

Journées GT5 - GT2
À la frontière de l'optique et de l'acoustique :
optomécanique, cristaux phoxoniques, effet
Brillouin, acousto-optique

<http://gdr-ondes.cnrs.fr/>

29 et 30 septembre 2016
Institut FEMTO-ST, Besançon
15 B avenue des Montboucons, 25030 Besançon

Résumés des communications

Avec l'aimable soutien de :



Optomécanique non-linéaire avec des nanotubes hybrides

Pierre Verlot

*Institut Lumière Matière, UMR5306 CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1
Campus LyonTech - La Doua, 69622 Villeurbanne CEDEX, France*

En seulement 20 ans d'existence, le domaine de l'optomécanique a considérablement progressé. Parmi les avancées les plus marquantes, la transposition réussie de ses concepts fondamentaux à l'échelle nanométrique est sans doute l'une des plus spectaculaire et contre-intuitive. En effet, l'idée force de l'optomécanique consiste à maximiser le couplage entre les déplacements d'un objet mécanique et une source de lumière cohérente. Dans ce contexte, la limite de diffraction est longtemps apparue comme une borne en-deçà de laquelle la miniaturisation des systèmes optomécanique deviendrait ineffective. Cette idée a été balayée de manière spectaculaire par l'apparition d'une nouvelle génération de systèmes nano-optomécaniques, incluant notamment les cristaux phoxoniques et les dispositifs en champ proche.

Lors de cet exposé, je présenterai une nouvelle approche extrême, permettant de coupler de manière très efficace des résonateurs à base de nanotube de carbone à de la lumière cohérente focalisée. Je montrerai le caractère hautement non-linéaire d'un tel système et montrerai comment il est possible d'exploiter ces propriétés pour contrôler le mouvement de ces résonateurs ou bien pour augmenter leur sensibilité en force, à des niveaux de sensibilité inédits.

Spatio-Temporal Imaging of the Acoustic Field Emitted by a Single Copper Nanowire

C. Jean¹, L. Belliard¹, T. W. Cornelius², O. Thomas², Y. Pennec³, M. Cassinelli⁴, M. E. Toimil-Molares⁴ and B. Perrin¹

¹ Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 06, CNRS UMR 7588, Institut des NanoSciences de Paris, F-75005, Paris, France

² Aix-Marseille Université, CNRS UMR 7334, IM2NP, F-13397 Marseille Cedex, France

³ Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie (IEMN), UMR CNRS 8520, UFR de physique, Université de Lille-1, Cité scientifique, 59652 Villeneuve-d'Ascq cedex, France

⁴ GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research, D-64291 Darmstadt, Germany

Résumé

The monochromatic and geometrically anisotropic acoustic field generated by 400nm and 120nm diameter copper nanowires dropped on a 10µm silicon membrane is investigated in transmission using three-dimensional time-resolved femtosecond pump-probe experiments. Two pump-probe time-resolved experiments are carried out at the same time on both side of the silicon substrate. In reflection, the first radial breathing mode of the nanowire is excited and detected. In transmission, the longitudinal and shear waves are observed. The longitudinal signal is followed by a monochromatic component associated with the relaxation of the nanowire's first radial breathing mode. FDTD simulations are performed and accurately reproduce the diffracted field. A shape anisotropy resulting from the large aspect ratio of the nanowire is detected in the acoustic field. The orientation of the underlying nanowires is thus acoustically deduced.

Coherent acoustic phonons with very high in-depth spatial resolution can be generated through the absorption of a femtosecond laser pulse by a nano-structure. Such generated acoustic waves exhibit a wavelength in the order of magnitude of tens of nanometers, which is proved useful for non-invasive ultrasonic imaging in biological tissues or for very high frequency optomechanics. However, the lateral resolution of such laser ultrasonic measurements is still limited by the diffraction of light that imposes a micrometric lateral resolution. In order to improve the lateral resolution down to the sub-micrometer scale, various approaches have been suggested. Among them, the use of nanostructures as acoustic transducers intergrated in scanning acoustic microscopy systems is promising.

Here[1], we propose and demonstrate the use of copper nanowires as efficient nanometric, monochromatic, tunable and anisotropic acoustic transducers. First, investigations of the radial breathing mode of the nanowires are performed using time-resolved pump-probe spectroscopy using a reflectivity setup. Then, a back side transmission setup is used to detect any acoustic feature generated by the nanowire and reaching the other side of the silicon membrane. This approach based on the spatial imaging of the acoustic field enables us to highlight the shape anisotropy of the nanowire-generated acoustic field. FDTD simulations are compared to the experimental acoustic field data and may allow a rough estimation of the nanowire-substrate contact size. The imaging of the transmitted 8GHz and 27GHz monochromatic acoustic waves through a 10 µm silicon membrane is a very important step towards the use of nano-objects as acoustic transducers for acoustic imaging with nanometric lateral resolution.

Bibliographie

[1] C. Jean, L. Belliard, T. W. Cornelius, O. Thomas, Y. Pennec, M. Cassinelli, M. E. Toimil-Molares and B. Perrin , "Spatio-Temporal Imaging of the Acoustic Field Emitted by a Single Copper Nanowire", Nano Letters, under review (2016).

Métrologie des microfils optiques par spectroscopie Brillouin

A. Godet¹, A. Ndao¹, K. Phan Huy¹, J.C. Beugnot¹, T. Sylvestre¹, S. Lebrun², G. Pauliat²

¹ Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon

² Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique, CNRS, Université Paris-Saclay, Palaiseau

Résumé

Nous présentons une nouvelle technique de mesure tout optique du diamètre de microfils de silice utilisant le processus de rétrodiffusion Brillouin. Nous montrons que les spectres Brillouin de ces microfils font apparaître des résonances acoustiques caractéristiques de leur géométrie. À l'aide d'un modèle numérique performant, l'excellent accord théorie expérience nous permet de déterminer le diamètre du microfil avec une précision comparable aux mesures FIB et MEB.

1. Introduction

Les microfils optiques sont des fibres de verre extrêmement fines ($\leq 1 \mu\text{m}$) obtenues par le chauffage puis l'étirement de fibres optiques employées dans les télécommunications [1]. Leurs diamètres sont pour la plupart mesurés à l'aide de méthodes difficile à mettre en œuvre (microscopie MEB, FIB), peu versatile (génération d'harmonique [1]), ou pas assez sensible (diffraction [2]). Notre méthode de mesure est basée sur le phénomène de rétrodiffusion Brillouin, qui permet d'exciter différentes familles d'ondes élastiques (longitudinales, cisaillement et de surface) couvrant un large spectre de résonances allant de 50 MHz à 11 GHz [3]. Chacune de ces résonances vérifie un accord de phase où le vecteur d'onde acoustique correspond à deux fois le vecteur d'onde optique ($K = 2Kp$). Le diamètre du microfil diminuant, celui-ci voit son indice de réfraction effectif diminuer et, par accord de phase, implique un décalage en fréquence des ondes élastiques. Le spectre Brillouin résultant est alors différent pour chaque diamètre et c'est à partir de cette relation que nous avons développé un modèle numérique pour prédire un spectre Brillouin en fonction de la géométrie du microfil.

2. Caractérisation

Les microfils ont été obtenus à partir d'une fibre standard SMF-28. Celle-ci est attachée à deux platines de translations motorisées qui étirent la fibre en même temps qu'une flamme ramollit sa partie centrale. La forme du microfil est contrôlée par les vitesses de déplacements des deux platines. Après étirage, le microfil reste relié aux sections non étirées de la SMF-28 par des transitions de forme exponentielle, ce qui facilite le couplage. Les microfils utilisés possèdent des diamètres allant de 600 nm à 1 μm à sur une longueur uniforme de 4 cm et des pertes de transmission de seulement 1 dB. Nous avons réalisé les mesures de spectre Brillouin dans ces microfils à l'aide d'une détection hétérodyne et d'un analyseur de spectre électrique à haute résolution [3].

