

DIFFUSION BRILLOUIN ET PHONONS ACOUSTIQUES DANS LES FIBRES OPTIQUES SUB-LAMBDA

Vincent Laude¹, Jean-Charles Beugnot¹, Hervé Maillotte¹, Thibaut Sylvestre¹

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

vincent.laude@femto-st.fr

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous revenons sur l'évolution conceptuelle récente de la description de la diffusion Brillouin dans les fibres optiques dont le diamètre est de l'ordre de la longueur d'onde optique. Partant des fibres photoniques à petit cœur qui supportent des phonons acoustiques de polarisation hybride, mélange de déplacements longitudinaux et de cisaillement, nous introduisons le concept de génération de paquets de phonons acoustiques *via* les forces optiques électrostrictives de volume et de surface.

MOTS-CLEFS : *Diffusion Brillouin ; Phonons acoustiques ; Électrostriction*

1. INTRODUCTION

L'explication standard de la diffusion Brillouin dans les milieux solides transparents repose sur la diffraction de la lumière par des ondes acoustiques se propageant en leur sein. Dans les fibres optiques en silice, la diffusion Brillouin stimulée (*stimulated Brillouin scattering*, SBS) est associée à des ondes acoustiques de pression ou de densité, de même nature que les ondes sonores, dont la polarisation est supposée purement longitudinale [1, 2]. Une telle description repose classiquement sur l'hypothèse que le milieu de propagation est très grand, donc que les ondes acoustiques ne voient pas les surfaces, mais provient également et fortuitement de la symétrie du tenseur photoélastique décrivant l'interaction acousto-optique de volume dans les milieux isotropes.

Lors de la diffusion Brillouin stimulée, l'onde optique diffractée est émise en sens inverse de l'onde incidente. Cette géométrie d'interaction correspond à l'accord de phase avec une onde acoustique dont le nombre d'onde est deux fois plus grand que la longueur d'onde optique, bien que sa vitesse soit environ 10^5 fois plus petite. Dans la diffusion Brillouin vers l'avant, les deux ondes optiques sont au contraire co-propagatives et le nombre d'onde acoustique axial est quasiment nul. Une telle onde se propage donc dans la section de la fibre et se réfléchit à l'interface avec la gaine. La diffusion Brillouin par des ondes acoustiques guidées par la fibre (*guided acoustic wave Brillouin scattering*, GAWBS) en résulte [3]. Malgré son nom, cette interaction fait intervenir des ondes élastiques de polarisation générale, aussi bien longitudinale que de cisaillement.

2. MODES ACOUSTIQUES HYBRIDES

Pourquoi ne passe-t-on pas continûment de la description de la diffusion Brillouin stimulée (vers l'avant) à celle du GAWBS, et que change le fait que les ondes élastiques voient la surface extérieure de la fibre ? Il y a une dizaine d'années environ, l'étude de la diffusion Brillouin stimulée dans les fibres photoniques à petit cœur a permis de répondre à ces questions [4, 5]. Quand le diamètre du cœur est de l'ordre de quelques microns ou moins, la fibre photonique supporte des modes élastiques guidés ; Ces modes ne sont autres que des phonons acoustiques de polarisation hybride, mélange de déplacements longitudinaux et de cisaillement. Dans le cas de la diffusion Brillouin vers l'avant, on retrouve les mêmes phonons acoustiques fortement confinés dans le cœur, mais considérés pour un nombre d'onde quasiment nul [6, 7].

3. ÉLECTROSTRICTION ET FORCES OPTIQUES

La théorie classique de l'interaction acousto-optique dans les milieux solides diélectriques fait intervenir le tenseur photoélastique, qui relie linéairement le vecteur déplacement électrique au champ de déformations accompagnant l'onde élastique. L'efficacité de cet effet de volume peut être évaluée à l'aide d'une intégrale de recouvrement impliquant le carré du champ électrique (correspondant aux deux ondes optiques) et le champ de déformation (*strain*). Réciproquement, le battement optique, interférence en temps et en espace des deux ondes optiques, génère une force de volume d'électrostriction dans le solide [8]. Armé de ce concept, il n'est plus nécessaire de supposer que les phonons élastiques impliqués dans l'effet Brillouin naissent de l'agitation thermique : les forces optiques peuvent produire ces phonons – pourvu que l'accord de phase rende leur génération efficace. En résolvant l'équation élastodynamique (gouvernant les ondes élastiques) dans un régime de réponse forcée, nous avons pu expliquer la forme spectrale du gain Brillouin spontané et relier SBS et GAWBS dans les fibres photoniques [9].

