

Les fibres optiques microstructurées

Laurent PROVINO, Laurent BRILLAND, Achille MONTEVILLE, David LANDAIS, Olivier LE GOFFIC, Denis TREGOAT, David MECHIN
Photonics Bretagne, 11 rue Louis de Broglie, 22300 Lannion
dmechin@photonics-bretagne.com

Les fibres optiques microstructurées, apparues dans le milieu des années 1990, sont de nouveaux guides de lumière originaux qui donnent accès à des propriétés optiques remarquables. L'originalité première de ce type de fibre a été de permettre le guidage de la lumière dans un matériau unique grâce à leur structuration périodique. Après plus d'une décennie de recherche, ces nouvelles fibres optiques ont démontré un potentiel d'applications extrêmement vaste et ce, dans des domaines très variés allant de la défense aux applications biophotoniques, sous la forme de capteurs optiques ou de lasers.

La naissance d'une nouvelle famille de fibres optiques

La propagation guidée de la lumière a été décrite pour la première fois par les publications de Colladon et Babinet en 1842 dans les comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences qui décrivaient respectivement la propagation non rectiligne de la lumière dans un filet d'eau et dans une tige de verre courbée. L'utilisation de ces guides de lumière sur des longues distances a été cependant uniquement rendue possible à partir du début des années 1970 grâce à la réalisation de fibres optiques constituées d'un cœur et d'une gaine en verre mais surtout grâce à la synthèse de silice ultra-pure par l'équipe américaine de Charles Kao (ce qui lui a d'ailleurs valu le prix Nobel de Physique en 2009) qui a permis de fortement réduire leurs pertes. Depuis cette époque, les caractéristiques de ces fibres ont continué d'évoluer pour devenir de plus en plus complexes et atteindre des performances leur permettant d'être des composants incontournables dans les réseaux de télécommunications à partir des années 80. Les degrés de liberté apportés par le choix du profil d'indice de réfraction transverse ont permis par exemple de réaliser des fibres double gaine intégrant un cœur de silice dopée terre rare pour les amplificateurs optiques et lasers, ou des fibres à faible dispersion chromatique utiles pour les télécommunications associant longues distances et

hauts débits. Leurs domaines d'applications furent fortement étendus à partir de 1996 grâce aux résultats des recherches du groupe d'optoélectronique de l'université de Bath (UK) qui a réussi à fabriquer un nouveau type de fibre optique constituée d'un matériau unique en silice pure comprenant un agencement périodique de canaux d'air de dimensions micrométriques parallèles à l'axe de propagation (notons que le principe de cette fibre avait toutefois déjà été proposé 20 ans auparavant par Kaiser et ses collaborateurs au sein du laboratoire Bell, sans susciter particulièrement d'intérêt auprès de la communauté scientifique). Cette nouvelle génération de guide optique fut baptisée fibre à cristal photonique en référence à la modulation périodique à deux dimensions de l'indice de réfraction de la gaine, présentant potentiellement des propriétés de bandes interdites similaires à celles des semi-conducteurs. En effet, la propagation transverse d'une onde dans un arrangement périodique est régie par des conditions de résonances et d'anti-résonances autorisant ou non, la pénétration dans le cristal photonique des ondes lumineuses en fonction de leur fréquence. Or, parce que la première réalisation présentait une faible proportion d'air et un manque de régularité du point de vue de la taille et de la position des trous d'air, le guidage ne pouvait être lié à un phénomène de bande interdite photonique. Une fibre à cœur plein a alors été développée débouchant sur la découverte de la première fibre infiniment

monomode sur un large domaine spectral s'étendant de 450 à 1550 nm, dans laquelle la lumière se propage par un principe très proche de celui de la réflexion totale interne des fibres dites classiques. Très vite, dès 1999, les premières fibres à cœur creux dans laquelle la lumière est confinée dans le trou d'air central par le seul effet de bandes interdites photoniques sont proposées et réalisées. Par la suite, les fibres composées spécifiquement d'un arrangement de barreaux de silice et de trous d'air, qui intègrent donc deux catégories différenciées par le type de guidage, seront désignées plus généralement sous le nom de fibres optiques microstructurées (FOM) (*figure 1*). Dès lors, l'apparition de nouvelles structures de fibres n'a fait que croître pour répondre à un vaste éventail de besoins dans de nombreux domaines aussi bien appliqués que fondamentaux.

Comment les fabrique-t-on ?

