par SALS. La DMA est considérée comme étant la différence en termes de pertes (comprenant les pertes de

Rayleigh, les pertes par absorption et les pertes de SALS) entre le mode LP ayant les pertes les plus élevées et le mode LP ayant les pertes les plus faibles.

L'un des buts de l'invention est de réduire autant que possible la composante SALS de la DMA afin de renforcer la capacité de transmission de signaux optiques à multiplexage spatial sur des FMF.

Un paramètre pour évaluer la composante SALS de la perte de chaque mode guidé dans la FMF a été établi comme suit (exprimé en dB/km) :

$$C_{ei}(\text{mode } i) = 8 \pi \left( \frac{A_{core}}{\lambda} \right) \cdot 10^3 \cdot C_0(\text{mode } i)$$

$$\text{avec } C_0(\text{mode } i) = \iint \frac{(n(r)^2 - n(r+dr)^2)^2}{n(r+dr)^4} \times E_i(r, \theta)^2 r dr d\theta$$

$r$  étant la distance radiale au centre de l'optique et  $\theta$  la composante azimutale en coordonnées polaires et  $E_i(r, \theta)$  la distribution d'amplitude de champ modal au rayon  $r$  et à l'angle  $\theta$  du mode  $i$ .

Concevoir un tel profil d'indice de réfraction trapézoïdal avec des pertes supplémentaires inattendues tel que  $C_{ei}(\text{mode } i) \leq 0,05$  dB/km voire tel que  $C_{ei}(\text{mode } i) \leq 0,015$  dB/km permet de satisfaire les besoins spécifiques en termes à la fois de perte réduite et de FMF faiblement couplée (comme le montre le tableau 2 ci-dessous).

De plus, afin de limiter la non-linéarité intra-mode (et ainsi de garder de bonnes propriétés de guidage optique au sein de la FMF), un profil d'indice de réfraction de la FMF est conçu pour qu'une aire effective  $A_{eff}$  de chaque mode guidé soit plus grande que  $80 \mu\text{m}^2$ .

Le tableau 2 donne les caractéristiques  $\Delta n_{eff \min}$ , DMA et, pour chaque mode LP guidé par la fibre, le coefficient de perte supplémentaire inattendue  $C_{ei}$ , la perte totale TL résultant de mécanismes de perte d'absorption et de diffusion, les pertes dues à la courbure BL maximales (pour un rayon de 10 mm) et l'aire effective  $A_{eff}$ , avec les profils d'indice de douze exemples des FMF du tableau 1.

Telle qu'utilisée ici, l'aire effective d'une fibre optique est l'aire de la fibre optique dans laquelle la lumière se propage et est déterminée au mode spécifié, à une longueur d'onde de 1 550 nm, sauf spécification contraire. L'aire effective  $A_{eff \mu\nu}$  du mode  $LP_{\mu\nu}$  est définie comme suit :

- si  $\mu \neq 0$  :



Ex. 1	1,0	0,015	LP01	11,2	101	0,000	0,229	< 0,001
			LP11	8,4	97	0,001	0,228	< 0,001
			LP21	5,0	110	0,001	0,226	< 0,001
			LP02	4,0	105	0,001	0,226	< 0,001
			LP31	1,0	133	0,002	0,214	< 50
Ex. 2	1,2	0,010	LP01	14,0	97	0,002	0,245	< 0,001
			LP11	11,1	91	0,003	0,245	< 0,001
			LP21	7,4	103	0,004	0,243	< 0,001
			LP02	6,2	101	0,006	0,243	< 0,001
			LP31	3,1	118	0,006	0,239	< 0,001
			LP12	1,8	136	0,005	0,235	< 10
Ex. 3	1,3	0,002	LP01	13,9	128	0,002	0,242	< 0,001
			LP11	11,7	111	0,003	0,244	< 0,001
			LP21	8,7	119	0,005	0,245	< 0,001
			LP02	7,4	109	0,007	0,243	< 0,001
			LP31	5,1	125	0,008	0,245	< 0,001
			LP12	3,4	119	0,009	0,244	< 0,01
			LP41	1,1	137	0,010	0,242	< 1
Ex. 4	1,3	0,012	LP01	12,7	136	0,003	0,237	< 0,001
			LP11	10,6	114	0,005	0,241	< 0,001
			LP21	7,8	121	0,006	0,241	< 0,001
			LP02	6,5	99	0,004	0,235	< 0,001
			LP31	4,3	132	0,007	0,238	< 0,001
			LP12	2,3	139	0,005	0,229	< 10
Ex. 5	1,4	0,011	LP01	13,8	100	0,003	0,244	< 0,001
			LP11	11,1	91	0,003	0,245	< 0,001
			LP21	7,4	103	0,004	0,243	< 0,001
			LP02	6,0	102	0,006	0,241	< 0,001
			LP31	3,1	118	0,006	0,238	< 0,001
			LP12	1,7	139	0,005	0,234	< 10