4. EFFETS DE SURFACE

En sus des interactions de volume, les interactions de surface doivent être considérées quand le diamètre de la fibre devient plus petit que quelques microns. En effet, la surface se déforme sous l'action de l'onde élastique et oscille avec elle. En conséquence, la relation de dispersion des modes optiques guidés est modulée à la fréquence acoustique – et à ses multiples [10, 11]. Le fait de diminuer le diamètre de la fibre conduit également au fait que le mode optique remplit tout le volume du cœur et s'étend dans l'air extérieur. Il est ainsi en situation d'interagir efficacement avec les ondes élastiques qui se propagent à la surface. La démonstration expérimentale de la diffusion Brillouin par ces ondes élastiques de surface a été apportée récemment [12].

RÉFÉRENCES

- [1] R. Y. Chiao, C. H. Townes, and B. P. Stoicheff, "Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 12, p. 592, 1964.
- [2] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, 3rd ed. Academic Press, 2008.
- [3] P. J. Thomas, N. L. Rowell, H. M. van Driel, and G. I. Stegeman, "Normal acoustic modes and Brillouin scattering in single-mode optical fibers," *Phys. Rev. B*, vol. 19, p. 4986, 1979.
- [4] V. Laude, A. Khelif, S. Benchabane, M. Wilm, T. Sylvestre, B. Kibler, A. Mussot, J. M. Dudley, and H. Maillotte, "Phononic band-gap guidance of acoustic modes in photonic crystal fibers," *Phys. Rev. B*, vol. 71, p. 045107, 2005.
- [5] P. Dainese, P. Russell, N. Joly, J. Knight, G. Wiederhecker, H. Fragnito, V. Laude, and A. Khelif, "Stimulated Brillouin scattering from multi-GHz-guided acoustic phonons in nanostructured photonic crystal fibres," *Nat. Phys.*, vol. 2, p. 388, 2006.
- [6] P. Dainese, P. Russell, G. Wiederhecker, N. Joly, H. Fragnito, V. Laude, and A. Khelif, "Raman-like light scattering from acoustic phonons in photonic crystal fiber," *Optics express*, vol. 14, p. 4141, 2006.
- [7] J.-C. Beugnot, T. Sylvestre, H. Maillotte, G. Mélin, and V. Laude, "Guided acoustic wave Brillouin scattering in photonic crystal fibers," *Opt. Lett.*, vol. 32, p. 17, 2007.
- [8] N. M. Kroll, "Excitation of hypersonic vibrations by means of photoelastic coupling of high-intensity light waves to elastic waves," *J. Appl. Phys.*, vol. 36, p. 34, 1965.
- [9] J.-C. Beugnot and V. Laude, "Electrostriction and guidance of acoustic phonons in optical fibers," *Phys. Rev. B*, vol. 86, p. 224304, 2012.
- [10] P. T. Rakich, C. Reinke, R. Camacho, P. Davids, and Z. Wang, "Giant enhancement of stimulated Brillouin scattering in the subwavelength limit," *Phys. Rev. X*, vol. 2, p. 011008, 2012.
- [11] V. Laude and J.-C. Beugnot, "Generation of phonons from electrostriction in small-core optical waveguides," *AIP Advances*, vol. 3, p. 042109, 2013.
- [12] J.-C. Beugnot, S. Lebrun, G. Pauliat, H. Maillotte, V. Laude, and T. Sylvestre, "Brillouin light scattering from surface acoustic waves in a subwavelength-diameter optical fibre," *Nature Communications*, vol. 5, p. 5242, 2014.