Les FOM sont fabriquées en utilisant des variétés de techniques différentes telles que le perçage, l'extrusion ou le moulage, et l'assemblage-étirage. C'est cette dernière technique qui est aujourd'hui la plus répandue dans le cas des fibres en silice. Elle consiste à réaliser une préforme identique à la géométrie visée en empilant des capillaires et/ou des barreaux circulaires de taille millimétrique, ce qui rend la maîtrise de la microstructure plus aisée (*figure 2*). Les FOM sont ensuite conçues de la même manière que les fibres

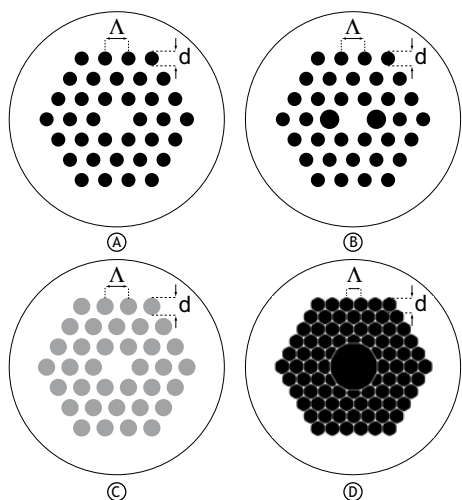


Figure 1. Représentations schématiques de différentes structures de fibres microstructurées. Les régions en noir sont les trous d'air, les régions blanches sont en silice pure et les régions grises sont en silice dopée. (a) Fibres microstructurées à cœur haut indice. (b) Fibres microstructurées à maintien de polarisation. (c) Fibres toutes solides à bandes interdites et cœur bas indice. (d) Fibres à bandes interdites et cœur creux.

conventionnelles, en réalisant le fibrage de la préforme. La grande diversité des géométries pouvant être réalisées avec cette technique (figure 3) a permis d'ajuster les propriétés de guidage de façon parfois spectaculaire. Ces propriétés sont principalement définies par l'espacement périodique Λ des inclusions de hauts/bas indices de diamètre d .

À quoi peuvent-elles bien servir ?

Des fibres infiniment monomodes

Parmi les propriétés spécifiques aux FOM, la plus utile est peut-être celle de guider un unique mode présentant une répartition d'intensité quasi-gaussienne sur tout le domaine de transparence de la silice (de 300 à 2000 nm environ). Celle-ci découle de la forte dépendance de l'indice effectif de la gaine microstructurée, à la fois à la dimension des trous d'air et à la longueur d'onde, car la dimension des trous et la longueur d'onde optique sont du même ordre de grandeur. Aux courtes longueurs d'onde, le champ modal est beaucoup plus confiné dans le cœur (figure 4a) : la différence d'indice effectif

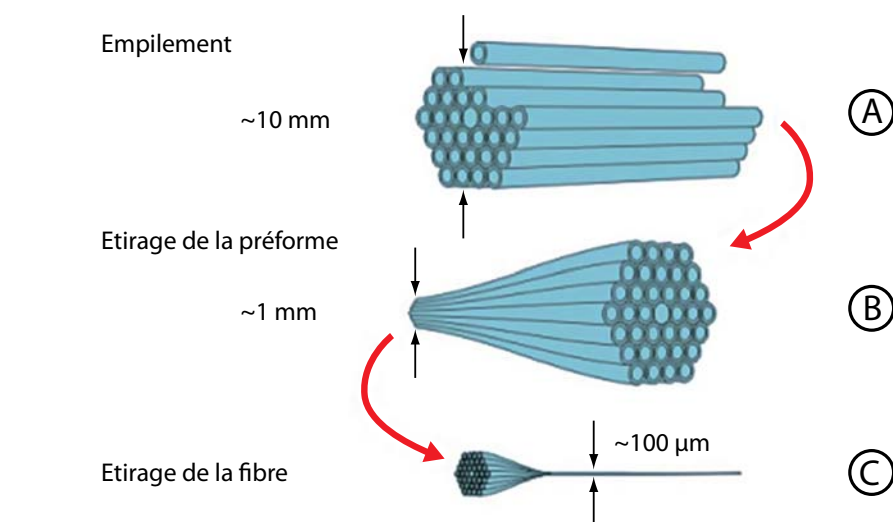


Figure 2. Présentation schématique des différentes étapes de fabrication des fibres microstructurées : (a) assemblage autour d'une baguette centrale de capillaires de dimension millimétrique, (b) étirage de la préforme manchonnée en canne, (c) fibrage de la canne pour donner une fibre de dimension micrométrique.

