

FIBRES OPTIQUES HYBRIDES A CŒUR EN SILICIUM PRESENTANT DE FAIBLES PERTES OPTIQUES

**M. Kudinova, R. Habert, K. Baudelle, R. Bernard, B. Chazallon, A. Cassez,
O. Vanvincq, H. El Hamzaoui, G. Bouwmans, L. Bigot**

*Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules
F-59000 Lille, France*

maryna.kudinova@univ-lille.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente des résultats expérimentaux sur le développement de fibres optiques hybrides à cœur en silicium (FOS, Fibre Optique Silicium) et à faibles pertes optiques ($<0,15$ dB/cm à $1,55 \mu\text{m}$). En utilisant la méthode de fabrication Rod-in-Stack, une centaine de mètres de FOS ont été étirés. L'état cristallin du cœur et l'absence de contamination en oxygène ont été confirmés par DRX, micro-Raman et ToF-SIMS.

MOTS-CLEFS : *fibre optique hybride ; silicium ; ToF-SIMS ; faibles pertes*

1. INTRODUCTION

Combiner la silice avec des matériaux inhabituels dans le domaine des fibres optiques ouvre accès à des propriétés optiques et/ou de fonctionnalisations nouvelles et inaccessibles aux fibres standards. De telles fibres optiques, dites hybrides, peuvent ainsi associer à une structure de silice des matériaux de natures différentes comme d'autres types de verres, des cristaux, des métaux ou des polymères. Depuis 2008, des travaux portant sur des fibres optiques possédant un cœur en silicium ont été rapportés, mettant en évidence leur transparence dans le moyen infrarouge ou leurs propriétés optoélectroniques [1]. A ce jour, seulement une partie des propriétés potentielles des FOS ont pourtant été démontrées, et ce principalement du fait des difficultés de fabrication et de leurs pertes optiques élevées. Par exemple, les fibres optiques issues du procédé dit « molten-core » (tirage d'un barreau de silicium inséré dans un tube de silice) ou HPCVD (High Pressure Chemical Vapor Deposition) ont généralement des pertes largement supérieures à 1 dB/cm [2-3]. Il a été démontré qu'il est possible de diminuer ce niveau de pertes optiques jusqu'à $0,47$ - 1 dB/cm à $1,55 \mu\text{m}$ (le record actuel) en procédant à un post-traitement de la fibre par laser CO_2 ou par traitement thermique [4]. Cependant, ces techniques de fabrication et de post-traitement n'ont, à ce jour, été démontrées que sur des échantillons centimétriques de FOS. Dans le présent article, nous démontrons qu'il est possible d'étirer continûment une centaine de mètres de FOS et d'atteindre, sans post-traitement, un niveau de pertes optiques inférieur à $0,15$ dB/cm, équivalent à celui des guides d'ondes planaires en silicium. Nous présentons également les résultats des caractérisations chimiques et structurales du cœur en silicium cristallin de la fibre optique.

2. FABRICATION DE LA FIBRE OPTIQUE SILICE-SILICIUM

La préforme de la FOS a été fabriquée en insérant un barreau de silicium cristallin de 2 mm de diamètre dans un assemblage de barreaux de silice manchonné dans un tube de diamètre extérieur 25 mm. Cette préforme a été étirée une première fois pour obtenir une canne, canne qui a été insérée dans un nouveau tube et étirée une seconde fois sous la forme de fibre optique à environ 1900°C et environ 10 m/min. La fibre optique ainsi fabriquée possède un cœur de $3,4 \mu\text{m}$ de diamètre pour un diamètre extérieur de $148 \mu\text{m}$. Une longueur de fibre de 200 m environ a été obtenue (Fig. 1).

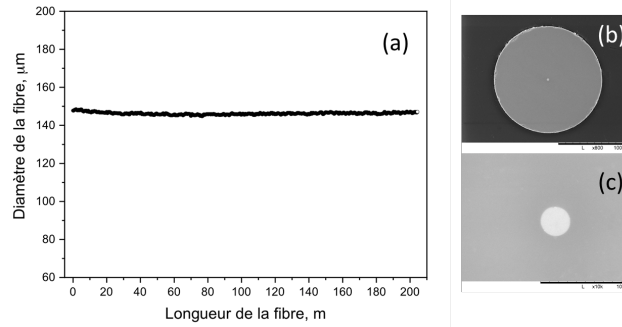


Fig. 1 : (a) Mesure du diamètre de la fibre optique pendant son étirage en fonction de la longueur de fibre étirée. Images en microscopie électronique à balayage (b) de la fibre optique et (c) du cœur en silicium.

