

# FIBRES OPTIQUES A CŒUR CREUX POUR L'AMPLIFICATION OPTIQUE

Walter Belardi<sup>1\*</sup>, Laurent Bigot<sup>1</sup>, Pier J. Sazio<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France

<sup>2</sup>Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, UK

\*walter.belardi@univ-lille.fr

## RÉSUMÉ

Ordinairement, l'amplification optique dans une fibre à cœur creux est réalisée en la remplissant avec un gaz utilisé comme milieu actif. Nous explorons ici la possibilité théorique d'obtenir une amplification de la lumière dans une fibre anti-résonante dont certains éléments de la gaine sont constitués de verre de silice dopé par des ions de terre-rare. Plus précisément, nous proposons un concept de fibre à cœur creux basé sur une combinaison d'éléments résonants et anti-résonants dans sa gaine optique et discutons le potentiel offert par cette géométrie.

**MOTS-CLEFS :** *Conception et fabrication de fibres optiques; Propriétés de fibres optiques; Fibres optiques microstructurées.*

## 1. INTRODUCTION

Les fibres optiques à cœur creux (HCs) sont des guides d'ondes optiques capables de confiner efficacement la lumière dans l'air [1]. Au cours des dernières années, des HCs avec une structure géométrique simplifiée (comprenant un nombre limité de tubes détachés dans un tube extérieur) ont suscité un intérêt majeur [2]. Dans ces fibres dites à cœur creux anti-résonant (ARF), la propagation de la lumière est permise par la présence d'éléments entourant le cœur d'air central et donnant une courbure négative au périmètre du cœur [3]. En outre, ces éléments qui sont anti-résonants vis-à-vis de la longueur d'onde optique transmise [4]. Ces caractéristiques géométriques permettent un recouvrement inférieur à 0,01% entre le mode optique fondamental voyageant dans la fibre et le verre de la gaine [5]. Cette faible interaction est extrêmement importante dans les domaines de la distribution de faisceaux optiques intenses [6], des HCs composés de verres composites [7,8], de la transmission dans l'UV [9] et dans le moyen infrarouge [10]. Compte tenu de ce faible recouvrement, l'amplification de la lumière dans une fibre ARF a été démontrée en remplissant le cœur d'air avec plusieurs compositions de gaz afin d'obtenir le recouvrement souhaité entre les faisceaux de signal et de pompe, d'un côté, et le milieu à gain, de l'autre [11, 12]. A contrario, nous explorons ici la possibilité théorique d'obtenir une amplification de la lumière dans une ARF dont certains éléments de la gaine de verre sont dopés par des ions de terre-rare. Dans ce but, nous proposons une nouvelle structure géométrique pour les ARF comprenant à la fois des éléments anti-résonants et résonants, et capable de combiner une atténuation relativement faible avec un niveau de recouvrement accru entre le mode optique transmis et le verre de la gaine.

## 2. CONCEPT PROPOSÉ

Le nouveau concept de structure de fibre est illustré par la Fig. 1. Cette ARF comprend une gaine constituée de deux anneaux de tubes entourant un cœur d'air central de diamètre  $D = 50 \mu\text{m}$ . L'anneau interne est composé de 6 tubes de diamètre extérieur  $d = 41,6 \mu\text{m}$  et d'épaisseur  $t = 3,7 \mu\text{m}$ , tandis que l'anneau extérieur est composé de 6 tubes, disposés comme indiqué sur la Fig. 1, de diamètre extérieur  $d$  et d'épaisseur  $t_2 = 0,7 \mu\text{m}$ .

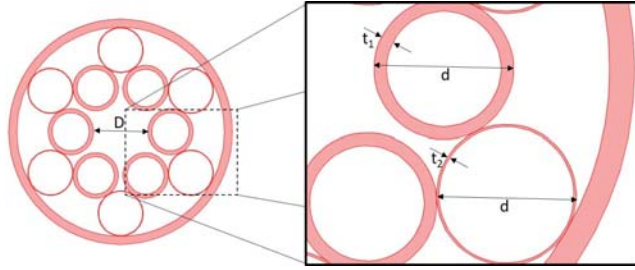


Fig. 1 : Fibre à cœur creux avec éléments résonants et anti-résonants.

La réalisation d'un amplificateur optique à cœur creux opérant autour de  $2\ \mu\text{m}$  présente un intérêt potentiel pour les systèmes de communication optiques basés sur l'utilisation de HCs, car l'atténuation intrinsèque de ces dernières est largement diminuée aux longueurs d'onde élevées [13]. Dans cette analyse, nous supposons donc l'utilisation de tubes de silice épais ( $t_1$ ) dopés par des ions Thulium, pour la région de gaine interne, et de tubes de silice minces ( $t_2$ ) non dopés pour la région de la gaine externe. Comme dans les travaux précédents [4,5,10], nous avons utilisé le logiciel Comsol Multiphysics pour effectuer nos simulations numériques. Les équations de Sellmeier sont adoptées pour le calcul de l'indice de réfraction du verre.