<b>Ex. 6</b>	1,6	0,014	LP01	13,3	123	0,003	0,241	< 0,001
			LP11	11,1	101	0,005	0,245	< 0,001
			LP21	7,9	110	0,006	0,244	< 0,001
			LP02	6,3	93	0,004	0,237	< 0,001
			LP31	4,0	123	0,006	0,240	< 0,001
			LP12	2,0	142	0,006	0,231	< 10
<b>Ex. 7</b>	1,6	0,012	LP01	13,0	135	0,003	0,239	< 0,001
			LP11	11,0	109	0,004	0,243	< 0,001
			LP21	8,1	119	0,005	0,242	< 0,001
			LP02	6,5	100	0,004	0,235	< 0,001
			LP31	4,5	131	0,006	0,239	< 0,001
			LP12	2,5	145	0,006	0,231	< 1
<b>Ex. 8</b>	1,5	0,004	LP01	14,2	132	0,003	0,244	< 0,001
			LP11	12,1	110	0,004	0,247	< 0,001
			LP21	9,2	118	0,006	0,248	< 0,001
			LP02	7,7	107	0,008	0,244	< 0,001
			LP31	5,6	123	0,008	0,248	< 0,001
			LP12	3,6	118	0,010	0,247	< 0,001
			LP41	1,5	134	0,011	0,246	< 1
<b>Ex. 9</b>	1,6	0,006	LP01	13,6	156	0,003	0,241	< 0,001
			LP11	11,9	122	0,004	0,244	< 0,001
			LP21	9,2	128	0,005	0,245	< 0,001
			LP02	7,6	107	0,007	0,239	< 0,001
			LP31	6,0	133	0,007	0,245	< 0,001
			LP12	3,9	128	0,010	0,242	< 0,001
			LP41	2,2	142	0,010	0,244	< 0,1
<b>Ex. 10</b>	1,6	0,003	LP01	13,4	149	0,006	0,243	< 0,001
			LP11	11,5	121	0,004	0,242	< 0,001
			LP21	8,8	129	0,005	0,242	< 0,001
			LP02	7,2	126	0,015	0,244	< 0,001

			LP31	5,5	133	0,007	0,243	< 0,001
			LP12	3,8	123	0,011	0,245	< 0,01
			LP41	1,8	142	0,010	0,242	< 10
<b>Ex. 11</b>	1,3	0,074	LP01	12,4	163	0,006	0,238	< 0,001
			LP11	10,8	120	0,006	0,242	< 0,001
			LP21	8,2	127	0,006	0,241	< 0,001
			LP02	6,2	103	0,005	0,229	< 0,001
			LP31	4,9	138	0,006	0,238	< 0,001
			LP12	2,6	154	0,008	0,229	< 10
			LP41	1,2	156	0,007	0,233	< 10
<b>Ex. 12</b>	1,6	0,005	LP01	13,0	135	0,003	0,168	< 0,001
			LP11	11,0	109	0,004	0,168	< 0,001
			LP21	8,1	119	0,005	0,169	< 0,001
			LP02	6,5	100	0,004	0,170	< 0,001
			LP31	4,5	131	0,006	0,171	< 0,001
			LP12	2,5	145	0,006	0,173	< 1

Comme cela est démontré ici, grâce aux paramètres de profil choisis selon l'invention (regroupés dans le tableau 1), chaque FMF mise à l'essai est apte à guider au moins cinq modes LP, avec  $\Delta n_{\text{eff min}} \geq 0,9 \times 10^{-3}$ ,  $C_{\text{el}} \leq 0,015$  dB/km et  $\text{DMA} \leq 0,02$  dB/km.

5 Tous les exemples des tableaux 1 et 2 satisfont les exigences structurales suivantes :

- l'intégrale de surface  $A_{\text{core}}$  est comprise entre  $180.10^{-3}$  et  $270.10^{-3} \mu\text{m}$  ;
- le rayon R2 est compris entre 6,8 et 11,5  $\mu\text{m}$  ;
- la différence d'indice de réfraction  $\Delta n1$  est comprise entre  $13.10^{-3}$  et  $18.10^{-3}$  ;
- la pente de transition S est comprise entre  $1,7.10^{-3}$  et  $12.10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ .

10 Dans un mode de réalisation préféré supplémentaire, la valeur du rayon R3 de la portion intermédiaire de la gaine est telle que  $R3 \geq 1,8 \times R2$ .

Selon une caractéristique particulière, l'indice de réfraction de la gaine externe ( $n_{\text{cl}}$ ) est choisi pour être proche de l'indice de réfraction de la silice. Dans un autre exemple de mode de réalisation, l'indice de réfraction de la gaine externe ( $n_{\text{cl}}$ ) peut être choisi entre

1,437 et 1,458, ou en variante, l'indice de réfraction du cœur optique est choisi pour être proche de l'indice de la silice pour réduire les pertes totales de la FMF. De cette manière, l'indice de réfraction de la gaine ( $n_{cl}$ ) peut être dopé à la baisse jusqu'à  $-20 \cdot 10^{-3}$  par rapport à l'indice de réfraction de la silice afin de donner des FMF de perte ultra-faible en réduisant leur contribution de Rayleigh (grâce à la structure de cœur pauvre en Ge ou de silice pure).

Référons-nous à présent au tableau 3 qui donne les paramètres de profils d'indice de six exemples comparatifs (Comp.Ex.1 à Comp.Ex.6) de fibres optiques en dehors de la portée de la présente invention, c.à.d. qui ne satisfont pas les critères de la présente invention.

10

**Tableau 3**

Exemples	R1 ( $\mu\text{m}$ )	R2 ( $\mu\text{m}$ )	R3 ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta n_0$ ( $10^{-3}$ )	$\Delta n_1$ ( $10^{-3}$ )	$\Delta n_2$ ( $10^{-3}$ )	$A_{\text{core}}$ ( $10^{-3} \mu\text{m}$ )	$A_0/A_{\text{trap}}$	S ( $10^{-3}/\mu\text{m}$ )	r
Comp. Ex.1	5,06	11,50	19,75	-	15,7	-0,2	263	0,000	2,5	0,44
Comp. Ex.2	7,29	8,28	19,75	-	16,7	-0,2	262	0,000	17,0	0,88
Comp. Ex.3	8,28	8,28	19,75	-	15,7	-0,2	263	0,000	$\infty$	1,00
Comp. Ex.4	8,01	8,01	19,75	14,7	16,7	-0,2	260	0,041	$\infty$	1,00
Comp. Ex.5	2,51	11,64	19,75	11,5	13,5	-0,2	190	0,020	1,5	0,22
Comp. Ex.6	5,73	10,82	19,75	10,7	15,7	-0,2	228	0,131	3,1	0,53

15

Comme pour le tableau 2, le tableau 4 donne les caractéristiques  $\Delta n_{\text{eff min}}$ , DMA et, pour chaque mode LP guidé par la fibre, le coefficient de perte supplémentaire inattendue  $C_{cl}$ , la perte totale TL résultant de mécanismes de perte d'absorption et de diffusion, les pertes dues à la courbure BL maximales (pour un rayon de 10 mm) et l'aire effective  $A_{\text{eff}}$ , avec les profils d'indice des six exemples de fibres optiques du tableau 3 ci-dessus.

20

Tableau 4

Exemples	$\Delta n_{\text{effmin}}$ ( $10^{-3}$ )	DMA (dB/km)	Modes LP	$\Delta n_{\text{eff}}$ ( $10^{-3}$ )	$A_{\text{eff}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$C_{\text{el}}$ (dB/km)	TL (dB/km)	BL (dB/tour)
<b>Comp.</b> Ex.1	0,8	0,008	LP01	13,4	112	0,001	0,240	< 0,001
			LP11	11,0	112	0,002	0,239	< 0,001
			LP21	7,9	129	0,004	0,238	< 0,001
			LP02	7,2	123	0,004	0,239	< 0,001
			LP31	4,5	146	0,005	0,233	< 0,001
			LP12	3,4	153	0,004	0,232	< 0,1
<b>Comp.</b> Ex.2	1,0	0,015	LP01	14,5	120	0,003	0,246	< 0,001
			LP11	12,2	111	0,007	0,250	< 0,001
			LP21	9,2	116	0,012	0,254	< 0,001
			LP02	8,2	100	0,013	0,256	< 0,001
			LP31	5,6	119	0,017	0,259	< 0,001
			LP12	3,7	107	0,019	0,259	< 0,01
			LP41	1,5	126	0,023	0,262	< 10
<b>Comp.</b> Ex.3	1,0	0,069	LP01	14,6	125	0,009	0,253	< 0,001
			LP11	12,4	115	0,023	0,266	< 0,001
			LP21	9,5	120	0,040	0,283	< 0,001
			LP02	8,6	103	0,045	0,288	< 0,001
			LP31	6,0	123	0,059	0,302	< 0,001
			LP12	4,2	109	0,066	0,309	< 0,01
			LP41	2,0	129	0,080	0,321	< 10
<b>Comp.</b> Ex.4	1,7	0,076	LP01	14,2	149	0,015	0,256	< 0,001
			LP11	12,3	117	0,028	0,271	< 0,001
			LP21	9,6	121	0,046	0,289	< 0,001