3. CARACTÉRISATION CHIMIQUE DU CŒUR DE LA FIBRE OPTIQUE

La FOS a été caractérisée par diffraction des rayons X (DRX) sur poudre, spectroscopie Raman, MET et ToF-SIMS (Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy) pour confirmer l'état cristallin du cœur et l'absence de la contamination par l'oxygène. Seulement certains des résultats sont présentés ici. Le diffractogramme (Bruker, D8 Advance) obtenu à partir de la poudre de la fibre présente un large pic de diffraction caractéristique de la silice amorphe, ainsi que plusieurs pics étroits à $28,4^\circ$, $47,3^\circ$, $56,1^\circ$, $69,1^\circ$ et $76,4^\circ$ attribués au silicium cristallin (carte JCPDS 00-027-1402).

L'analyse micro-Raman (Renishaw) a été réalisée sur une plage de 190 à 850 cm^{-1} sous un rayonnement d'excitation d'une source laser Argon à $514,5\text{ nm}$. Le spectre Raman a été pris au centre du cœur d'une fibre polie. Un pic intense à $520,4\text{ cm}^{-1}$, attribué au silicium cristallin est observé. Plusieurs pics très larges ont été observés en multipliant l'échelle d'intensité par 100. Ces pics correspondent aux bandes vibrationnelles du silicium cristallin : les bandes acoustiques transverse et longitudinale de 200 à 450 cm^{-1} et de 600 à 700 cm^{-1} respectivement, et la bande optique longitudinale de 750 à 850 cm^{-1} [5].

L'analyse ToF-SIMS en polarité négative (ION-TOF GmbH Germany) a été réalisée sur une FOS polie transversalement jusqu'au cœur et positionnée longitudinalement par rapport aux sources et au détecteur. L'analyse élémentaire a été réalisée sur une zone de $30 \times 30\text{ }\mu\text{m}$ (donc sur le cœur en silicium et une partie de la gaine en silice) avec accumulation du signal sur environ 800 nm de profondeur d'échantillon. En reconstruisant la cartographie des éléments détectés, nous avons déterminé la position des différents éléments et isotopes dans la zone analysée :

- la gaine en silice ne contient que O- (Fig 2 (a)), ^{18}O -, SiO_2 - (Fig 2 (b)), SiO_3 - et O_2 - ;
- le cœur en silicium ne contient que Si-, ^{29}Si -, ^{30}Si -, Si_2 - (Fig 2 (c)), Si_3 - (Fig 2 (d)), Si_4 - et Si_5 -.

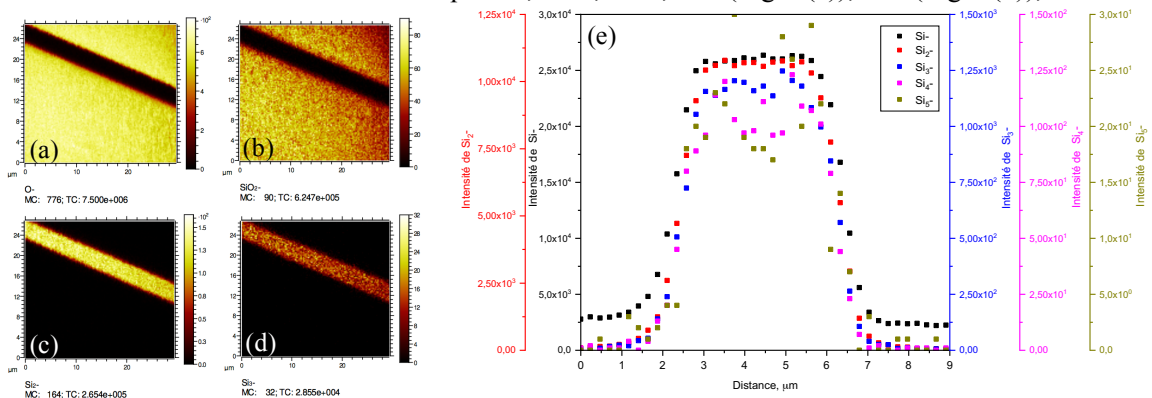


Fig. 2 : cartographies ToF-SIMS des éléments de la gaine en silice (a) O- et (b) SiO_2 -, et du cœur en silicium (c) Si_2 - et (d) Si_3 -. (e) Profil semi-quantitatif des espèces Si-, Si_2 -, Si_3 -, Si_4 - et Si_5 -.

La Fig. 2 (e) présente le profil semi-quantitatif de l'échantillon pour les éléments détectés dans le cœur de la fibre optique. La taille du plateau au centre du profil est en accord avec le diamètre du

cœur de la fibre optique, à savoir $3,4 \mu\text{m}$. La comparaison des intensités mesurées dans le cœur et dans la gaine pour le silicium non-oxydé montre des écarts de concentration de deux et trois ordres de grandeur, ce qui indique l'absence de liaisons Si-O dans le cœur de la fibre. Cette analyse démontre qu'il n'y pas d'oxygène dans le cœur de la FOS, et donc que le cœur est composé de silicium, dont la nature cristalline est par ailleurs confirmée par l'analyse DRX, Raman et aussi MET (non présentée ici).