Les résultats nous montrent une très bonne correspondance entre les spectres Brillouin théoriques et les spectres expérimentaux où les résonances dues aux ondes élastiques de surface et longitudinales se superposent très bien (cf. Figure 1). On peut distinguer grâce au modèle les résonances dues aux transitions et celles dues au microfil. La forme lorentzienne des pics de résonances nous montre aussi une bonne homogénéité des microfils et donc une bonne qualité de fabrication. Les diamètres alors déterminés par les spectres théoriques ont été confirmés par les mesures aux microscopes FIB et MEB avec une différence maximum de 5%. La sensibilité de notre outil peut aller jusqu'à 5 nm sur le diamètre, ce qui correspond à la limite du modèle numérique.

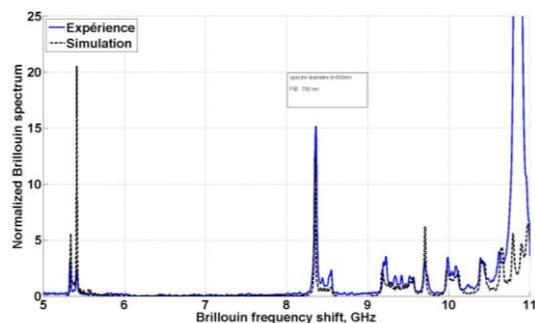


Figure 1: Spectres Brillouin expérimental et théorique d'un microfil de silice de 800 nm de diamètre

3. Conclusion

Nous avons mis au point une technique très efficace, passive et tout optique de métrologie des microfils. Elle présente une très faible marge d'erreur comparée aux techniques de microscopie. De plus, c'est une mesure qui peut se faire in-situ après étirage sans aucune manipulation du microfil contrairement à la microscopie FIB ou MEB. Cette technique inédite est un outil adapté pour le design de microfil.

4. Bibliographie

- [1] F. Warken *et al.*, "Fast profile measurement of micrometer-sized tapered fibers with better than 50-nm accuracy", Vol. 29, No. 15, Optics Letters, 2004.
- [2] U. Wiedemann *et al.*, "Measurement of submicrometre diameters of tapered optical fibers using harmonic generation", Vol. 18, No. 8, Optics Express, 2010.
- [3] J.C. Beugnot *et al.*, "Brillouin light scattering from surface acoustic waves in a subwavelength-diameter optical fiber", Nat. Commun, 5:5242 doi: 10.1038 (2014).

Diffusion Brillouin stimulée en présence de dispersion acoustique : Du modèle cohérent perturbatif au modèle inertiel

Carlos Montes et Éric Picholle,

*Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (IN ϕ NI), CNRS UMR 7336,
Université de Nice Sophia Antipolis, Parc Valrose, 06108 Nice cedex*

1. Introduction

Le modèle cohérent unidimensionnel à trois ondes [1,2] de la diffusion Brillouin stimulée (DBS) rend bien compte de toute la diversité de sa dynamique non linéaire dans les fibres optiques unimodales standard (régimes solitoniques, bifurcations, chaos, transferts de cohérence, etc.). Une série de résultats expérimentaux récents concernant la DBS dans des fibres microstructurées [3,4], dont les modes acoustiques accusent une structure spatiale complexe et peuvent présenter une dispersion de vitesse de groupe acoustique significative [5], montre toutefois la nécessité de prendre en compte la spécificité de ces composants.

2. Modèle cohérent perturbatif et modèle inertiel

Nous avons donc, dans un premier temps, adapté le modèle à trois ondes en intégrant une correction perturbative à l'équation gouvernant l'onde acoustique. Pour une dispersion acoustique modérée, cette correction permet de retrouver un accord quantitatif satisfaisant avec des expériences menées dans un laser Brillouin à fibre microstructurée, en particulier en régime solitonique [3,6].

Dans la limite des fortes dispersions acoustiques, il convient toutefois de prendre en compte la dynamique inertielle de l'onde acoustique (dérivées secondes spatiales et temporelles), dans un modèle inspiré des interactions laser-plasma [7]. On voit alors apparaître numériquement, aux fortes intensités, un nouveau type de miroir Brillouin inversé avec un mécanisme de transfert des fluctuations de phase entre ondes optiques [6].

Nous discuterons la pertinence de ces modèles dans les fibres microstructurées, ainsi que les difficultés théoriques liées à leur raccordement.

3. Bibliographie

- [1] J. Botineau, C. Leycuras, C. Montes et É. Picholle, "Stabilization of a stimulated Brillouin fiber ring laser by strong pump modulation", *J. Opt. Soc. Am. B* **6**, 300-312 (1989).
- [2] C. Montes, D. Bahloul, I. Bongrand, J. Botineau, G. Cheval, A. Mahmoud, É. Picholle et A. Picozzi, "Self-pulsing and dynamic bistability of cw-pumped Brillouin fiber ring lasers", *J. Opt. Soc. Am. B* **16**, 932-951 (1999). Attention : remplacer la formule (1b) par la (4) de la Ref. [1].
- [3] R.I. Woodward, E.J.R. Kelleher, S.V. Popov et J.R. Taylor, "Stimulated Brillouin scattering of visible light in small-core photonic crystal fibers", *Opt. Lett.* **39**, 2330 (2014).
- [4] J.C. Tchahame, J.-C. Beugnot, K. Phan Huy, V. Laude, A. Kudlinski et T. Sylvestre, "Surface Brillouin scattering in photonic crystal fibers" ; *Opt. Lett.* **41**, 14, 3269 (2016)
- [5] V. Laude, J.M. Escalante et A. Martinez, "Effect of loss on the dispersion relation of photonic and phononic crystals, *Phys. Rev. B*, **88**, 224302 (2013).
- [6] R.I. Woodward, É. Picholle et C. Montes, "Solitons et miroirs Brillouin en présence de dispersion acoustique dans un oscillateur à fibre optique microstructurée", *JNOG* 2015.
- [7] C. Montes et R. Pellat, "Inertial response to nonstationary stimulated Brillouin backscattering: Damage of optical and plasma fibers", *Phys. Rev. A* **36**, 2976-2979 (1987).

Nano-opto-mécanique au-delà de quelques GHz

Daniel Lanzillotti-Kimura

*Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Univ. Paris-Sud,
Université Paris-Saclay, C2N – Marcoussis, 91460 Marcoussis, France*

Resumé

Dans de nombreux domaines de recherche actuels, tels que la spintronique, l'optoélectronique, ou plus récemment en information quantique, les phonons acoustiques sont considérés comme des sources de décohérence indésirables. Des travaux récents dans le domaine de l'ingénierie des propriétés acoustiques de nanostructures, la nanophononique, ont montré qu'il est possible de contrôler et de manipuler les phonons acoustiques de très haute fréquence: ceci constituerait une avancée majeure dans le développement de nouvelles technologies en optique et en optoélectronique. En particulier, il est possible de réaliser des dispositifs qui confinent des phonons acoustiques dans la gamme GHz-THz : les nanocavités acoustiques.

L'optimisation simultanée des propriétés optiques et acoustiques a permis de développer des «cristaux PhoXoniques», permettant de confiner simultanément des photons et des phonons. De façon générale, une microcavité optique est constituée d'un spacer placé entre deux miroirs de Bragg (DBRs), et se comporte tel un résonateur Fabry Pérot. De la même façon, une microcavité acoustique est constituée d'un spacer et de deux DBRs acoustiques. Afin d'obtenir des structures capables de manipuler les phonons acoustiques, il est nécessaire de fabriquer des couches minces de quelques nanomètres d'épaisseur et possédant des interfaces plates à l'échelle atomique. Très récemment, nous avons démontré qu'une microcavité optique GaAs/AlAs constitue automatiquement une microcavité acoustique optimisée, impliquant des interactions lumière-matière exacerbées. Dans cette présentation nous explorons différentes stratégies de confinement et différentes techniques expérimentales en nano-optomécanique de très haute fréquence.

