

CARACTÉRISATION DU GAIN BRILLOUIN PAR SPECTROSCOPIE EN CAVITÉ RÉSONANTE SONDEE PAR UN SIGNAL À DÉRIVE DE FRÉQUENCE

Ananthu Sebastian, Stéphane Trebaol, Pascal Besnard¹

¹ Univ Rennes, CNRS, Institut Foton-UMR 6082, ENSSAT, Lannion, France

stephane.trebaol@enssat.fr

RÉSUMÉ

Nous montrons qu'un simple sondage d'une cavité résonante par un signal optique à dérive de fréquence (« *Cavity Ring-Down Method* ») permet d'extraire, à la fois, ses paramètres de couplage et de pertes, et de gain Brillouin du matériau la constituant. Ces mesures de gain sont en accord avec celles référencées dans la littérature.

MOTS-CLEFS : gain Brillouin ; laser Brillouin ; CRDM.

1. INTRODUCTION

Les lasers sont connus pour émettre un rayonnement cohérent. Il s'évalue par la largeur de bande spectrale d'émission, très variable suivant les lasers : du MHz à la centaine de MHz pour les lasers à semi-conducteurs, dizaine de kHz pour les lasers solides, les lasers à gaz ... Le besoin en lasers cohérents, de faible largeur de raie d'émission, reste constant que ce soient pour des sujets de recherche ou des applications très variés (capteurs, spectroscopie, ...) [1-3]. L'une des approches prometteuses pour réaliser des lasers compacts à largeur de raie étroite est le laser Brillouin [4] basée sur la non-linéarité diffusion Brillouin stimulée (SBS). L'établissement de SBS dans une cavité optique donne lieu à l'émission cohérente d'une onde de Stokes, dont les niveaux de bruit sont abaissés par rapport à ceux de la pompe optique, que ce soient pour le bruit de fréquence [5] ou d'intensité [6]. Les paramètres importants à évaluer dans le SBS sont le décalage Brillouin, la largeur de gain et aussi le gain matériau. Ce dernier paramètre se mesure par des techniques pompe-sonde [7] ou hétérodyne [8] et exigent une certaine longueur de fibre pour avoir suffisamment de puissance optique rétrodiffusée pour l'onde Stokes.

Nous proposons, dans cette communication, un simple sondage de la cavité résonante par un signal optique à dérive de fréquence (« *Cavity Ring-Down Method* » ou CRDM [9]) pour extraire, à la fois, ses paramètres de couplage et de pertes, et de gain Brillouin du matériau la constituant.

2. DESCRIPTION DU MONTAGE EXPÉRIMENTALE POUR LA SPECTROSCOPIE DE CAVITÉ RÉSONANTE

La cavité générant le Brillouin est un résonateur en anneau en fibre de silice à maintien de polarisation, longue de 20 mètres. La figure 1 donne une illustration de l'expérience. La puissance d'un laser pompe, couplée à un amplificateur à fibre dopée Erbium et un atténuateur permettant le contrôle de la puissance injectée (zone bleutée) est injectée dans une cavité à fibre en anneau (zone verte) via un circulateur optique si bien que le signal pompe est non résonant. Ce dernier permet de générer une onde Stokes résonante à une fréquence ν_S décalée du décalage Brillouin ν_B , que l'on fixe au maximum de la courbe de gain, de coefficient à cette fréquence g_B . Les pertes dans la cavité pour l'onde Stokes sont estimées via le temps de vie des photons τ_0 . Un coupleur permet d'extraire à la fois l'onde pompe transmise ainsi que l'onde Stokes, via un taux de couplage donnée par un de vie τ_e . Cette cavité est sondée par un signal laser (zone orangée), dont la fréquence est modulée dans le temps. Ainsi le signal sonde générera, en sortie de la cavité, une réponse différente suivant le positionnement de la fréquence sonde $\nu(t)$ par rapport à l'onde Stokes (raie rouge). Le principe de la méthode CRDM consiste donc à sonder la réponse transitoire d'un mode résonant Stokes, en utilisant un laser étroit accordable.