### 3. PROPRIÉTÉS

Dans une ARF la fraction de POG ("Power On Glass", puissance dans le verre) est souvent inférieure à 0,01% [4,5]. Avec un tel recouvrement, il serait impossible à la fois d'exciter le verre dopé à la longueur d'onde de pompage et d'amplifier la lumière à la longueur d'onde du signal. Afin d'augmenter significativement le POG sans trop affecter les pertes de transmission aux longueurs d'onde de la pompe et du signal, nous proposons d'utiliser la structure hybride de la Fig. 1. Dans cette nouvelle conception, l'épaisseur des tubes de gaine intérieure,  $t_1$ , est choisie pour être en condition de résonance avec les longueurs d'onde de pompe et de signal [3], de sorte que le POG du mode fondamental puisse être augmenté. D'autre part, l'épaisseur des tubes de la gaine extérieure,  $t_2$ , (Fig. 1) est choisie pour être en condition d'anti-résonance avec les longueurs d'onde de la pompe et du signal [3], pour que le confinement du mode fondamental dans la fibre optique puisse être réalisé avec une atténuation relativement faible. Ce nouveau concept résulte alors en un nouveau type d'ARF dans lequel des éléments résonants et anti-résonants sont inclus dans la même structure.

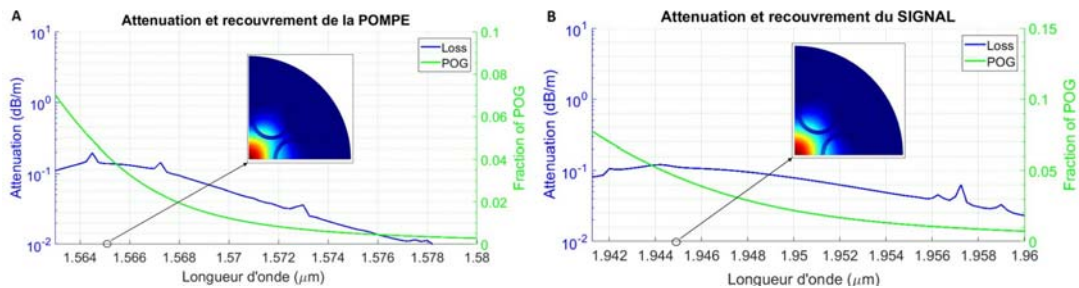


Fig. 2 : Pertes (courbes bleues) et fraction de puissance sur le verre (courbes vertes) en fonction des longueurs d'onde de la pompe (côté gauche) et du signal (côté droit), pour l'ARF dopée  $\text{Tm}^{3+}$  présentée dans la Fig. 1.

Les images en insert sont les modes fondamentaux de l'ARF à  $1,565\ \mu\text{m}$  et à  $1,945\ \mu\text{m}$ .

La Fig. 2 montre les résultats de nos simulations aux longueurs d'onde de pompe (à gauche) et de signal (à droite). La plage de longueurs d'onde analysée pour la pompe ( $1,563\text{-}1,58\ \mu\text{m}$ ) et pour le signal ( $1,941\text{-}1,96\ \mu\text{m}$ ) se situe dans les bandes d'absorption et d'émission des ions Thulium trivalents. De chaque côté de la figure, nous présentons la dépendance des pertes (en bleu, échelle de gauche) et du POG (en vert, échelle de droite) pour les longueurs d'onde d'intérêt.

La structure proposée permet d'obtenir, à la longueur d'onde de pompage, un recouvrement maximal de plus de 7% combiné à des pertes inférieures à 0,11 dB/m, dans la région autour de  $1,563\ \mu\text{m}$ . Plus précisément, une valeur de POG comprise entre 1% et 7% est obtenue avec des

pertes du mode fondamental inférieures à 0,2 dB/m, sur une plage spectrale d'environ 8 nm. Pour le signal, un recouvrement maximal de 7,8% est obtenu en combinaison avec des pertes de 0,08 dB/m, aux alentours de 1,941  $\mu\text{m}$ . Une valeur de POG comprise entre 1% et 7,8%, ainsi que des pertes du mode fondamental inférieures à 0,11 dB/m, sont atteintes sur une plage spectrale d'environ 16 nm.

Nous analysons maintenant, dans la Fig. 3, les mêmes propriétés lorsque la structure proposée est courbée avec un rayon de courbure  $R$ .