Bibliographie

- [1] A. Fainstein, N. D. Lanzillotti-Kimura, B. Jusserand, and B. Perrin, "*Strong Optical-Mechanical Coupling in a Vertical GaAs/AlAs Microcavity for Subterahertz Phonons and Near-Infrared Light*", *Physical Review Letters* **110**, 037403 (2013).
- [2] N. D. Lanzillotti-Kimura, A. Fainstein, B. Perrin, and B. Jusserand, "*Theory of coherent generation and detection of THz acoustic phonons using optical microcavities*", *Physical Review B* **84**, 064307 (2011).
- [3] F. Lamberti, Q. F. Yao, L. Lanco, A. Fainstein, P. Senellart, I. Favero, N. D. Lanzillotti-Kimura, "*Nanomechanics in micropillar resonators*", en redaction (2016).

Elastoplasmonic interaction in metal-insulator-metal localized surface plasmon systems

A. Mrabti¹, G. Lévêque¹, A. Akjouj¹, Y. Pennec¹, B. Djafari-Rouhani¹, R. Nicolas², T. Maurer³ and Pierre-Michel Adam³

¹ Institut d'Electronique, de Micro-électronique et de Nanotechnologie (IEMN, CNRS-8520), Cité Scientifique, Avenue Poincaré, 59652 Villeneuve d'Ascq, France

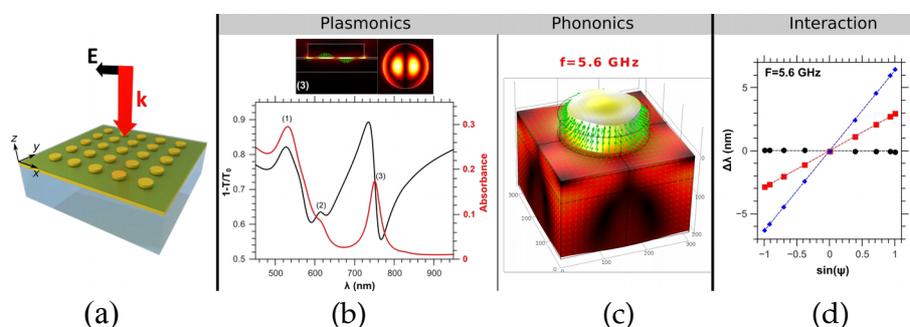
² LIDYL, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, 91191 Gif-Sur-Yvette, France

³Laboratory of Nanotechnology and Optical Instrumentation, UMR 6281 STMR, Technological University of Troyes, 12 Rue Marie Curie, CS 42060, 10004 Troyes Cedex, France

Résumé

We investigate theoretically and numerically the coupling between elastic and localized surface plasmon modes in a system of gold nanocylinders separated from a thin gold film by a dielectric spacer of few nanometers thickness[1,2]. That system supports plasmon modes confined in between the bottom of the nanocylinder and the top of the gold film, which arise from the formation of interference patterns by short-wavelength metal-insulator-metal propagating plasmons. Analytical and numerical simulations are performed and compared.

We present first the plasmonic properties of the system (see figure, (a)) through finite elements simulations, where different types of localized plasmon modes are identified, (b). We focus on particular modes confined in the spacer, which result from the formation of resonant patterns due to the excitation of propagative plasmons confined within the circular cavity located in between the particle and the gold film. A simple analytical model allows first to correctly reproduce the shape and wavelengths of the plasmon modes, and second to assess the modulation of the plasmon mode by simple deformations of the cavity.



In a second part, we present full finite elements simulations of the elastic properties of the system, and then compute the acousto-plasmonic coupling between the different plasmon modes and several acoustic modes of very different shape, (c). The efficiency of the coupling is evaluated first by computing the modulation of the resonance wavelength during and acoustic period, (d), which allows comparison with the analytical model, and finally in term of time-modulation of the transmission spectra on the full visible range, computed for realistic values of the deformation of the nanoparticle.

Bibliographie

- [1] R. Nicolas, G. Lévêque, J. Marae-Djouda, G. Montay, Y. Madi, J. Plain, Z. Herro, M. Kazan, P.-M. Adam, and T. Maurer, *Sci. Rep.* **5**, 14419 (2015).
- [2] A. Mrabti, G. Lévêque, A. Akjouj, Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani, R. Nicolas, T. Maurer, and P.-M. Adam, *Phys. Rev. B*, **94**(7), 2016.

RESOLVENT METHOD FOR CALCULATING DISPERSION SPECTRA OF THE SHEAR WAVES IN FREE PHONONIC PLATES

We propose a new method for calculating dispersion spectra of the shear horizontal waves in free phononic plates. Phononic crystals (PC) are periodic structures, where acoustic-wave spectra exhibit frequency band gaps allowing extraordinary acoustic effects. We deal with solid/solid PC plates made of periodically distributed solid inclusions in solid matrix. For simplicity, we consider two-dimensional PC (which are uniform along the third coordinate direction) and scalar waves, though the method can be extended to 3D PC and vector waves.

The dispersion equation for the free plate problem is stated in terms of our key tool called resolvent. In simple words, the resolvent is a matrix function which obtains a bounded norm matrix R from a matrix M with an exponentially large norm by inverting the latter after shifting it by a complex number not belonging to the spectrum of M (to avoid the singularities). In our case, the resolvent allows to circumvent the instabilities of the propagator through the unit cell of the plate. Moreover, the propagator M and therefore its resolvent R are obtained via truncated plane wave expansion (PWE) in the lateral coordinate and exact integration in the depth coordinate (while other methods, such as 2D PWE or finite elements method, involve truncation in both coordinates). Thus the advantages of our method are accuracy and efficiency due to a smaller size of the input matrix.

Implementation of the method is demonstrated via several examples. In particular, we show the existence of uncoupled symmetric and antisymmetric families of branches in the case of mirror-symmetric profile of periodicity. This allows us to demonstrate that the asymmetric periodic perturbation of this profile can create absolute bandgaps due to the split of the former intersections of the symmetric and antisymmetric dispersion branches.

Matériaux nanostructurés périodiques naturels : des superréseaux à grande échelle

S. Margueron^{1,2}

¹ *Laboratoire Matériaux Photonique et Systèmes, EA 4423, Université de Lorraine et Supelec, 2 rue Edouard Belin, 57070 Metz*

² *Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté, 15 B avenue des Montboucons, 25030 Besançon*

Résumé

Les superréseaux sont constitués par l'ingénierie d'hétérostructures périodiques. Ces architectures ont révolutionné le domaine de l'optoélectronique (cavités quantiques, lasers à cascade quantique, détecteurs à cascade quantique...). L'une des caractéristiques de ces matériaux est leur anisotropie, qui permet de contrôler les règles de sélections de transitions optiques, de transport électronique ou de transport thermique. La modulation périodique de ces structures conduit à la modulation des vecteurs d'onde de propagation des ondes et la formation de mini-bande de dispersion, réduite par rapport aux matériaux pris séparément. L'étude par spectroscopie Raman montre le repliement de la structure des bandes vibrationnelles, le confinement des modes, l'apparition d'oscillations collectives ou de modes de surface [1].

Dans cet exposé, je présenterai des matériaux naturellement nanostructurés de $\text{In}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_k$ [1] présentent des hétérostructures périodiques similaires aux hétérostructures artificielles. Une description simplifiée au grand vecteur d'onde permet de simplifier le calcul dans le domaine acoustique et prévoir le repliement des bandes, toutefois, nous verrons aussi que la structure de la bande de dispersion réelle et les effets quantiques se manifestent dans le spectre. Ces matériaux offrent de nouvelles potentialités pour la fabrication de composants à grande échelle pour la thermique, mais, ils sont aussi candidat pour d'autres applications tel que l'acoustique non linéaire.

