

CARTOGRAPHIE DES FIBRES OPTIQUES MICROSTRUCTURÉES PAR DÉTECTION DES ECHOS BRILLOUIN

Birgit Stiller¹, Stella Foaeng Mafang², Jean-Charles Beugnot², Michaël Delqué¹, Min Won Lee¹, Alexandre Kudlinski³, Luc Thévenaz², Hervé Maillotte¹ et Thibaut Sylvestre¹

¹ Institut FEMTO-ST, Université de Franche-Comté, CNRS UMR 6174, F-25030 Besançon, France

² Group for Fiber Optics, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015, Lausanne, Switzerland

³ Université Lille 1, IRCICA, Laboratoire PhLAM, CNRS UMR 8523, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

birgit.stiller@femto-st.fr

RÉSUMÉ

Dans cet article nous présentons une nouvelle méthode de cartographie des fibres optiques à haute résolution spatiale basée sur la détection des échos Brillouin. Appliquée aux fibres optiques microstructurées, cette technique permet de cartographier les fluctuations longitudinales de la fréquence Brillouin associées aux irrégularités de la microstructure ainsi qu'aux contraintes liées à l'enroulement et d'estimer les fluctuations géométriques des fibres.

MOTS-CLEFS : *fibre optique microstructurée; capteurs; mesures distribuées; rétrodiffusion Brillouin*

1. INTRODUCTION

Les fibres optiques microstructurées (PCF, pour *photonic crystal fiber*) font actuellement l'objet de nombreuses recherches tant sur le plan fondamental [1] que pour des applications diverses telles que les lasers ou les capteurs [2]. Connues entre autres pour leur importante réponse non linéaire, les PCFs sont particulièrement intéressantes pour réaliser une nouvelle génération de capteurs distribués de température ou de contrainte utilisant la diffusion Brillouin stimulée (DBS). Cependant, ces travaux sont principalement limités par l'inhomogénéité longitudinale des PCFs qui a un effet sur la fréquence Brillouin (FB), paramètre fondamental des capteurs Brillouin. Leur fabrication nécessite par conséquent un contrôle précis de tous les paramètres afin de minimiser les irrégularités et obtenir des performances similaires aux fibres standards (type SMF). Dans cet article, nous étudions de façon détaillée deux PCFs présentant la même microstructure mais fabriquées avec des paramètres différents afin de minimiser les fluctuations du diamètre du cœur. Dans une première partie, nous présentons des mesures du spectre de gain et du seuil Brillouin en bon accord avec la théorie. Ensuite, nous décrivons cette nouvelle technique de mesure distribuée à haute résolution spatiale (30 cm) et basée sur les échos Brillouin (appelée BEDS pour *Brillouin echoes distributed sensing*). Cette méthode nous permettra d'observer l'effet des irrégularités de la microstructure et des contraintes liées à l'enroulement sur la fréquence Brillouin. Afin d'obtenir une estimation quantitative des irrégularités de la fibre nous avons utilisé la relation liant la fréquence Brillouin avec l'indice effectif de mode et corrélé celui-ci avec la variation de la microstructure grâce à des simulations. Ainsi nous sommes capables de caractériser l'homogénéité des PCF dépendant du processus de fabrication.

2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les deux PCFs ont une structure hexagonale et leurs coupes transversales sont présentées dans la figure 1. Elles sont faites à partir du même arrangement de tubes capillaires mais elles proviennent de différentes préformes. Les fluctuations du diamètre observées pendant la fabrication étaient plus prononcées pour la première fibre (#1) que pour la deuxième (#2). Les diamètres du cœur, des trous, le *pitch*, et la longueur des fibres sont 5.5 μm , 2.7 μm , 4.1 μm , 100 m pour la fibre #1 et 5.5 μm , 2.3 μm , 3.9 μm , 400 m pour la fibre #2.

Dans un premier temps nous avons effectué une mesure du spectre de gain et du seuil Brillouin. Les mesures ont été réalisées à 1.55 μm à partir de montages expérimentaux identiques à ceux utilisés dans la référence [3]. Comme ces mesures sont influencées par les contraintes, les variations de la température et les fluctuations de la microstructure le long de la fibre, elles sont appelées "intégrées". Comme le montre la figure 1, les spectres Brillouin présentent une allure asymétrique et une largeur plus grande que celles observées dans les fibres SMF. La largeur à mi-hauteur du pic passe de 55 MHz (#1) et 60 MHz (#2) en régime spontané à environ 10 MHz en régime stimulé. Cet élargissement spectral de la raie Brillouin observé dans les PCFs à petit coeur est essentiellement du à la présence de plusieurs modes acoustiques longitudinaux permis par la microstructure air-silice [3].