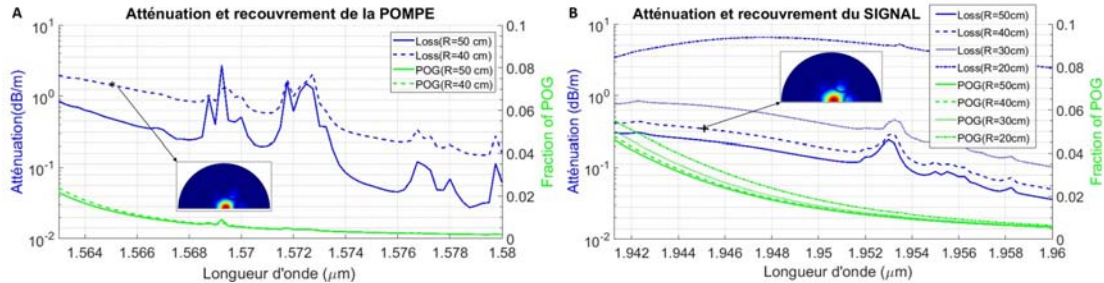


Fig. 3 : Pertes (lignes bleues) et POG (lignes vertes) de l'ARF de la Fig. 1 aux longueurs d'onde de pompe (coté gauche) et de signal (coté droit), pour différents rayons de courbure. Les images en insert représentent les modes fondamentaux de l'ARF aux longueurs d'onde de 1,565  $\mu\text{m}$  (à gauche) et de 1,945  $\mu\text{m}$  (à droite), lorsque le rayon de courbure est de 40 cm.

Aux longueurs d'onde de la pompe, lorsque le rayon de courbure diminue de 50 à 40 cm, les pertes par confinement de l'ARF augmentent fortement alors que le niveau de recouvrement (POG) est similaire. Lorsque la valeur du POG est supérieure à 1%, seule l'ARF avec  $R = 40$  cm autorise des pertes inférieures à 1 dB/m sur une plage spectrale d'environ 4 nm. Par contre, le comportement de l'ARF aux longueurs d'onde du signal, même avec un rayon de courbure de 30 cm (lignes pointillées), permet de maintenir des pertes inférieures à 1 dB/m en combinaison avec un POG compris entre 1% et 6,2% sur une largeur de bande de 14 nm.

## CONCLUSION

Nous avons introduit un nouveau concept de fibres optiques à cœur creux anti-résonant qui comprend, à la fois, des éléments résonants et anti-résonants dans la gaine optique. Nous avons montré numériquement que cette structure pourrait être adoptée pour combiner un recouvrement accru du mode optique fondamental sur le verre de la gaine et une faible atténuation optique. La combinaison de ces deux caractéristiques pourrait être exploitée pour la réalisation d'un premier amplificateur optique avec une ARF sans la nécessité de remplir la fibre avec un gaz.

## RÉFÉRENCES

- [1] B. Debord et al. "Hollow-Core Fiber Technology: The Rising of "Gas Photonics". *Fibers*, 7, 16 (2019).
- [2] I. A. Bufetov et al., "Revolver Hollow Core Optical Fibers". *Fibers* 6, 39 (2018).
- [3] W. Belardi et al., "Effect of core boundary curvature on the confinement losses of hollow antiresonant fibers", *Opt. Express* 21, 21912 (2013).
- [4] N. M. Litchinitser et al., "Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides," *Opt. Lett.* 27, 1592 (2002).
- [5] W. Belardi et al., "Negative curvature fibers with reduced leakage loss", *OFC 2014*, Th2A.45.
- [6] S. Eilzer et al., "Hollow Core Optical Fibers for Industrial Ultra Short Pulse Laser Beam Delivery Applications". *Fibers*, 6, 80 (2018).
- [7] C. Wei et al. "Geometry of Chalcogenide Negative Curvature Fibers for CO<sub>2</sub> Laser Transmission," *Fibers* 6, 74 (2018).
- [8] A. L. S. Cruz et al. "3D Printed Hollow-Core Terahertz Fibers," *Fibers*, 6, 43 (2018).
- [9] S.F. Gao et al., "Hollow-core negative-curvature fiber for UV guidance," *Opt. Lett.* 43, 1347 (2018).
- [10] W. Belardi et al., "Hollow antiresonant fibers with low bending loss", *Opt. Express* 22, 10091 (2014).
- [11] P. St. J. Russell et al., "Hollow-core photonic crystal fibres for gas-based nonlinear optics", *Nature Photonics* 8, 278 (2014).
- [12] Z. Wang et al., "Efficient diode-pumped mid-infrared emission from acetylene-filled hollow-core fiber", *Opt. Express* 22, 21872 (2014).
- [13] P. J. Roberts et al., "Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres," *Opt. Express* 13, 236 (2005).