			LP02	7,9	101	0,054	0,289	< 0,001
			LP31	6,1	123	0,068	0,310	< 0,001
			LP12	3,9	115	0,080	0,317	< 0,001
			LP41	2,2	129	0,092	0,331	< 0,01
<b>Comp.</b>								
<b>Ex.5</b>	0,4	0,013	LP01	10,3	86	0,002	0,228	< 0,001
			LP11	7,1	99	0,002	0,223	< 0,001
			LP21	3,6	137	0,002	0,215	< 0,01
			LP02	3,3	171	0,002	0,216	< 1
<b>Comp.</b>								
<b>Ex.6</b>	0,5	0,022	LP01	11,9	174	0,012	0,244	< 0,001
			LP11	10,5	119	0,010	0,246	< 0,001
			LP21	8,0	127	0,008	0,243	< 0,001
			LP02	5,2	113	0,008	0,223	< 0,001
			LP31	4,8	139	0,007	0,238	< 0,001
			LP12	2,2	175	0,012	0,228	< 50
			LP41	1,1	160	0,006	0,231	< 10

Comp.Ex.1 est un exemple de fibre optique ayant un profil de cœur en forme de trapézoïde ( $A_0/A_{\text{trap}} = 0$ ) caractérisé par une pente  $S$  qui ne satisfait pas le « critère 1 ». En conséquence,  $\Delta n_{\text{eff min}}$  entre les modes LP21 et LP02 est trop petite.

5 Comp.Ex.2 est un exemple de fibre optique ayant un profil de cœur en forme de trapézoïde avec un centre diminué caractérisé par une pente  $S$  qui est trop importante. En conséquence, la transition cœur-gaine est trop nette pour les modes d'ordre le plus supérieur et un coefficient de perte supplémentaire inattendue  $C_{\text{el}}$  de LP12 et LP41 n'est pas souhaitable ( $C_{\text{el}} > 0,015$  dB/km).

10 Comp.Ex.3 est un exemple de fibre optique ayant un profil à saut d'indice. Le coefficient de perte supplémentaire inattendue  $C_{\text{el}}$  pour les modes LP21, LP02, LP31, LP12 et LP41 n'est pas souhaitable car supérieur à 0,02 dB/km. En conséquence, la DMA est trop

élevée ( $DMA > 0,05$  dB/km) pour satisfaire les demandes de capacité de communication par fibre.

5 Comp.Ex.4 est un exemple de fibre optique ayant un profil à saut d'indice avec une partie de centre à indice diminué permettant d'obtenir une différence d'indice effectif inter-mode minimale améliorée et suffisamment élevée en comparaison à Comp.Ex.3 ( $\Delta n_{\text{eff min}} > 1,5 \times 10^{-3}$ ) mais des pertes supplémentaires inattendues trop élevées ( $C_{\text{el}} > 0,02$  dB/km). En conséquence, la DMA est trop élevée ( $DMA > 0,05$  dB/km) pour satisfaire les demandes de capacité de communication par fibre.

10 Comp.Ex.5 est un exemple de fibre optique ayant un profil de cœur en forme de trapézoïde avec un centre diminué caractérisé par une pente  $S$  qui est trop petite et ne satisfait pas le « critère 1 ». En conséquence, seuls quatre modes LP sont guidés et  $\Delta n_{\text{eff min}}$  entre les modes LP21 et LP02 est trop petite.