entre le cœur et la gaine est ainsi réduite. Alors que, pour les grandes longueurs d'onde, le champ modal s'étend à travers les trous (figure 4b), diminuant l'indice effectif de la gaine. La conséquence directe de la diminution de l'indice effectif de la gaine pour les grandes longueurs d'onde est que la fréquence de coupure du second mode peut être repoussée à l'infini, ce qui rend la fibre uni-modale pour toutes les longueurs d'onde optiques même

lorsque le rayon de champ du mode guidé est grand (diamètre de l'ordre de 40λ). Ceci n'est possible que lorsque la proportion d'air dans la fibre reste faible ($d/\Lambda \leq 0.4$) ; les FOM avec une grande

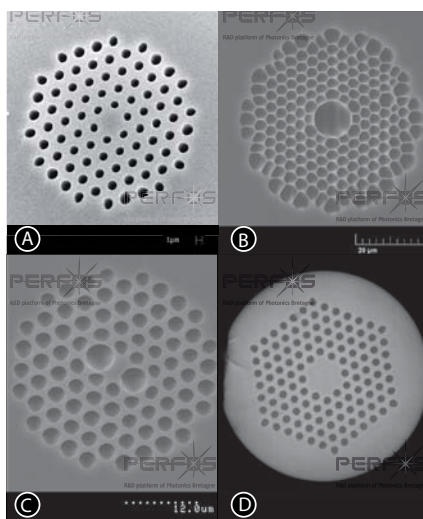


Figure 3. Photographies obtenues par microscopie électronique et optique de fibres microstructurées utilisées pour leurs propriétés peu usuelles : (a) fibre utilisée pour la génération de supercontinuum, (b) fibre à bandes interdites à cœur creux, (c) fibre fortement biréfringente et (d) fibre à bandes interdites à cœur bas indice solide utilisée pour le filtrage Raman.

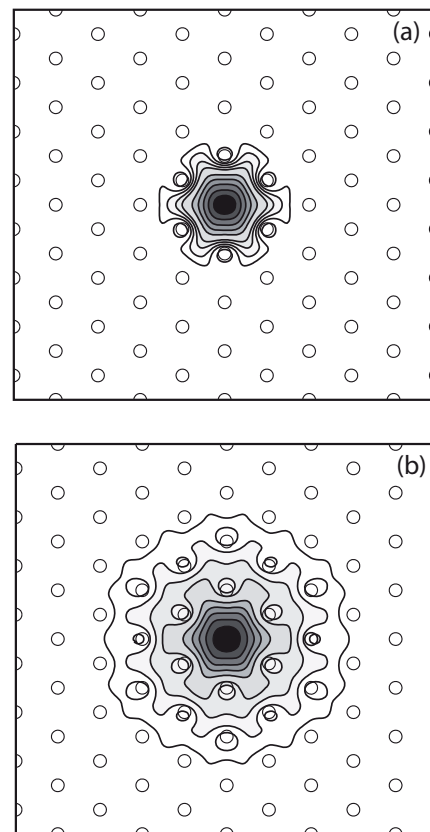


Figure 4. Profils du mode fondamental d'une fibre microstructurée pour les courtes longueurs d'onde (a) et les grandes longueurs d'onde (b).

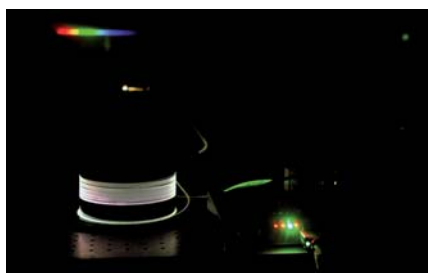


Figure 5. Photographie d'une source supercontinuum générée en injectant une source laser nanoseconde de 1064 nm dans 8 mètres de fibre microstructurée air/silice.

proportion d'air sont multimodes pour les courtes longueurs d'onde, comme les fibres conventionnelles.

Des sources compactes blanches

La dispersion de la vitesse de groupe et la pente de la dispersion peuvent varier radicalement selon la taille et/ou l'arrangement des trous d'air. Il est ainsi possible de réaliser des fibres à dispersion faible et aplatie sur une large bande ou encore de positionner le zéro de dispersion

chromatique dans le visible, chose impossible à réaliser avec une fibre monomode conventionnelle. Cet ajustement de la longueur d'onde de dispersion nulle est essentiel si on veut limiter l'élargissement temporel d'une impulsion lumineuse au cours de sa propagation, comme c'est le cas lorsqu'on réalise des sources compactes à large spectre, communément appelées supercontinuum (figure 5).