Bibliographie

[1] "Light Scattering in Solids V, Superlattice and Other Microstructures" edited by Cardonna and G. Güntherodt, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1989).

[2] S.Margueron, J. Pokorny, S. Skiadopoulou, S. Kamba, David R Clarke, "Optical and vibrational properties of $(\text{ZnO})_k\text{In}_2\text{O}_3$ natural superlattice nanostructures", Journal of Applied Physics 119(19) (2016).

Modélisation de la diffusion Brillouin

J-C. Beugnot et V. Laude

*Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Université Bourgogne Franche-Comté,
15B avenue des Montboucons, 25030 Besançon*

Résumé

La diffusion Brillouin permet la génération de phonons par un processus d'électrostriction grâce à l'interaction entre deux ondes optiques. Nous étudions ce mécanisme d'électrostriction via une équation elastodynamique qui nous donne accès aux composantes du déplacement élastique pour tous les processus de diffusion Brillouin.

1. Introduction

La diffusion Brillouin est une interaction entre deux ondes optiques et une onde acoustique (ou deux photons avec un phonon acoustique). L'onde acoustique diffuse la lumière, en y portant l'empreinte de sa vitesse sous la forme d'un décalage de fréquence Doppler de l'onde diffusée. En raison de la loi de conservation de l'énergie, le photon diffusé est décalée en fréquence par la fréquence des phonons. Lorsque l'effet Brillouin est stimulé l'amplitude du paquet d'ondes acoustiques et de l'onde optique diffusée augmente de façon exponentielle, en tirant la puissance de la pompe incidente.

2. Modélisation

Bien que le mécanisme de diffusion inélastique de la lumière par des phonons soit bien compris, la génération réciproque des phonons par mélange de deux photons, ou électrostriction, est souvent considérée comme un problème complexe et un mécanisme peu efficace. En utilisant un terme de force optique avec une équation elastodynamique, il est possible de modéliser l'électrostriction. Nous avons résolu cette équation en utilisant les éléments finis pour s'adapter à n'importe quelle géométrie de guide d'onde. Avec ce modèle, nous obtenons la répartition exacte des déplacements élastiques dans le guide [1]. En ajoutant un terme d'amortissement relié aux pertes viscoélastiques du guide, on obtient un modèle fiable du gain électrostrictif. Il est également possible d'estimer les déplacements absolus pour une puissance optique d'entrée donné. Le résultat le plus frappant est l'observation du guidage du son par la force optique. En effet la distribution latérale de l'énergie élastique à la fréquence de résonance pour le cas de la rétrodiffusion est contenue dans la répartition de la force optique. Ainsi, même en l'absence de guidage acoustique, le son généré est guidé par la lumière [2].

3. Conclusion

La modélisation de l'électrostriction permet de calculer précisément le spectre de diffusion Brillouin dans n'importe quel guide d'onde et pour tous les processus (rétrodiffusée, vers l'avant et de surface). Ce modèle est en très bon accord avec les résultats expérimentaux et permet le design de fibres pour le contrôle de la diffusion Brillouin.

4. Bibliographie

- [1] V. Laude and J-C. Beugnot, AIP Advances, **3**, p. 042109, 2013.
- [2] J-C. Beugnot and V. Laude, Phys. Rev. B, **86**, p. 224304, 2012.

Diffusion Brillouin de surface dans une fibre optique microstructurée

J. C. Tchahame¹, J.-C. Beugnot¹, K. P. Huy¹, V. Laude¹, A. Kudlinski², T. Sylvestre¹

¹ Institut FEMTO-ST, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon

² Laboratoire PhLAM, CNRS, Université Lille 1, Villeneuve D'Asq

Résumé

Dans cet article, nous rapportons l'observation originale d'un nouveau mode de diffusion Brillouin de la lumière induite par des ondes acoustiques de surface dans une fibre optique microstructurée. Cette observation est confirmée par une simulation numérique de l'équation élasto-dynamique.

1. Introduction

Connue depuis les années 1970, la diffusion Brillouin de surface (DBS) est généralement utilisée comme une méthode de mesure sans contact des propriétés élastiques de couches minces, d'interfaces ou encore de matériaux opaques multi-couches. Contrairement à la diffusion Brillouin dite de volume, la DBS provient essentiellement de phonons présents à la surface des matériaux. Ces phonons créent une légère corrugation de surface, qui va diffracter la lumière incidente avec un décalage en fréquence lié à la vitesse acoustique de surface. La DBS vient récemment d'être observée dans les microfibres optiques [1]. Nous montrons dans cet article que la diffusion Brillouin de surface existe également dans les fibres optiques microstructurées (FOM).

2. Expériences

Nous avons utilisé une fibre optique à cristal photonique dont le diamètre du cœur est de 1,9 μm et une large fraction d'air de $d/\Lambda = 0,93$ (cf. Figure 1). À l'aide d'une détection hétérodyne nous avons mesuré le spectre Brillouin, faisant apparaître 3 résonances localisées autour de 6 GHz. En calculant les vitesses acoustiques correspondantes à partir de la relation d'accord de phase entre les vecteurs d'ondes optique et acoustique, ($K_{\text{op}} = 2K_{\text{ac}}$) pour une interaction contra-propagatrice, on peut aisément vérifier que ces raies proviennent effectivement d'ondes de surface. Les simulations opto-acoustiques confirment la présence de résonances élastiques à des fréquences de 6 GHz dont la distribution spatiale de l'énergie est localisée entre le cœur et la première rangée de trou.

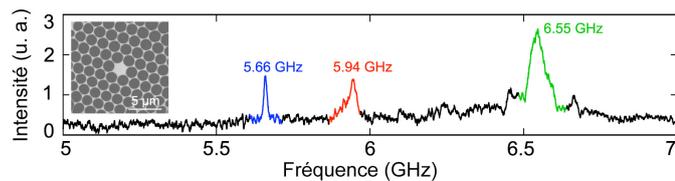


Figure 1: Spectre Brillouin de surface dans une fibre microstructurée

3. Conclusion

En explorant la rétrodiffusion Brillouin dans une fibre optique microstructurée à petit cœur et à haute fraction d'air, nous avons démontré l'existence d'ondes de Rayleigh localisées dans le cœur de la fibre à la périphérie des trous d'air. Sensibles à l'état de surface, ce nouveau mode de diffusion Brillouin pourrait être utilisé pour concevoir des capteurs optiques ou des fonctions optiques pour les télécommunications.

4. Bibliographie

- [1] J.-C. Beugnot *et al.* "Brillouin light scattering from surface acoustic waves in a subwavelength-diameter optical fibre," *Nature communications*, vol. 5, 2014.
- [2] J. C. Tchahame *et al.* "Surface Brillouin scattering in photonic crystal fibers," *Opt. Lett.*, vol. 41, pp. 3269-3272, 2016.

Impulsion canonique et photons Brillouin habillés

Éric Picholle

Université Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire de Physique de la Matière Condensée
(IN ϕ NI), UMR 733, France Parc Valrose, 06108 Nice cedex

Résumé

Si un équivalent quantique des relations classiques d'accord de phase peut s'écrire sous la forme d'une relation de conservation de l'impulsion, il s'agit de celle, moins intuitive, de photons habillés.

1. Introduction

On lit couramment que la fréquence des deux ondes produites lors de la diffusion Brillouin est déterminée par les relations quantiques de conservation de l'énergie ($\hbar\omega_p = \hbar\omega_B + \hbar\omega_i$) et de l'impulsion ($\hbar k_p = \hbar k_B + \hbar k_a$) des photons et phonons impliqués, la seconde étant présumée équivalente à une relation d'accord de phase classique. Mais est-ce si évident ? Comment définit-on, au niveau quantique, l'impulsion d'un photon dans un diélectrique ?