15 Comp.Ex.6 est un exemple de fibre optique ayant un profil de cœur en forme de trapézoïde avec un centre diminué caractérisé par une pente  $S$  qui ne satisfait pas le « critère 1 » et un rapport  $A_0/A_{\text{trap}}$  supérieur à 0,1. En conséquence,  $\Delta n_{\text{eff min}}$  entre les modes LP02 et LP31 est trop petite.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux exemples de réalisation ci-dessus et représentés, à partir desquels on pourra prévoir d'autres modes de réalisation et d'autres formes de réalisation, sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

### REVENDEICATIONS

1. Fibre optique comprenant un cœur optique entourée par une gaine optique, dans laquelle le cœur optique a un profil d'indice de réfraction  $\Delta n(r)$  de forme de type trapézoïde, en fonction d'une distance radiale  $r$  au centre du cœur optique, le cœur optique ayant une partie centrale de rayon  $R1$  et une partie de transition allant du rayon  $R1$  à un rayon  $R2$ , tel que  $R2 > R1$ , ledit profil d'indice de réfraction étant défini par :

- une intégrale de surface  $A_{core}$  définie comme suit :

$$A_{core} = 2 \int_0^{R2} \Delta n(r). dr = (\Delta n1 + \Delta n2) \times (R1 + R2)$$

- une pente de transition  $S$  définie comme suit :

$$S = \left| \frac{\Delta n2 - \Delta n1}{R2 - R1} \right|$$

avec :

$\Delta n1$ , la différence d'indice de réfraction de la partie centrale du cœur optique par rapport à la gaine optique externe ;

$\Delta n2$ , la différence d'indice de réfraction d'une partie de gaine, adjacente à le cœur optique, par rapport à la gaine optique externe ;

et dans laquelle :

- l'intégrale de surface  $A_{core}$  est comprise entre  $180.10^{-3}$  et  $270.10^{-3} \mu m$  ;
- le rayon  $R2$  est compris entre 6,8 et 11,5  $\mu m$  ;
- la pente de transition  $S$  est comprise entre  $1,7.10^{-3}$  et  $12.10^{-3} \mu m^{-1}$ .

2. Fibre optique selon la revendication 1, dans laquelle la différence d'indice de réfraction  $\Delta n1$  est comprise entre  $13.10^{-3}$  et  $18.10^{-3}$ .

3. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans laquelle un rapport  $R1/R2$  du rayon  $R1$  de ladite partie centrale sur le rayon  $R2$  de ladite partie de transition est compris entre 0,30 et 0,85.

4. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans laquelle la différence d'indice de réfraction  $\Delta n2$  est comprise entre  $-1.10^{-3}$  et  $1.10^{-3}$ , et plus particulièrement entre  $-0,5 \times 10^{-3}$  et  $0,5 \times 10^{-3}$ .

5. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans laquelle la partie centrale du cœur optique comprend une région d'indice de réfraction diminué, appelée cœur à indice diminué interne, allant du centre du cœur optique à un rayon  $R_0$  et ayant une différence d'indice de réfraction par rapport à la gaine optique externe  $\Delta n_0$  tel que  $\Delta n_1 \geq \Delta n_0 \geq (\Delta n_1 - 6 \cdot 10^{-3})$ .

6. Fibre optique selon la revendication 5, dans laquelle le cœur à indice diminué interne a une intégrale de surface  $A_0$  et en posant une intégrale de surface  $A_{\text{trap}}$  comme l'intégrale de surface de profil d'indice de réfraction du cœur sans diminution, lesdites intégrales de surface  $A_0$  et  $A_{\text{trap}}$  étant définies comme suit :

$$A_0 = 2 \int_0^{R_0} (\Delta n_1 - \Delta n(r)) dr$$

$$A_{\text{trap}} = 2 \left( \Delta n_1 \cdot R_1 + \int_{R_1}^{R_2} \Delta n(r) dr \right)$$

avec un rapport  $A_0/A_{\text{trap}}$  inférieur ou égal à 0,01.

7. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 5 et 6, dans laquelle la pente de transition  $S$  satisfait l'inégalité suivante :

$$S \geq J \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right)^2 + K \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right) + L$$

avec  $J = 650$ ,  $K = -78$  et  $L = 4,0$ .

8. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 5 et 6, dans laquelle la pente de transition  $S$  satisfait l'inégalité suivante :

$$S \geq J \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right)^2 + K \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right) + L$$

avec  $J = 1900$ ,  $K = -209$  et  $L = 7,6$ .

9. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 5 et 6, dans laquelle la pente de transition  $S$  satisfait l'inégalité suivante :

$$S \geq J \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right)^2 + K \left( \frac{A_0}{A_{\text{trap}}} \right) + L$$

avec  $J = 5800$ ,  $K = -580$  et  $L = 17$ .

10. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans laquelle chaque mode de polarisation linéaire guidé par ladite fibre optique a une aire effective  $A_{\text{eff}}$ , telle que  $A_{\text{eff}} > 80 \mu\text{m}^2$ .
11. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans laquelle au moins cinq modes LP sont guidés.
12. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, dans laquelle une atténuation en mode différentiel, DMA, pour tous les modes guidés par ladite fibre optique est telle que :  $\text{DMA} \leq 0,050 \text{ dB/km}$  et plus particulièrement  $\text{DMA} \leq 0,020 \text{ dB/km}$ .
13. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans laquelle la partie de transition du profil d'indice de réfraction du cœur de type trapézoïde comprend au moins un matériau dopant de concentration changeant graduellement en fonction de la distance radiale  $r$  allant d'une concentration dans la partie centrale du cœur optique à une concentration dans ladite partie de gaine adjacente au cœur optique.
14. Fibre optique selon la revendication 13, dans laquelle ledit au moins un matériau dopant appartient au groupe comprenant : l'oxyde de germanium, l'oxyde de phosphore, l'oxyde de bore, le fluor.
15. Fibre optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, dans laquelle la gaine optique a un indice de réfraction compris entre 1,437 et 1,458.
16. Système de transmission optique comprenant au moins une fibre optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 15.

