DE LA CONVERSION DE FREQUENCE DANS LES FIBRES MICROSTRUCTUREES VERS DES CAPTEURS A FIBRE OPTIQUE NON-LINEAIRE

K. Tarnowski¹, A. Anuszkiewicz¹, J. Olszewski¹, P. Mergo², B. Frisquet³, B. Kibler^{3,*}, W. Urbanczyk¹

¹Institute of Physics, Wroclaw University of Technology, Wybrzeze Wyspianskiego 27, 50-370 Wroclaw, Poland ²Laboratory of Optical Fiber Technology, Maria Curie-Sklodowska University, 20-031 Lublin, Poland ³Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), UMR 6303 CNRS/Université de Bourgogne, Dijon, France

* <u>bertrand.kibler@u-bourgogne.fr</u>

RESUME

Nous étudions la conversion non-linéaire de fréquence dans une fibre microstructurée air/silice biréfringente soumise à des contraintes extérieures pour une application de type capteur à fibre optique non-linéaire. Nous présentons la possibilité de décaler en fréquence le processus d'instabilité de modulation vectorielle par les modifications des propriétés linéaires de la fibre induites par pression hydrostatique. Les mesures expérimentales sont en bon accord avec les prédictions analytiques et numériques.

MOTS-CLEFS : optique non-linéaire ; capteurs ; conversion de fréquence

1. INTRODUCTION

Il est bien connu que les fibres optiques peuvent être utilisées comme des éléments actif et passifs de capteurs à fibre optique pour mesurer une grande variété de grandeurs physiques, comme la température, la pression, la rotation, l'accélération, etc... [1-4]. Cette technologie emploie généralement des mécanismes de détection différents basés sur des modulations induites de mesures optiques tels que la phase, la polarisation, et l'intensité. Les principes de détection utilisés jusqu'ici sont généralement fondés sur une interaction linéaire de paramètres physiques externes avec la lumière guidée. Très récemment, une approche alternative a été proposée grâce aux dernières avancées en optique non-linéaire directe de processus de conversion de fréquence à des variations de la dispersion de la fibre. Le principe de fonctionnement de ces capteurs s'appuie sur le suivi du décalage des longueurs d'onde générées par les processus non-linéaires scalaires de mélange à quatre ondes (FWM) sous différentes contraintes environnementales (température, pression, etc...) qui modifient la dispersion de tréquence, scalaire et vectorielle, dans une fibre microstructurée biréfringente soumise à des contraintes extérieures, de type pression hydrostatique.

2. PROPRIETES DE LA FIBRE ET THEORIE

Des fibres microstructurées biréfringentes à très haute sensibilité polarimétrique à la pression (et très faible sensibilité à la température) ont été récemment démontrées, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour les détecteurs de pression sur fibre optique [8-9]. Dans ce travail, nous proposons d'utiliser ce type de fibre microstructurée air/silice avec une sensibilité accrue à la pression hydrostatique comme un capteur à fibre optique non-linéaire. La section transversale particulière de cette fibre est représentée par la figure 1(a). Son cœur possède au centre une inclusion elliptique dopée GeO₂. L'axe le plus long de l'ellipse est perpendiculaire à la rangée des plus petits trous d'air. La distribution spécifique des trous dans la partie extérieure de la gaine microstructurée implique des propriétés mécaniques qui diffèrent le long de son axe de symétrie. Par conséquent, la charge symétrique des contraintes dans la région du cœur, ce qui se traduit par un changement significatif dans les propriétés de biréfringence modale. La figure 1(b) présente les variations significatives des biréfringences de phase *B* et de groupe *G* de la fibre en fonction de la pression *p* appliquée. Ces résultats numériques sont basés sur le calcul des constantes de propagation (β_x et β_y) des deux