2. Une controverse ancienne

La question est presque aussi ancienne que la notion même de photon [1,2]. Elle n'a fait l'objet qu'assez récemment d'une synthèse raisonnablement consensuelle [3], rendue possible par la réalisation que la répartition du tenseur énergie-impulsion entre deux composantes, électromagnétique et matérielle est essentiellement arbitraire, dans la mesure où elle dérive d'un choix de jauge (aussi bien du point de vue classique que du point de vue quantique, le potentiel vecteur étant défini à un gradient près).

3. Photons habillés

En présence de dispersion de vitesse de groupe, on est donc amené à distinguer les photons "nus", dont l'impulsion peut prendre des valeurs très différentes selon le choix de jauge, des photons "habillés" par les perturbations matérielles qui l'accompagnent, et qui sont porteurs d'une impulsion canonique $k = n\omega/c$ [4]. C'est cette dernière, et non l'impulsion du photon nu, qu'il convient de prendre en compte dans l'établissement des relations de conservation de l'impulsion au niveau quantique. Ainsi, lors d'une émission spontanée par un atome dans un diélectrique, l'impulsion de recul emportée par l'atome est égale à l'impulsion canonique du photon *habillé* émis [5]. Je montrerai comment ces résultats s'appliquent à une approche particulière de la diffusion Brillouin.

4. Bibliographie

- [1] H. Minkowski, "Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern", *Nachr. Ges. Wiss. Goettingen, Math.-Phys.*, pp. 53-111 (1908).
- [2] M. Abraham, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Rend. Circ. Mat. Palermp*, **28**, pp. 1-28 (1909).
- [3] R.N.C. Pfeifer, T.A. Nieminen, N.R. Heckenberg & H. Rubinsztein-Dunlop, "Momentum of an electromagnetic wave in dielectric media", *Rev. Mod. Phys.*, **79**, pp. 1197-2016 (2007).
- [4] J.C. Garrison & R.Y. Chiao, "Canonical and kinetic forms of the electromagnetic momentum in a *ad hoc* quantization for a dispersive dielectric", *Phys. Rev. A* **70**, 053826 (2004).
- [5] P.W. Milonni & R.W. Boyd, "Recoil and photon momentum in a dielectric", *Laser Physics*, **15**, 10, 2005, pp. 1432-1438.

DE LA DETECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES A L'OPTOMECHANIQUE QUANTIQUE

P.-F. Cohadon^{1,2},

¹ *Laboratoire Kastler Brossel, CNRS UMR 8552, UPMC-ENS -Collège de France,
UPMC Case 74, 4 place Jussieu, 75005 Paris*

² *GDR 'Optomécanique et Nanomécanique Quantiques' Meca Q, CNRS GDR 3731*

Résumé

La détection des ondes gravitationnelles a nécessité d'immenses progrès pour être limitée par les fluctuations quantiques de la lumière, donnant naissance à l'optomécanique quantique.

Détecter les ondes gravitationnelles [1] a nécessité quatre décennies d'effort pour atteindre une sensibilité de l'ordre de $h \sim 10^{-21}$, correspondant à des déplacements des miroirs inférieurs à 10^{-18} m. Indépendamment des bruits classiques (bruit sismique, bruit thermique...) dont il a fallu s'affranchir, on a réalisé dès le début des années 80 que les fluctuations quantiques de la lumière étaient à l'origine de deux bruits : un bruit de mesure, lié aux fluctuations de phase et un bruit d'action en retour, lié aux fluctuations d'intensité et de pression de radiation : la sensibilité est alors limitée par la Limite Quantique Standard (LQS), qui sera atteinte par les interféromètres de seconde génération quand ils seront à leur sensibilité nominale.

Plusieurs pistes sont envisagées pour aller au-delà de cette LQS : utilisation d'états comprimés de la lumière, modification de la réponse mécanique des miroirs par la pression de radiation... J'en présenterai les premières mises en évidence expérimentales, sur des interféromètres suspendus [2] ou sur des expériences à plus petite échelle.

J'expliquerai aussi comment les progrès récents en microfabrication ont permis l'émergence d'un nouveau domaine, l'**optomécanique quantique**, qui consiste à coupler des micro- ou nano-résonateurs mécaniques à des champs lumineux, l'accent pouvant être mis sur l'état quantique du résonateur [3] ou sur celui des champs. Ce domaine offre de nombreuses promesses pour l'étude des fondements de la mécanique quantique (états quantiques et décohérence d'objets macroscopiques...) ou pour le traitement quantique de l'information [4]. Je présenterai quelques exemples des expériences réalisées récemment.

Je terminerai en présentant le GDR 'Optomécanique et Nanomécanique Quantiques', qui vient de démarrer et cherche à rapprocher les différentes équipes françaises du domaine.

Bibliographie

[1] The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, p. 061102, 2016.

[2] The LIGO Scientific Collaboration, "Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light", *Nat. Phot.*, vol. 7, pp. 613–619, 2013.

[3] J. D. Teufel *et al.*, "Sideband cooling of micromechanical motion to the quantum ground state", *Nature*, vol. 475, pp. 359–63, 2011.

[4] R. W. Andrews *et al.*, "Bidirectional and efficient conversion between microwave and optical light", *Nat. Phys.*, vol. 10, pp. 321–326, 2014.

Development of a differential optical interferometer for measuring transient surface acoustic waves

Anurupa Shaw, Damien Teyssieux, and Vincent Laude

Université Bourgogne Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174

Optical interferometry is a well-known technique for studying wave propagation and is often preferred over other methods for its high precision in studying wave profiles, amplitude and phase variations, standing wave patterns, group delay measurements, etc., of waves like surface acoustic waves, Scholte- Stoneley waves, dilatational waves, etc... The differential interferometer developed and used in this work, unlike any other shearing interferometers described in literature, is an extended version of a Michelson's interferometer implementing time-shearing. This combines the advantages of homodyne interferometry and various shearing techniques, and is especially designed to measure short SAW pulse in the time-domain.

The differential interferometer used in this work employs a laser beam that is reflected from the SAW device, carrying phase and amplitude information of the surface acoustic waves, is divided into two orthogonally polarized beams that traverse different arm lengths, and are recombined using a polarizing beam splitter. This causes shearing in the time domain, with the change in phase along the two arms of the interferometer being a function of the path lengths of the two orthogonal beams causing interference. The signal received on the photodiode as a function of time is proportional to the normal velocity at the surface of the sample.

The setup being extremely sensitive, requires noise calibration. In order to improve the alignment and test the accuracy of the response, different parameters of the experimental setup are varied. An input chirp is used to excite SAW pulses within a frequency range of 200 – 400 MHz. The Fourier transform limited pulse duration is about 5 ns. The output of the SAW device is measured at the output IDT using a differential interferometer and is compared with electrical measurements. The position of the focus of the laser beam is varied, both vertically and horizontally, between the input and output IDTs on the SAW device.