1/2

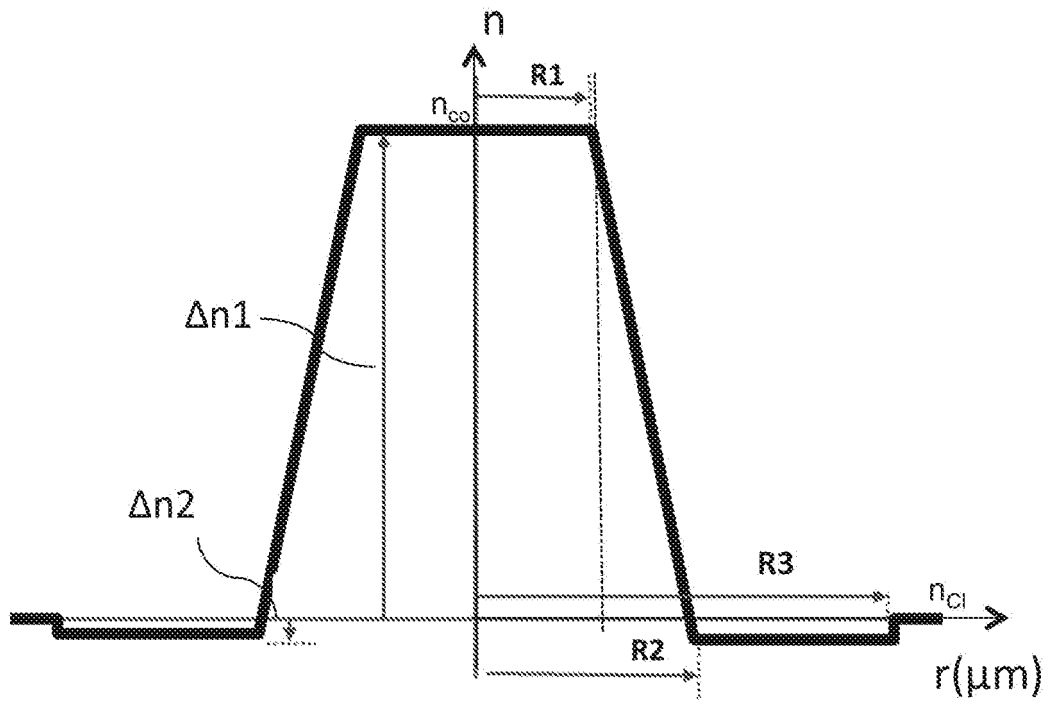


Figure 1

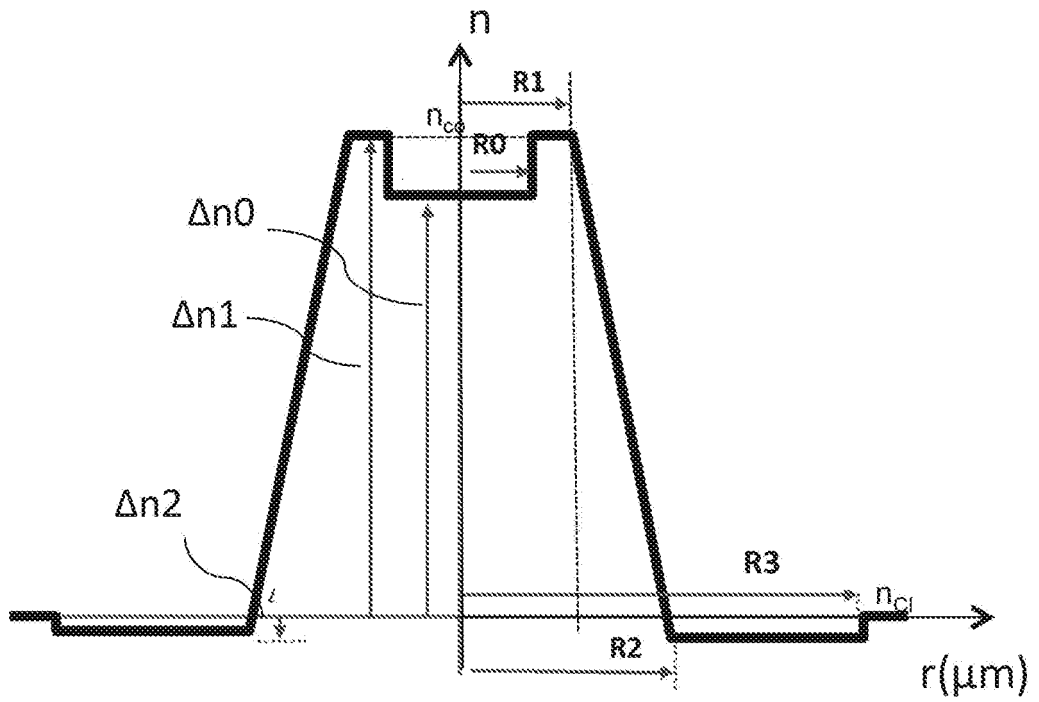


Figure 2

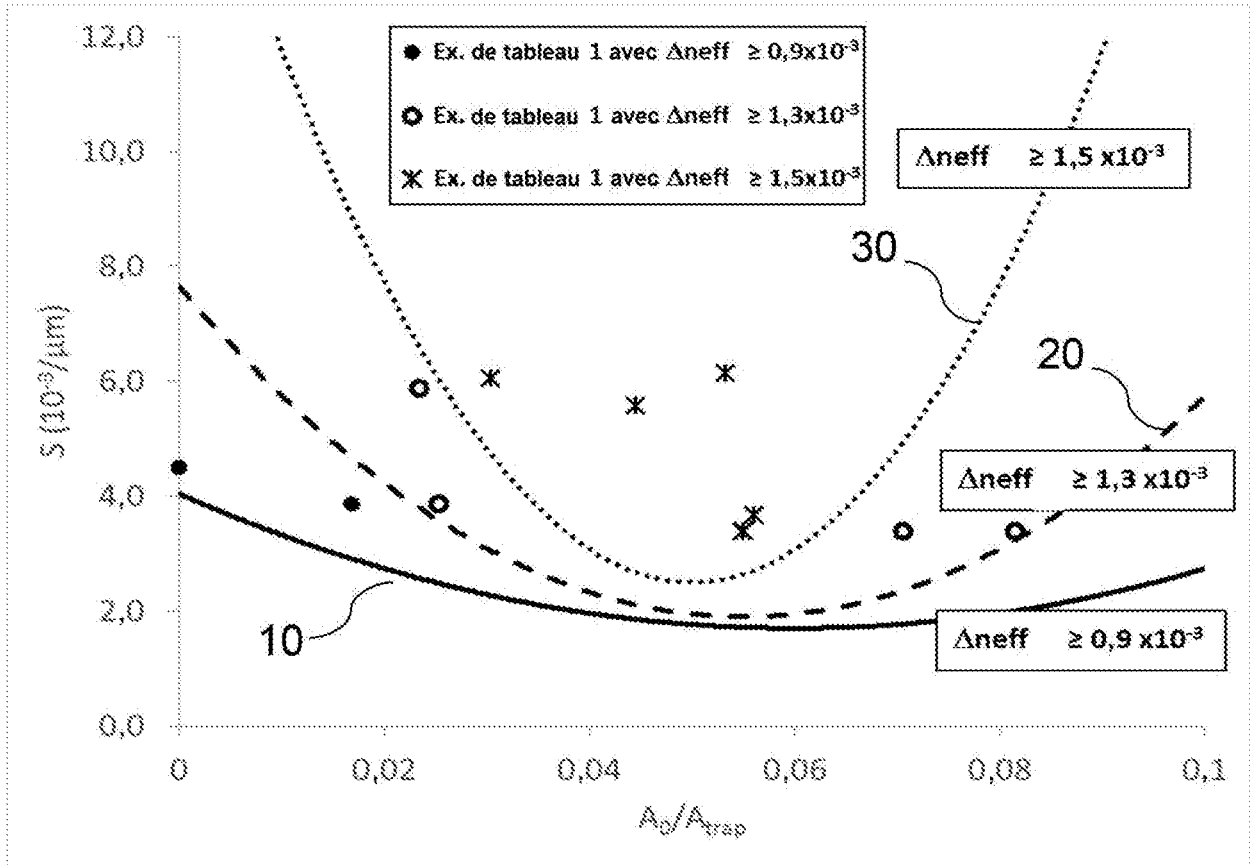


Figure 3



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

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

FA 859838  
FR 1859325

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	M. BIGOT ET AL: "Next-Generation Multimode Fibers for Space Division Multiplexing", ADVANCED PHOTONICS 2017 (IPR, NOMA, SENSORS, NETWORKS, SPPCOM, PS), 24 juillet 2017 (2017-07-24), page NeM3B.4, XP055589872, New Orleans, Louisiana, US DOI: 10.1364/NETWORKS.2017.NeM3B.4 * abrégé * * tableau 1 * * figure 1 *	1-16	G02B6/028 G02B6/036 H04J14/04
A	----- US 2016/370540 A1 (BALEMARTHY KASYAPA [IN] ET AL) 22 décembre 2016 (2016-12-22) * figure 7B *	1-16	
A	----- US 2002/054743 A1 (MONTMORILLON LOUIS-ANNE DE [FR] ET AL) 9 mai 2002 (2002-05-09) * figure 2 *	1-16	
A	----- US 2015/168643 A1 (GRUNER-NIELSEN LARS [DK] ET AL) 18 juin 2015 (2015-06-18) * figures 1,2,7 *	1-16	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G02B
A	----- SILLARD PIERRE ET AL: "Low-Differential-Mode-Group-Delay 9-LP-Mode Fiber", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, IEEE, USA, vol. 34, no. 2, 15 janvier 2016 (2016-01-15), pages 425-430, XP011598972, ISSN: 0733-8724, DOI: 10.1109/JLT.2015.2463715 [extrait le 2016-02-12] * abrégé * * figure 1 *	1-16	
	----- -/--		
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
31 mai 2019		Dregely, Daniel	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		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.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		.....	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