modes fondamentaux de la fibre biréfringente (orientés selon les axes x et y) en prenant en compte les corrections de contrainte induite sur l'indice de réfraction (détails de la méthode dans Réf. [10]). Rappelons que $B = \lambda(\beta_x - \beta_y)/(2\pi)$ et $G = c(\beta_{1x} - \beta_{1y}) = B - \lambda dB/d\lambda$ [11]. Nous observons que l'augmentation de la pression entraîne une diminution de B, mais aussi de G. En particulier, le décalage de B est quasi-linéaire avec la pression : $dB/dp = -0.6 \times 10^{-5}$ MPa⁻¹ et indépendant de la longueur d'onde. Nous avons vérifié que la pression n'affecte pas les courbes de dispersion de vitesse de groupe des deux modes fondamentaux. En d'autres termes pour la conversion non-linéaire de fréquence, cela signifie qu'un seul paramètre linéaire, à savoir la biréfringence de groupe, est sensible à la pression. En utilisant les relations analytiques simples décrivant le spectre de gain de MI pour une fibre à forte biréfringente avec une dispersion anormale [11], on peut déduire le décalage résultant ($\Delta F_{\rm S}$ et $\Delta F_{\rm V}$) des fréquences de bandes de gain pour les MI scalaire et vectorielle. Pour la MI scalaire, la fréquence angulaire du gain maximal par rapport à la pompe est $\Omega_{\rm s} = 2\pi F_{\rm S} = \pm (2\gamma P_0/|\beta_2|)^{1/2}$, γ étant le coefficient non-linéaire de la fibre (15 W⁻¹.km⁻¹) et P_0 la puissance d'entrée. Le coefficient γ a été vérifié comme insensible à la pression. L'impact résultant de la pression appliquée sur la MI scalaire est alors $dF_s/dp = 0$. Pour la MI vectorielle, la fréquence angulaire du gain maximal pour une faible puissance est donnée par la relation suivante $\Omega_{\rm V} = 2\pi F_{\rm V} = \pm G/(c\beta_2)$. Le décalage correspondant induit par les changements de pression est $dF_V/dp = \pm 1/(2\pi c\beta_2) \cdot dG/dp = \pm 1.13$ THz/MPa, en utilisant les caractéristiques de la fibre à la longueur d'onde de pompe $\lambda_{\rm P} = 1064$ nm ($G = -1.42 \times 10^{-4}$; dispersion de vitesse de groupe $\beta_2 = -2.82 \text{ ps}^2/\text{km}$). Comme prévu, seules les bandes de MI vectorielle sont sensibles à la pression et leur décalage dépend de façon linéaire aux variations de pression.



Figure 1 : (a) Image MEB de la section transverse de la fibre microstructurée air/silice. (b) Dépendance spectrale des biréfringences de phase B et de groupe G calculées pour diverses pressions appliquées. (c) Spectres mesurés des bandes de MI pour différentes pressions. (d) Zoom sur les bandes de MI vectorielle. (e) Décalages en fréquence des pics de MI vectorielle en fonction de la pression appliquée (la valeur de la pente des ajustements linéaires est indiquée).

3. EXPERIENCES ET SIMULATIONS

Pour étudier l'effet de pression sur les processus d'instabilités de modulation (MI) scalaire et vectorielle, nous avons utilisé un laser commercial quasi-continu de forte puissance à 1064 nm. Une combinaison lame demi-onde / polariseur a été introduite pour modifier la puissance d'entrée, tout en gardant la polarisation linéaire d'entrée à 45° par rapport aux axes de la fibre biréfringente