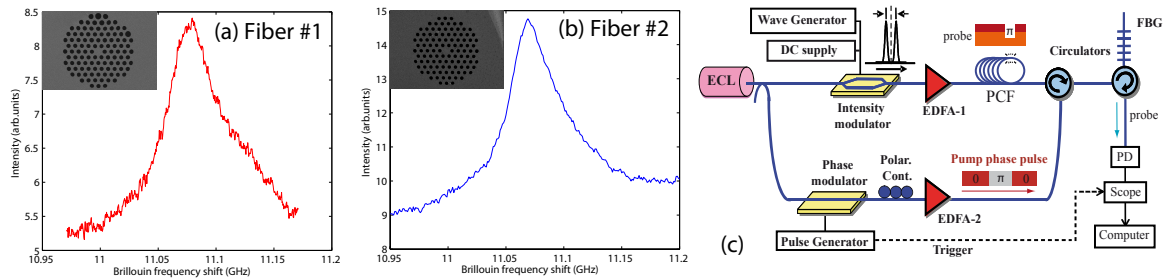


FIGURE 1 : Spectre Brillouin dans (a) fibre # 1 et (b) fibre # 2 à $1.55 \mu\text{m}$ pour une puissance de 11 dBm sous le seuil Brillouin, (c) Montage expérimentale du BEDS.

Le seuil Brillouin théorique est donné par [4] : $P_{Th} = \frac{C \cdot K \cdot A_{eff}}{g_B \cdot L_{eff}}$ où A_{eff} est l'aire effective, L_{eff} la longueur effective, $C=21$ et g_B le gain Brillouin. Le valeur K dépend du type de fibre et s'élève à 3/2 si la polarisation change aléatoirement. Cette définition du seuil suppose qu'il est atteint si la puissance réfléchiée est égale à celle transmise. Pour des raisons pratiques nous définissons le seuil comme le point auquel la puissance réfléchiée est égale à 1% de la puissance d'entrée. Avec cette définition, en fonction de la longueur et de l'atténuation de la fibre il était nécessaire d'adapter la valeur C à 15.5 pour la fibre #1 et 16 pour la fibre #2 (ajusté à partir de simulations). Les valeurs théoriques du seuil Brillouin peuvent ainsi être calculé à 25.1 dBm (#1) et 20.2 dBm (#2). La mesure du seuil Brillouin utilise le même montage expérimental que pour la mesure du spectre Brillouin mais sans la détection hétérodyne. Les valeurs expérimentales s'élèvent à 26.7 dBm (#1) et 20.2 dBm (#1) et sont en bon accord avec la théorie.

Pour la cartographie de la fréquence Brillouin, nous avons utilisé la technique BEDS qui diffère essentiellement de la technique conventionnelle *Brillouin optical time domain analysis* (BOTDA) par l'utilisation d'une impulsion de phase à la place d'une impulsion d'intensité (BOTDA). Cette méthode permet en effet de dépasser la limite de résolution imposée par le temps de vie de l'onde acoustique ($\sim 10\text{ns}$) [5, 6]. Le montage est schématisé dans la figure 1 (c). La sortie du laser est séparée en deux bras où l'un sert pour le signal continu décalé de la fréquence Brillouin et l'autre pour la pompe sur laquelle le saut de phase de π est inscrit. Les deux ondes sont amplifiées et injectées chacune d'un côté de la fibre. Le signal Brillouin passe par un réseau de Bragg pour supprimer l'onde Anti-Stokes et la lumière résiduelle de la pompe. Il est ensuite enregistré dans l'oscilloscope. La durée du saut de phase (ici 3 ns) correspond à 30 cm de résolution longitudinale. Les résultats pour la fibre #1 sont présentés dans la figure 2 (a).

Les données sont moyennées sur plusieurs mesures et convoluées par une fonction rectangle pour minimiser le bruit de mesure. En extrayant la fréquence Brillouin (figure 2 (b),(c)) on peut observer des fluctuations d'échelles différentes. Pour la fibre #1 on identifie une variation de dimension longue (50 m) et d'environ 8 MHz d'amplitude. Cette variation est en fait liée à l'enroulement : la fibre est enroulée en deux couches de 50 m sur la bobine. Cette mesure est confirmée en inversant les côtés de la fibre : on obtient la mesure inverse. Les variations de dimension courte (tous les ~ 2 m) sont d'amplitude 5 ± 1 MHz. Elles indiquent une variation aléatoire de la microstructure. On observe également pour la fibre #2 une fluctuation de dimension longue d'environ 5 MHz qui correspond à 100 m de la fibre, soit une couche