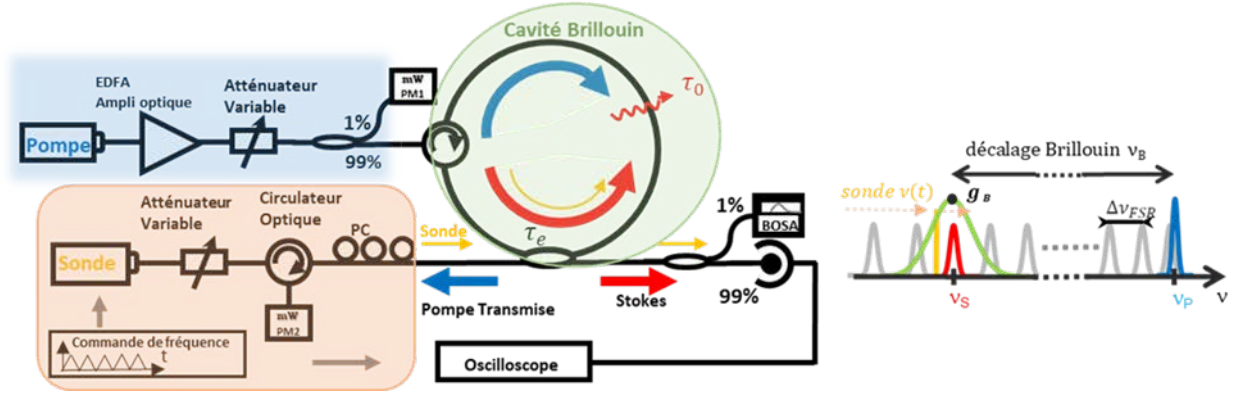


Fig. 1 : Représentation de la méthode CRDM. Un faisceau pompe (zone bleutée) permet de générer un signal Brillouin dans une cavité en anneau à fibre à maintien de polarisation (zone verte). Cette onde Stokes (figure à droite) est décalée d'une fréquence Brillouin ν_B par rapport à la fréquence pompe et est fixée au maximum de gain g_B . Le mode optique (raie rouge) est sondé par un signal sonde (zone orangée) dont la fréquence subit une variation linéaire dans le temps.

Le transitoire généré peut-être calculé analytiquement et l'ajustement de cette courbe théorique avec la courbe expérimentale permet d'extraire τ_e et τ_0 , soit le coefficient de couplage κ égal à $2\tau_L/\tau_e$ ainsi que l'atténuation de l'intensité optique Stokes a^2 donné par $1 - 2\tau_L/\tau_0$. τ_L est le temps de parcours de l'énergie dans la cavité (soit $2nL/c$ avec c la vitesse de la lumière, n l'indice, L la longueur de l'anneau).

3. MESURE DU GAIN BRILLOUIN g_B

La première mesure sans faisceau pompe permet de déduire les temps τ_e et τ_0 de la cavité passive. Ce dernier est donc relié à l'atténuation du faisceau :

$$a_0^2 = 1 - 2 \frac{\tau_L}{\tau_0} = \beta e^{-\alpha L}. \quad (1)$$

Avec β les pertes résiduelles, α le coefficient de pertes linéiques de la fibre

Augmenter la puissance de pompe P_0 va générer une amplification Brillouin, ce qui revient à diminuer l'atténuation, ce qui peut aller jusqu'à une amplification auquel cas $a^2 > 1$ et $\tau_0 < 0$ et le seuil laser est atteint pour l'onde Stokes d'ordre 1. Cela induit une nouvelle atténuation et une nouvelle valeur de τ_0 :

$$a^2 = 1 - 2 \frac{\tau_L}{\tau_0} = \beta e^{-\alpha L} e^{g_B P_0 L_{eff} / S_{eff}} = a_0^2 e^{g_B P_0 L_{eff} / S_{eff}}. \quad (2)$$

L_{eff} est la longueur effective, S_{eff} la surface modale effective.

Le gain Brillouin peut-être alors aisément déduit :

$$g_B = \frac{2S_{eff}}{P_0 L_{eff}} \ln \left(\frac{a}{a_0} \right). \quad (3)$$

La figure 2 donne les valeurs déduites de la méthode CRDM pour différentes puissances incidentes de pompe, P_{in} . Une valeur moyenne de $2,08 \cdot 10^{-11}$ m/W et un écart type de $1,1 \cdot 10^{-12}$ m/W sont obtenus, proche d'une de nos mesures par méthode hétérodyne ($2,58 \cdot 10^{-11} \pm 1,9 \cdot 10^{-12}$ m/W), et très proche de valeurs obtenues par une méthode pompe-sonde, $2 \cdot 10^{-11}$ m/W dans la référence [10], $2,29 \cdot 10^{-11}$ m/W dans la référence [11].