REFERENCES

- [1] Tyson M. Turner and Richard O. Claus, "Dual differential interferometer for measurements of broadband surface acoustic waves", IEEE Ultrasonics Symposium, pp 384-387 (1981).
- [2] H. -N. Lin, Ft. J. Stoner, H. J. Maris, and J. Taut, "Phonon attenuation and velocity measurements in transparent materials by picosecond acoustic interferometry", Journal of Applied Physics 69, 3816 (1991).
- [3] X. Jia, Ch. Mattei, and G. Quentin, "Analysis of optical interferometric measurements of guided acoustic waves in transparent solid media", Journal of Applied Physics 77, 5528 (1995).
- [4] K. J. Manke, A. A. Maznev, C. Klieber, V. Shalagatskyi, V. V. Temnov, D. Makarov, S.-H. Baek, C.-B. Eom, and K. A. Nelson "Measurement of shorter-than-skin-depth acoustic pulses in a metal film via transient reflectivity", Applied Physics Letters 103, 173104 (2013).
- [5] Chien-Ming Wu and Richard D. Deslattes, "Analytical modeling of the periodic nonlinearity in heterodyne interferometry", Applied Optics Vol. 37, Issue 28, pp. 6696-6700, (1998).
- [6] J. V. Knuuttila, P. T. Tikka, and M. M. Salomaa, "Scanning Michelson interferometer for imaging surface acoustic fields", Optics Letters, Vol. 25, No. 9, pp. 613-615, May 2000.
- [7] Meindert A. van Dijk, Markus Lippitz, and Michel Orrit, "Detection of Acoustic Oscillations of Single Gold Nanospheres by Time-Resolved Interferometry", Physical Review Letters, PRL 95, 267406 (2005).
- [8] R.O. Claus and C. R. Johnson Jr., "Point density and defect characterization via measurements of Ultrasonic Bulk Waves", Proceedings of the First International Symposium on Ultrasonic Materials Characterization, National Bureau of Standards Special Publication 596, pp 643-649, (1980).
- [9] M. G. Cain, M. Stewart and M. Downs, "Characterisation of thin film piezoelectric materials by differential interferometric techniques", NSTI-Nanotech 2006, Vol. 2, (2006).
- [10] M Çelik, E Şahin, T Yandayan, R Hamid, A Akgöz, B Özgür, M Çetintaş and A Demir, "Application of the differential Fabry-Perot interferometer in angle metrology", Measurement Science and Technology, Volume 27, (2016).
- [11] C. H Palmer and R. E Green Jr., "Optical probing of acoustic emission waves", J. J. Burke et al. (eds.), Non-destructive Evaluation of Materials, Plenum Press, New York, pp 347-378, (1979).
- [12] J. -P. Monchalain, "Optical detection of ultrasound", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control **UFFC-33**(5):485-489 (1986).
- [13] J. C. Baboux, Interferometric Measurements of Transient Ultrasonic Fields: Application to Hydrophone Calibration, Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, IEEE Press, Chicago, Illinois, October 2-5, 1988, pp. 857-861.
- [14] J. -P. Monchalain, R. Héon, and N. Muzak, Evaluation of ultrasonic inspection procedures by field mapping with an optical probe. Can. Metallurgical Quart. 25:247-252 (1986).

Folded and guided wave propagation in layered PMMA-BaTiO₃ structure: Brillouin light scattering study

Abdellatif Gueddida^{1,2}, Elena Alonso-Redondo³, Ossama El Abouti², Hannah Huesmann³, El-Houssaine El Boudouti², Bahram Djafari-Rouhani¹, George Fytas^{3,4}.

¹IEMN, UMR-CNRS 8520, UFR de Physique, Université de Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

²LPMR, Département de Physique, Université Mohamed I, Oujda, Marocco

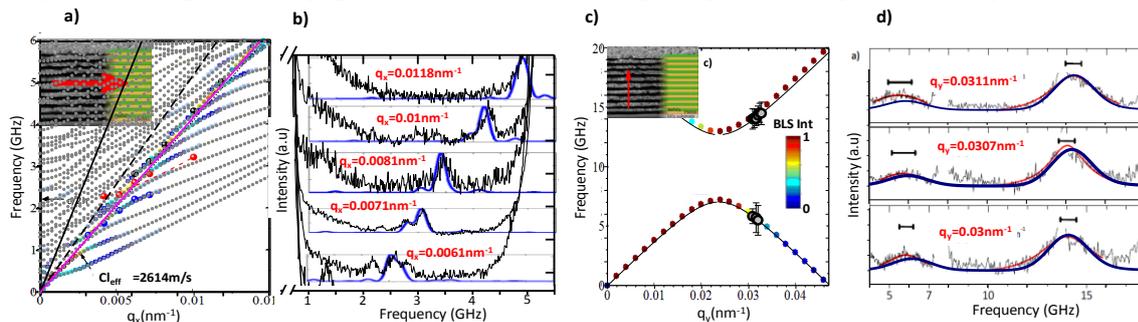
³Max Planck Institute for Polymer Research, Ackermannweg 10, Mainz, Germany

⁴Department of Materials Science, University of Crete and IESL/FORTH, 71110 Heraklion, Greece

There is a recent interest in the study of hybrid organic-inorganic phononic crystals¹. Here, we study elastic wave propagation in a superlattice (SL) made of PMMA-BaTiO₃ by means of Brillouin light scattering (BLS) technique, where the ferroelectric titanate may give rise to high values of the photoelastic parameter. The BLS spectra are reproduced with a theoretical model based on finite element method and taking into account the interaction of the incident light with acoustic phonons in the SL. The elastic parameters of PMMA, BaTiO₃ and SiO₂ are given as follows: $C_{l(\text{PMMA})}=2800\text{m/s}$, $C_{t(\text{PMMA})}=1400\text{m/s}$ and $\rho_{(\text{PMMA})}=1190\text{kg/m}^3$ for PMMA, $C_{l(\text{BaTiO}_3)}=2570\text{m/s}$, $C_{t(\text{BaTiO}_3)}=1350\text{m/s}$ and $\rho_{(\text{BaTiO}_3)}=3300\text{kg/m}^3$ for BaTiO₃, and $C_{l(\text{SiO}_2)}=5660\text{m/s}$, $C_{t(\text{SiO}_2)}=3250\text{m/s}$ and $\rho_{(\text{SiO}_2)}=2200\text{kg/m}^3$ for SiO₂. Two directions of propagation are considered:

i) In-plane propagation: Figure a) gives the dispersion curves (frequency (GHz) vs. the wave-vector $q_x(\text{nm}^{-1})$ along a periodic structure made of 10 PMMA-BaTiO₃ bilayers deposited on a SiO₂ substrate (see the inserts in Figs. a) and c)). The black solid and dashed lines in Fig. a) give the longitudinal and transverse velocities of sound in the substrate respectively. The modes lying below these lines represent guided modes with a main longitudinal component propagating along the SL. The pink line corresponds to the effective longitudinal velocity of sound of the SL towards which a set of dispersion curves converge. The color solid circles represent the experimental data obtained from the experimental BLS spectra (Fig.b)). The blue curves in Fig.b) represent the theoretical spectra. The color dots in Fig. a) give only the guided modes which contribute to the BLS spectra. A very good agreement is found between theoretical and experimental results.

ii) Out of plane propagation: Figure c) gives the dispersion curves obtained for a propagation perpendicular to the layers (y direction) inside the first two Brillouin zones (BZ). The color scale gives the BLS intensity. The black circles give the experimental data obtained from the BLS spectra in Fig. d). These modes fall inside the second BZ. Figure d) gives the theoretical (blue curves) and experimental (red and black curves) BLS spectra for some q_y values. The two folded modes are well fitted by the numerical model. Finally, let us mention that this SL may exhibit a photonic gap in the visible domain giving rise to a phoxonic crystal¹.



Largeur de gain Brillouin dans les fibres optiques microstructurées

Éric Picholle et Carlos Montes,

Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (IN ϕ NI), CNRS UMR 7336,
Université de Nice Sophia Antipolis, Parc Valrose, 06108 Nice cedex

Résumé

La prise en compte de la dispersion de vitesse de groupe acoustique permet d'envisager des amplificateurs Brillouin à bande large dans les fibres optiques microstructurées

1. Introduction

Les amplificateurs Brillouin à fibre optique sont des composants relativement peu onéreux et simples d'emploi, mais dont l'utilité est sévèrement limitée par la faible largeur de leur courbe de gain (typiquement 100 MHz dans les fibres standard). Parfois confondue avec la largeur de la raie de diffusion Brillouin spontanée, la largeur de bande d'un amplificateur Brillouin résulte toutefois de la compensation non linéaire du désaccord de phase induit, dans une configuration pompe-sonde, lors de la diffusion Brillouin stimulée (DBS) hors résonance [1], bien décrite par le modèle cohérent à trois ondes de la DBS [2].