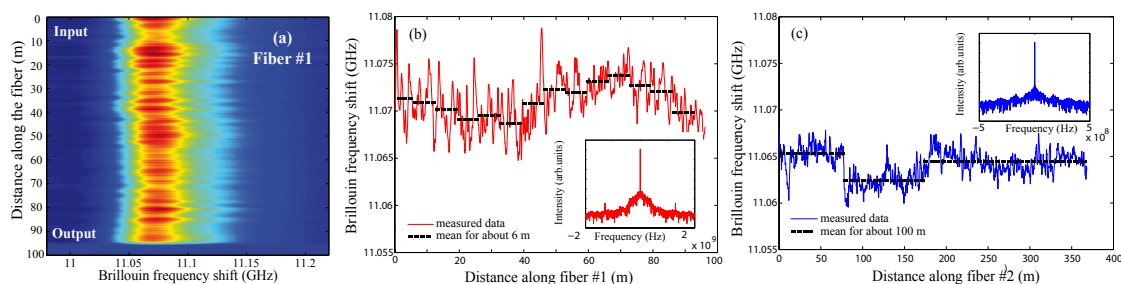


FIGURE 2 : (a) Cartographie de la fibre # 1 par la méthode BEDS avec une résolution spatiale de 30 cm et fréquentielle de 1 MHz, (b), (c) fréquence Brillouin distribuée le long de la fibre # 1 et # 2 respectivement.

sur la bobine. Les fluctuations de dimension courte tous les 2-3 m sont moins prononcées (3 ± 1 MHz) que dans la fibre #1 comme on peut le voir sur la figure 2 (b) et (c). Ce fait est aussi confirmé par la transformée de Fourier insérée en encart dans les figure 2 (b) et (c) où l'on voit que le piédestal autour du pic est plus important pour la fibre #1 que #2. Afin d'obtenir une estimation précise des variations de la microstructure nous avons d'une part calculé l'indice effectif de mode distribué par l'équation $v_B = \frac{2n_{\text{eff}}V_L}{\lambda_P}$ où $V_L = 5960$ m/s, $\lambda_P = 1.55 \mu\text{m}$ et v_B la fréquence du décalage Brillouin. D'autre part nous utilisons une simulation d'éléments finis pour lier la variation de l'indice effectif aux variations homotétiques de la microstructure, en faisant varier l'échelle des images MEB des fibres. En comparant les valeurs expérimentales et les valeurs de la simulation on obtient des variations d'échelle de la microstructure suivantes : fluctuations de dimension courte : $2.9 \pm 0.6\%$ (#1) et $1.9 \pm 0.6\%$ (#2), fluctuations de dimension longue : 4.7% (#1) et 3.2% (#2). Ces résultats sont comparables à ceux données par des fabricants des fibres [7].

CONCLUSION

Dans ce travail nous avons analysé et cartographié deux fibres optiques microstructurées à l'aide d'une nouvelle méthode de mesure distribuée à haute résolution de 30 cm, basée sur les echos Brillouin. Nous avons montré l'effet des inhomogénéités de la microstructure et des contraintes sur la fréquence Brillouin. En comparant avec des simulations il nous a été possible d'extrapoler des informations quantitatives concernant les variations structurelles des fibres optiques et de leur diamètre de coeur.

RÉFÉRENCES

- [1] P. Dainese, P. S. J. Russell, N. Joly, J. C. Knight, G. S. Wiederhecker, H. L. Fragnito, V. Laude, and A. Kheif, "Stimulated Brillouin scattering from multi-GHz-guided acoustic phonons in nanostructured photonic crystal fibres," *Nat. Phys.* **2**(6), 388–392 (2006).
- [2] YK. Dong, P. Dainese, XY. Bao, L. Chen, "Distributed temperature sensing based on birefringence effect on transient Brillouin grating in a polarization-maintaining photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* **34**(17), 2590–2592 (2009).
- [3] J.-C. Beugnot, T. Sylvestre, D. Alasia, H. Maillotte, V. Laude, A. Monteville, L. Provino, N. Traynor, S. Foa-leng Mafang, and L. Thévenaz, "Complete experimental characterization of stimulated Brillouin scattering in photonic crystal fiber," *Opt. Exp.* **15**(23), 15517–15522 (2007).
- [4] R. G. Smith, "Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by Stimulated Raman and Brillouin Scattering," *Appl. Opt.* **11**(11), 2489 (1972).
- [5] L. Thévenaz, "Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers : state of the art and perspectives," *Front. Optoelectron. China* **3**(1), 13D21 (2010).
- [6] S. Foa-leng Mafang, J.-C. Beugnot and L. Thévenaz, "Optimized configuration for high resolution distributed sensing using Brillouin echoes," *75032C(7503)*, Proceedings SPIE, UK, Edinburgh (2009).
- [7] Crystal Fibres, <http://www.nktpotonics.com/>.