2  
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement  
national

FA 859838  
FR 1859325

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	GE DAWEI ET AL: "Design of a Weakly-Coupled Ring-Core FMF and Demonstration of 6-mode 10-km IM/DD Transmission", 2018 OPTICAL FIBER COMMUNICATIONS CONFERENCE AND EXPOSITION (OFC), OSA, 11 mars 2018 (2018-03-11), pages 1-3, XP033357735, [extrait le 2018-06-13] * abrégé * * figure 1 *	1-16	
A	MA LIN ET AL: "Ring-Assisted 7-LP-Mode Fiber with Ultra-Low Inter-Mode Crosstalk", 2016 ASIA COMMUNICATIONS AND PHOTONICS CONFERENCE (ACP), OSA, 2 novembre 2016 (2016-11-02), pages 1-3, XP033534311, [extrait le 2019-04-01] * abrégé * * figures 1-4 *	1-16	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
A	CN 105 866 881 A (UNIV SHANGHAI JIAOTONG) 17 août 2016 (2016-08-17) * figures 1-3 *	1-16	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
31 mai 2019		Dregely, Daniel	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		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.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		.....	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1859325 FA 859838**

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 **31-05-2019**

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 2016370540 A1	22-12-2016	CN 105829928 A	03-08-2016
		EP 3100087 A1	07-12-2016
		JP 2017510832 A	13-04-2017
		US 2016370540 A1	22-12-2016
		WO 2015116887 A1	06-08-2015
-----			
US 2002054743 A1	09-05-2002	AUCUN	
-----			
US 2015168643 A1	18-06-2015	AUCUN	
-----			
CN 105866881 A	17-08-2016	AUCUN	
-----			