afin d'exciter à la fois les processus de MI scalaire et vectorielle. L'onde pompe est ensuite injectée dans la fibre puis recueillie à l'aide d'objectifs de microscope. Les spectres de sortie sont analysés selon les deux modes polarisés orthogonalement avec un analyseur de spectre optique. La fibre est soumise à des changements de pression dans la gamme de 0,1 à 5 MPa (0,1 MPa = pression atmosphérique). Notre chambre de pression remplie d'huile nous a permis d'appliquer une pression hydrostatique sur un segment de fibre de 38 cm. La longueur totale de la fibre est de 80 cm et sa partie centrale était placée à l'intérieur de la chambre de pression. Une puissance crête de 1.2 kW est requise pour observer simultanément les bandes de MI scalaire et vectorielle (voir figure 1(c)). Nous notons trois paires de bandes latérales (deux scalaires et une vectorielle) situées symétriquement à $\pm\Omega_s$, $\pm 2\Omega_s$ et $\pm\Omega_v$ de chaque côté de la pompe. La figure 1(c) présente les spectres de sortie enregistrés pour des pressions croissantes. Comme d'après les prévisions analytiques, les bandes de MI scalaire ne sont pas modifiées, tandis que les bandes de MI vectorielle sont clairement décalées en fréquence de la pompe (voir figure 1(d). Des ajustements linéaires sont obtenus pour le décalage en fréquence des bandes latérales avec une valeur de pente moyenne égale à 0,33THz/MPa (voir figure 1(e)). Nos résultats expérimentaux confirment bien que le processus de MI scalaire est insensible à la pression hydrostatique, tandis que le processus de MI vectorielle est fortement dépendant de la pression. Le décalage en fréquence induit par la pression pour la MI vectorielle MI est inférieur à la moitié de la valeur estimée par les formules analytiques. Dans l'expérience, seulement une moitié de la longueur de la fibre est exposée à une pression hydrostatique, ce qui est susceptible de causer ce désaccord. Afin d'examiner le décalage en fréquence le long de la fibre, nous avons procédé à des simulations numériques basées sur des équations non-linéaires de Schrödinger couplées correspondantes aux deux modes de polarisation [11], et en tenant compte des variations locales de biréfringence induites par pression. D'après nos simulations, la sensibilité de la MI vectorielle résultante de la pression est de ± 0.43 THz/MPa. Les résultats numériques confirment que le raccourcissement de la longueur de fibre soumise à la pression hydrostatique diminue la sensibilité globale du capteur.

4. CONCLUSION

Nous avons étudié l'impact de la pression hydrostatique sur les processus non-linéaires de MI scalaire et vectorielle dans une fibre microstructurée biréfringente. Nous avons montré que le processus de MI dépendant de la polarisation, sensible à des modifications de la biréfringence de groupe de la fibre, présente un avantage indéniable pour développer un capteur à fibre optique non-linéaire (sensibilité du même ordre que le capteur à fibre linéaire de la Réf. [9]), contrairement au processus scalaire totalement insensible à la pression [12]. De plus, il a déjà été démontré dans la Réf. [7] que la MI scalaire peut être sensible à des paramètres externes qui influent sur la dispersion du mode guidé, ceci ouvre donc la possibilité de détecter simultanément plusieurs paramètres physiques.

5. **References**

- [1] B. Culshow, J. Dakin, Optical Fiber Sensors: Systems and Applications vol. 1 (Artech House, 1988).
- [2] K. T. V. Grattan, B. T. Meggitt, Optical Fiber Sensor Technology (Chapman & Hall, 1995).
- [3] B. Lee, Opt. Fiber Technol. 9, 57-79 (2003).
- [4] O. Frazão, J. L. Santos, F. M. Araújo, and L. A. Ferreira, Laser & Photonics Rev. 2, 449-459 (2008).
- [5] J. R. Ott, M. Heuck, C. Agger, P. D. Rasmussen, and O. Bang, Opt. Express 16, 20834-20847 (2008).
- [6] M. H. Frosz, A. Stefani, and O. Bang, Opt. Express 19, 10471-10484 (2011).
- [7] B. Gu, W. Yuan, M. H. Frosz, A. P. Zhang, S. He, and O. Bang, Opt. Letters 37, 794-796 (2012).
- [8] T. Martynkien, G. Statkiewicz-Barabach, J. Olszewski, et al., Opt. Express 18, 15113-15121 (2010).
- [9] A. Anuszkiewicz, G. Statkiewicz-Barabach, et al., Opt. Express 20, 23320-23330 (2012).
- [10] M. Szpulak, T. Martynkien, W. Urbanczyk, Appl. Optics 43, 4739-4744 (2004).
- [11] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, 5th ed. (Academic Press, 2013).
- [12] K. Tarnowski, A. Anuszkiewicz, J. Olszewski, et al., Opt. Letters 38, 5260-5263 (2013).