Des guides de lumière sélectifs en longueur d'onde

L'originalité première des FOM en termes de guidage se trouve dans le cas des fibres à cœur de bas indice pour lesquelles le confinement de la lumière dans le cœur est assuré grâce à la périodicité de l'indice de réfraction de la gaine. Ce mécanisme de guidage donne naissance à des bandes interdites de propagation de la lumière dans la gaine, autorisant le confinement du champ dans un défaut de la structure qui sert ainsi de cœur pour une propagation longitudinale (figure 6). L'intérêt historique d'un tel guidage est

de pouvoir confiner et guider une forte puissance lumineuse dans l'air afin de repousser le seuil d'apparition des effets non-linéaires et de dommage des fibres à cœur en silice. Une autre application de ces FOM à cœur de bas indice est le filtrage sélectif de longueurs d'onde au sein d'une cavité laser.

Des capteurs à fibres et des lasers à fibres à des longueurs d'ondes exotiques

Un des autres aspects séduisants des fibres air/silice réside dans la possibilité d'insérer dans les canaux d'air et/ou dans le cœur creux un gaz ou un liquide. Il est alors possible d'accroître significativement l'interaction lumière/matière afin de réaliser des sources lasers fibrés fonctionnant sur des bandes de longueurs d'onde indisponibles avec les terres rares ou de concevoir des capteurs optiques en influençant les propriétés de guidage de la fibre grâce à une modification des propriétés de l'élément introduit (modification de l'indice effectif des modes liée à une variation de la température par exemple).

Soudure de fibre PCF

End-cap sur fibre PCF

End-cap sur fibre HC

Nous interfaçons vos fibres spéciales

Profitez du savoir-faire unique d'ALPhANOV pour interfacier et connectoriser vos fibres microstructurées :

Procédés	Type de fibres
■ Soudures avancées	■ PCF, PM
■ Convertisseur de mode	■ Dopées terre rare
■ Tapers	■ Coeurs creux
■ Connecteurs sur fibres spéciales	■ Double gaine (air-clad)
■ Fusion d'end-caps	■ LMA...

NOUVEAU ALPhANOV réalise votre combineur de pompe et signal N+1x1 pour fibres microstructurées actives

www.alphanov.com

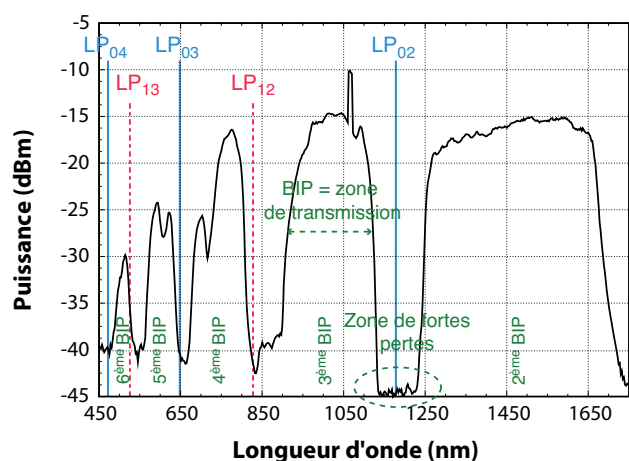


Figure 6. Spectre de transmission discret obtenu dans une fibre à bandes interdites photoniques à cœur solide (figure 1d) de 1 mètre de long.

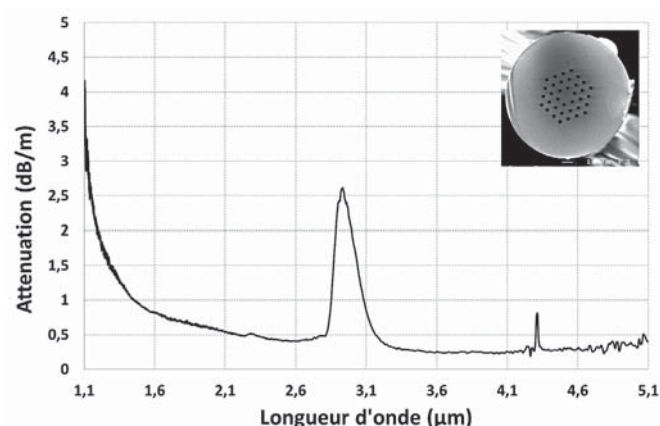


Figure 8. Courbe d'atténuation d'une fibre microstructurée en verre de composition AsSe.