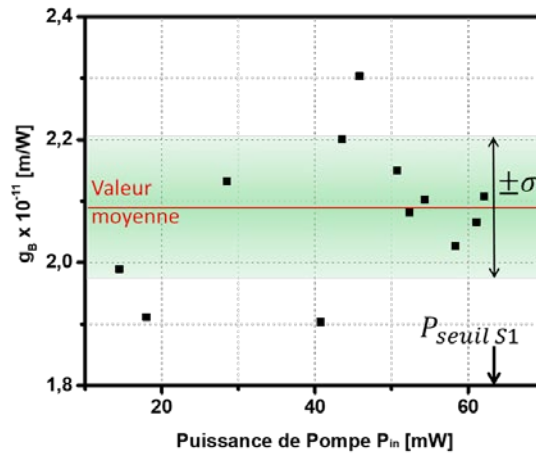


Fig. 2 : Valeurs de gain obtenues pour différentes puissances incidentes de pompe par la méthode CRDM.

CONCLUSION

Nous montrons qu'une sonde à dérive de fréquence permet d'extraire, pour une cavité résonante, les paramètres de pertes et de couplage ainsi que de gain Brillouin. Il est important de comparer la longueur de fibre (20 m) et la puissance incidente (60 mW) aux longueurs usuelles de caractérisation (quelques km et quelques centaines de mW). Cette méthode peut s'appliquer à des cavités intégrées.

Remerciements : Nous remercions BPI FRANCE et le Pôle Images & Réseaux ainsi que l'UBL dans l'accompagnement du projet FUI AAP20 SOLBO.

RÉFÉRENCES

- [1] K. Predehl, G. Grosche, S. Raupach, S. Droste, O. Terra, J. Alnis, T. Legero, T. Hänsch, T. Udem, R. Holzwarth et al., "A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place," Science vol. 336, no. 6080, pp. 441-444, 2012.
- [2] J. Geng, C. Spiegelberg, and S. Jiang, "Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 17, no. 9, pp. 1827-1829, 2005.
- [3] P. J. Rodrigo and C. Pedersen, "Reduction of phase-induced intensity noise in a fiber-based coherent Doppler lidar using polarization control," Opt. Express vol. 18, no. 5, pp. 5320-5327, 2010.
- [4] E. P. Ippen and R. H. Stolen, "Stimulated Brillouin scattering in optical fibers," Applied Physics Letters, vol. 21, no. 11, pp. 539-541, 1972.
- [5] K. Hey-Tow, Y. Leguillon, S. Fresnel, P. Besnard, L. Brilland, D. Méchin, P. Toupin, Y. Troles, "Toward More Coherent Sources Using a Microstructured Chalcogenide Brillouin Fiber Laser," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 25, no. 3, pp. 238-241, 2013.
- [6] A. Sebastian, I. V. Balakireva, S. Fresnel, S. Trebaol and P. Besnard, "Relative intensity noise in a multi-Stokes Brillouin laser," Optics Express, vol. 26, pp. 33700-33711, 2018.
- [7] N. Shibata, R. Waarts, and R. Braun, "Brillouin-gain spectra for single-mode fibers having pure-silica, GeO₂-doped, and P₂O₅-doped cores," Opt. Lett. vol. 12, no. 4, pp. 269-271, 1987.
- [8] R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy and R. M. Derosier, "Spontaneous Brillouin scattering for single-mode optical-fibre characterisation," Electronics Letters, vol. 22, no. 19, pp. 1011-1013, 1986.
- [9] Y. Dumeige, S. Trebaol, L. Ghisa, T. K. Ngan Nguyen, H. Tavernier, and P. Féron, "Determination of coupling regime of high-Q resonators and optical gain of highly selective amplifiers," J. Opt. Soc. Am. B vol. 25, pp. 2073-2080, 2008.
- [10] M. Nikles, L. Thevenaz, and P. A. Robert, "Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers," J. Light. Technol. vol. 15, pp. 1842-1851, 1997.
- [11] P. D. Dragic, "Brillouin Gain Reduction Via B₂O₃ Doping," J. Light. Technol. vol. 29, no. 7, 967-973, 2011.