2. Influence de la dispersion acoustique

Différents mécanismes peuvent contribuer à l'élargir, comme la saturation du gain aux fortes intensités de pompe [1]. Nous considérons ici l'influence d'un paramètre généralement négligeable dans les fibres, mais qui peut devenir significatif dans les fibres microstructurées, la dispersion de vitesse de groupe acoustique ($k'_a = \partial k_a / \partial \omega$) [3]. La structure modale acoustique, très complexe dans les fibres microstructurées [4], implique en effet, pour certains modes, des fréquences de coupure au voisinage desquelles la dispersion acoustique devient considérable. Pour une longueur d'onde donnée, on peut alors obtenir une compensation entre les écarts à la résonance respectivement induits par les conditions de résonance DBS ($k'_B = \partial k_B / \partial \omega$) : $\delta k = (k'_a + k'_B) \delta \omega$. On peut alors écrire la largeur du gain de l'amplificateur sous la forme $\Delta \omega_B = 2\gamma_a / (1+x)$, où γ_a représente l'amortissement acoustique et x un paramètre intégrant la vitesse de groupe du mode acoustique considéré, sa dispersion ainsi que la dispersion optique [5]. Aux fortes dispersions acoustiques, $x \rightarrow \pm \infty$ et $\Delta \omega_B \rightarrow 0$: les conditions de résonances sont plus contraignantes que dans les fibres standard, et le gain encore plus étroit. En revanche, pour une longueur d'onde particulière, on prédit un élargissement significatif de la courbe de gain, voire un gain plat pour $x = -1$.

4. Bibliographie

- [1] J. Botineau, CL. Leycuras, C. Montes et É. Picholle, "A Coherent approach to stationary stimulated Brillouin fiber amplifiers", *Ann. Télécomm.* (1994) 49 :479.
- [2] J. Botineau, C. Leycuras, C. Montes et É. Picholle, "Stabilization of a stimulated Brillouin fiber ring laser by strong pump modulation", *J. Opt. Soc. Am. B* 6, 300-312 (1989).
- [3] R.I. Woodward, É. Picholle et C. Montes, "Solitons et miroirs Brillouin en présence de dispersion acoustique dans un oscillateur à fibre microstructurée", *JNOG 2015*, Rennes.
- [4] V. Laude, J.M. Escalante et A. Martinez, "Effect of loss on the dispersion relation of photonic and phononic crystals", *Phys. Rev. B*, 88, 224302 (2013).
- [5] A. Pokrownichki, "Effet de lumière lente Brillouin dans les milieux hétérogènes", mémoire de master "Sciences de la fusion" (dir. É. Picholle), Nice, 2009.

Résonateurs phononiques couplés par la surface

S. Benchabane, R. Salut, O. Gaiffe, V. Petrini, A. Khelif et V. Laude
*Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté,
15B avenue des Montboucons, 25030 Besançon Cedex*

Résumé

Cette contribution porte sur une étude expérimentale du couplage et du confinement dans un résonateur mécanique à l'échelle micrométrique de l'énergie acoustique se propageant à la surface d'un solide. L'objectif est de parvenir à des fonctions de piégeage et de guidage des ondes élastiques de surface à des fins de traitement acoustique du signal.

1. Introduction

La notion de résonateur mécanique a connu un renouveau spectaculaire au cours des dix dernières années. Les domaines d'applications s'étendent du capteur de masse au refroidissement par voie optique d'un objet mésoscopique au niveau quantique fondamental. Cette notion a par ailleurs su se frayer un chemin vers celles de cristaux phononiques ou de métamatériaux acoustiques. Il a en effet été démontré que des cristaux phononiques fondés ou non sur l'utilisation de résonateurs mécaniques pouvaient permettre de confiner très fortement les ondes élastiques, notamment les ondes élastiques de surface. Nous nous proposons ici de concilier ces deux domaines en nous attachant à l'étude de résonateurs isolés capables de confiner, contrôler et transporter l'énergie acoustique.

2. Contribution et résultats

Des transducteurs à peignes interdigités annulaires large bande ont été fabriqués sur un substrat de niobate de lithium, orientation cristallographique Y. Une matrice de résonateurs de différentes dimensions (diamètres et hauteurs compris entre 3 et 5 μm , rapports d'aspects entre 0,7 et 1,2) a été déposée au centre du transducteur par croissance assistée par faisceau d'ions. Le résonateur mécanique est ainsi constitué d'un composé de carbone, platine et gallium (pourcentages atomiques de l'ordre de 55 %, 30 % et 15 % respectivement).

Le dispositif a été caractérisé au moyen d'une sonde interférométrique hétérodyne. Les cartographies de champs de déplacement obtenues montrent que les sept résonateurs fabriqués répondent dans la bande d'émission de la source à ondes de surface (fréquences de résonance comprises entre 55 et 95 MHz). Les deux lobes caractéristiques de la composante hors plan du premier mode de flexion sont bien visibles. L'énergie élastique est par ailleurs très fortement localisée dans le résonateur en dépit du caractère très sub-longueur d'onde de ce dernier au regard de l'onde incidente.

3. Conclusion

Nous avons ici démontré la possibilité de coupler et stocker efficacement l'énergie élastique se propageant sur la surface d'un substrat dans un résonateur mécanique. Des amplitudes de vibrations hors plan de l'ordre de 8 à 10 nm, contre 1 à 2 nm à la surface du substrat, ont pu être mesurées, attestant de l'efficacité du couplage de l'énergie élastique par la surface. Ces résultats ont été obtenus au moyen de résonateurs présentant des coefficients de qualité assez faibles, ce qui laisse encore des perspectives d'amélioration. Une augmentation du facteur de qualité pourra être obtenue à la fois en jouant sur la géométrie des résonateurs ou en optant pour un matériau moins dissipatif. Le dispositif proposé permet néanmoins de démontrer la possibilité d'utiliser ces résonateurs comme briques de base de composants du traitement acoustique du signal.

Integrated actuation of optomechanical crystal in GHz range

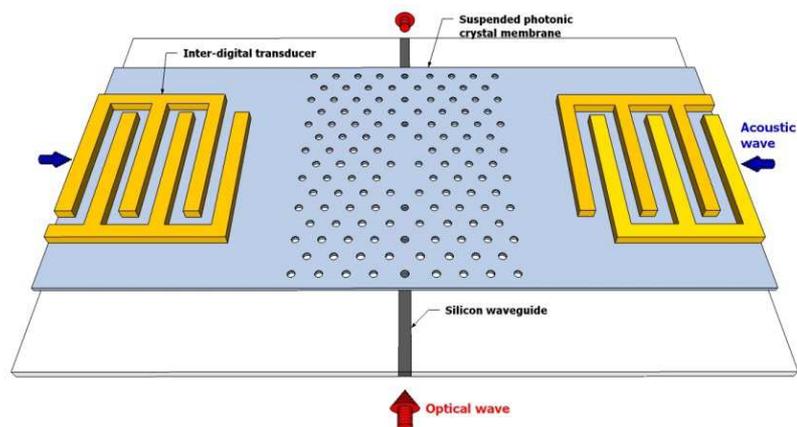
R. Zhu¹, A. Chowdhury¹, S. Benchabane², F. Raineri¹, S. Rennensson³, F. Semond³,
I. Robert-Philip¹, V. Laude², R. Braive¹

¹ Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, C2N-CNRS, Route de Nozay, 91460, Marcoussis, France

² Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté, 15 B avenue des Montboucons, 25030 Besançon

³ Centre de Recherche sur l'Hétéro-Epitaxie et ses Applications, CRHEA-CNRS, Rue Bernard Grégory, 06560, Valbonne, France

Optomechanics deals with the interactions between light and a mechanical oscillator. It uses this coupling (via optical forces) to read or control the mechanical behavior of this resonator. New prospective technologies are based on disruptive concepts exploiting photon-photon interaction for a broad range of applications (quantum technologies, microwave photonics...) These applications would strongly benefit of the scalability and integrability of nanoptomechanical resonators, opening the way to optomechanical circuits interfacing various functionalities. The building block here is an optomechanical platform integrating simultaneously actuation and detection tools on single planar setting. The platform will consist in suspended photonic crystal slabs, sustaining mechanical modes in the GHz frequency range and optical modes around 1.5 μm ; such resonator will be coupled to integrated silicon waveguides insuring optical detection and interfaced with integrated surface acoustic wave transducers allowing for on-chip acoustic actuation. The feasibility of such acoustic transduction mainly relies on the use of piezo-electric materials such as GaN, AlN or GaAs.