4. PROPRIÉTÉS OPTIQUES DE LA FIBRE OPTIQUE AVEC UN CŒUR EN SILICIUM

La transmission de la FOS a été mesurée à l'aide d'une source supercontinuum (YSL Photonics SC-PRO) et d'un analyseur de spectre optique sur une plage spectrale de 600 à 1700 nm. Préalablement, le profil d'intensité en sortie de fibre a été analysé avec une caméra InGaAs, mettant en évidence que la lumière n'est transmise que par le cœur en silicium et que la fibre est insensible aux courbures. En optimisant l'injection, nous parvenons à exciter le mode LP_{01} à $1,55 \mu\text{m}$ (Fig. 3, à droite). La transmission de la fibre optique débute à partir de 1170 nm environ (Fig. 3 (a)), ce qui correspond bien au début de fenêtre de transmission de silicium [6]. L'atténuation mesurée sur plusieurs tronçons de cette fibre par la méthode du cut-back est de l'ordre de 0,14 dB/cm entre 1250 et 1650 nm (Fig. 3 (b)). Ce niveau d'atténuation pour les FOS est bien en dessous de l'état de l'art actuel.

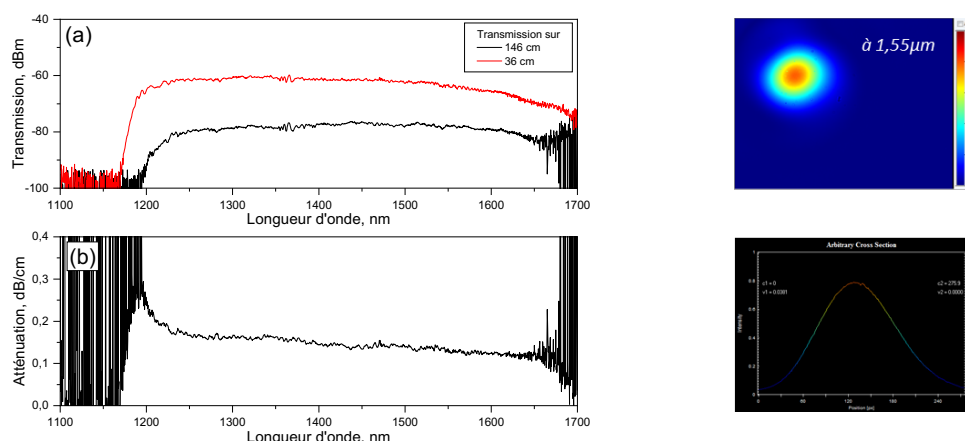


Fig. 3 : A gauche : spectres de transmission (a) d'atténuation (b). A droite : image de mode en sortie de fibre à $1,55 \mu\text{m}$ et profil d'intensité associé.

CONCLUSION

Nous avons présenté les résultats expérimentaux sur le développement et la caractérisation d'une fibre optique à cœur silicium. La méthode de fabrication que nous avons développée permet d'étirer des centaines de mètres de fibre optique avec un niveau de pertes optiques inégalé, sans post-traitement. Le silicium au sein du cœur est cristallin et n'est pas contaminé en oxygène. Ceci permet probablement d'expliquer le niveau faible des pertes optiques de la fibre dans l'infrarouge proche, proche du niveau d'atténuation des guides d'ondes planaires en silicium. Ce résultat ouvre de nouvelles perspectives pour la communauté travaillant sur ces fibres et les rend disponibles pour un plus large éventail d'applications.

REMERCIEMENT

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR SPICY (ANR-16-CE24-0015) et en partie soutenus par le CPER Photonics4Society. Les fibres ont été réalisées dans la plateforme FiberTech Lille (fibertech.univ-lille.fr) de l'IRCICA (USR CNRS 3380, ircica.univ-lille.fr).

REFERENCES

- [1] J. Ballato, et al., Optical Express 16 (23), p. 18675, 2008.
- [2] S. Morris, et al., Optical Materials Express 2 (11), p. 1511, 2012.
- [3] N. Healy, et al., Semicond. Sci. Technol. 33, 023001, 2018.
- [4] X. Ji et al., ACS Photonics 4, p. 85, 2017.
- [5] A. Zwick et al., Physical Review B 48 (9), p. 6024, 1993.
- [6] C. Schinke et al., AIP Advances 5, 067168, 2015.