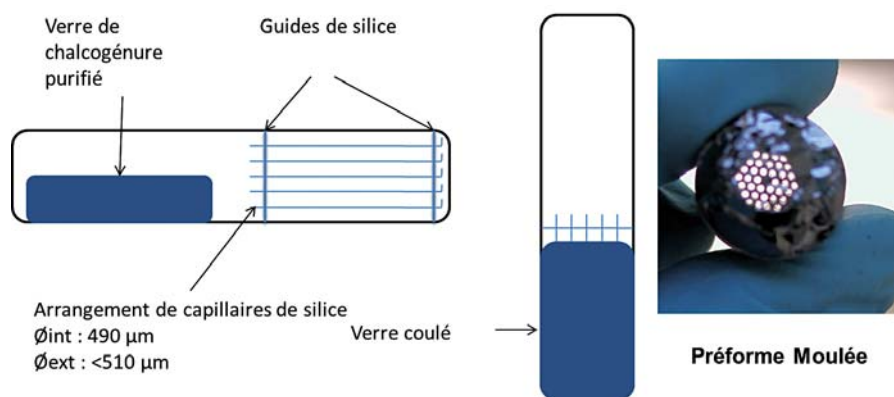


Figure 7. Schéma de fabrication de préforme en verre de chalcogénures par la technique de moulage.

Des lasers et des amplificateurs à fortes puissances

Les FOM sont également des candidates idéales pour réaliser des lasers et des amplificateurs à fibres de forte puissance (supérieure à 1 kW). Avec une structure à saut d'indice classique, le diamètre du cœur pour une émission monomode ne peut excéder 25 μm . Grâce aux FOM, des diamètres de champ de mode pouvant atteindre 100 μm sont réalisables tout en conservant un caractère monomode transversal. Cela permet de repousser le seuil d'apparition des effets non-linéaires et de minimiser les risques d'endommagement lié à l'échauffement de la fibre. L'utilisation de la technique d'assemblage-étirage a également permis de remplacer le revêtement externe fait de polymère de bas indice de réfraction utilisé dans les fibres à double gaine classiques par une couronne de trous d'air afin de

confiner l'énergie lumineuse de la pompe optique. Les propriétés mécaniques et thermiques sont ainsi améliorées et l'ouverture numérique de la double gaine peut atteindre des valeurs supérieures à 0,6 alors qu'elles sont au plus égales à 0,48 avec un revêtement en polymère.

Des sources lasers dans le moyen infrarouge

Les travaux sur les dix premières années d'existence des FOM ont été principalement menés sur des fibres en verre de silice. L'utilisation de verres à base d'oxydes (de tellure, bismuth, ou germanium), de fluorures et aussi de chalcogénures présente une alternative intéressante pour transposer les propriétés non usuelles des FOM dans l'infrarouge moyen (jusqu'à 10 μm environ), domaine spectral qui intéresse certaines applications dans le secteur de la défense ou de l'environnement.

Les verres de chalcogénures sont composés d'au moins un élément chalcogène (S, Se et Te) auquel on peut ajouter d'autres éléments tels que : Ge, Sb, Ga, As, ... Ils présentent une large plage de transparence dans l'infrarouge moyen. La transmission optique des FOM peut alors s'étendre d'environ 700 nm jusqu'à plus de 12 μm suivant la composition utilisée.

Un des défis majeurs a consisté à réaliser des FOM en verre de chalcogénures à faibles pertes optiques. Les premières tentatives de fabrication de préformes par la technique d'assemblage-étirage ont montré que celle-ci n'était pas adaptée. Une méthode alternative de fabrication de préforme par moulage a donc été développée (figure 7), ce qui a permis d'obtenir des niveaux de transmission satisfaisants (figure 8).

Les verres de chalcogénures sont connus pour présenter une forte non-linéarité, de 2 à 3 ordres de grandeurs plus élevée que celle de la silice. Cette propriété est mise à profit dans la réalisation de sources optiques, laser Brillouin ou supercontinuum, émettant dans l'infrarouge moyen.

Références

Russel P. St. J., "Photonic-Crystal Fibers", Journal of Lightwave Technology, Vol. 24, N°12, pp. 4729-4749, 2006.

Coulombier Q. et al., "Casting method for producing low loss chalcogenide microstructured fibers", Optics Express, Vol.18, pp 9107-9112, 2010.