The challenge here lies on the combination of two technologies: integration of SAW transducers and AlN/GaN or GaAs suspended photonic crystal membranes with high optical confinement. Challenges for the fabrication of such devices will be discussed with preliminary realizations. These first generation of structures allows us to perform electrical measurements of SAW transducers which go along FEM simulation.

Plateforme hétérodyne pompe-sonde femtoseconde pour la visualisation d'ondes acoustiques

E. Coffy¹, G. Dodane¹, S. Euphrasie¹, A. Mosset¹, N Martin¹ et P. Vairac¹

¹ Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté,
15 B avenue des Montboucons, 25030 Besançon

Résumé

Ce papier présente les possibilités offertes par une plateforme hétérodyne pompe-sonde femtoseconde [1] pour la visualisation d'ondes acoustiques. Dotée d'une résolution spatiale inférieure au micromètre, et d'une résolution temporelle de l'ordre de la picoseconde, cette plateforme permet notamment la caractérisation de phénomènes acoustiques sur des échantillons micro-structurés, tels que la mesure de dispersion des ondes de volume ou bien de Rayleigh. Développée en collaboration avec le Laboratoire Ondes et Matières d'Aquitaine (LOMA), la plateforme peut aussi être utilisée pour appréhender la propagation de la chaleur via des mesures de conductivité thermique locale.

1. Fonctionnement de la plateforme pompe sonde

La plateforme se compose de deux cavités lasers Ytterbium impulsions synchronisés électroniquement en fréquence avec une différence de battement de 700Hz. L'impulsion du premier laser (pompe) apporte brièvement (quelques centaines de fs) une intense énergie (quelques nJ/μm²) sur l'échantillon. Avec un retard incrémental (effet stroboscopique), l'impulsion du deuxième laser (sonde) mesure la variation de réflectivité à la surface de l'échantillon, liée à la variation de température et de contraintes dues à l'impulsion pompe. Cette technique conduit à une acquisition très rapide, ce qui permet de réaliser un grand nombre de moyennes et donc d'obtenir un bon rapport signal sur bruit.

2. Caractérisations acoustiques

En faisant varier la position d'un laser par rapport à l'autre, il est possible de détecter les ondes acoustiques générées par l'absorption du faisceau pompe, et donc de réaliser une cartographie de la propagation des ondes à la surface d'un échantillon. La figure 1 présente un exemple de visualisation des ondes de Rayleigh à la surface d'un échantillon composé d'un film mince de tungstène déposé sur un substrat de silicium.

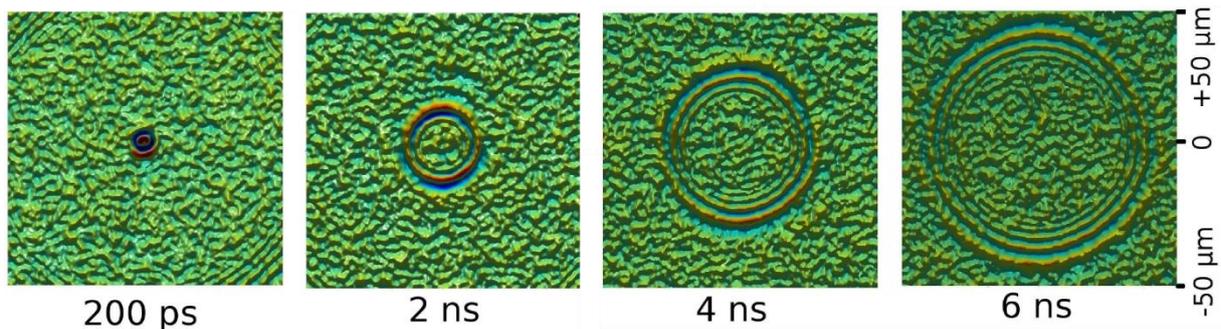


Figure 1 Propagation d'ondes de surface sur un film mince de tungstène déposé sur un substrat de silicium à différents temps

3. Conclusion

La plateforme hétérodyne pompe sonde permet de réaliser des caractérisations acoustiques, mais aussi thermiques, d'échantillons micro-structurés sur l'ensemble de la plage entre deux impulsions pompe (20,8 ns) avec une haute résolution temporelle (quelques ps) et spatiale (inférieur au μm).

4. Bibliographie

[1] S.Dilhaire, W.Claeys, J.M.Rampnoux and C.Rossignol, *Patent, Optical heterodyne sampling device*. (2009). EP1949055B1

Propriétés vibrationnelles d'un cristal phononique de surface nanostructuré

Abdellatif Gueddida^{1,2}, Elena Alonso-Redondo³, Yan Pennec¹, El Houssaine El Boudouti^{1,2}, Shu Yang⁴, George Fytas^{3,5}, Bahram Djafari Rouhani¹

¹ Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies, UMR-CNRS 8520, UFR de Physique, Université de Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

² Laboratoire de Physique de la Matière et de Rayonnements, Université Mohamed I, Oujda, Morocco

³ Max Planck Institute for Polymer Research, Ackermannweg 10, Mainz, Germany

⁴ Department of Materials Science and Engineering, 3231 Walnut Street, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104-6272, USA

⁵ Department of Materials Science, University of Crete and IESL/FORTH, 71110 Heraklion, Greece

Contrairement aux matériaux uniformes où seules les ondes de Rayleigh se propagent à la surface, de nouveaux modes de vibration de surface localisés peuvent être observés lorsqu'un réseau périodique est déposé à la surface d'un substrat. La présence de poutres périodiques 1D déposées sur un substrat uniforme est courante dans la génération d'ondes acoustiques de surface par des transducteurs inter-digités (IDT). La compréhension des propriétés élastiques de ces dispositifs reste à étudier et les comportements issus de l'arrangement périodique de la surface pourraient développer une nouvelle génération de dispositifs à ondes acoustiques de surface.

Ce travail propose tout d'abord une étude théorique de la propagation des ondes de surface dans un cristal phononique constitué de poutres d'époxy déposées sur un substrat de verre (voir figure 1(a),(b)). Avec l'aide de la méthode des éléments finis, nous analysons les modes de vibration des nano-poutres greffées. Nous montrons, aux faibles vitesses de phase, que les champs élastiques sont localisés sur les bords des nano-poutres, à savoir dans les coins supérieurs et sur les faces latérales (figure 1(c, d)). Après avoir étudié de manière exhaustive les propriétés élastiques du cristal, nous montrons les effets de l'infiltration du cristal par un polymère liquide de type PDMS.

Dans un deuxième temps, les courbes de dispersion théoriques ont été comparées avec des spectres expérimentaux de diffusion Brillouin (BLS) aux fréquences du GHz. Pour filtrer et comparer avec l'expérience les modes de vibration qui contribuent fortement à l'intensité BLS, nous appliquons une méthode de sélection des modes théoriques basée à la fois sur la polarisation (band sorting) et le couplage photoélastique entre la lumière incidente et les modes élastiques (effet Pockels).

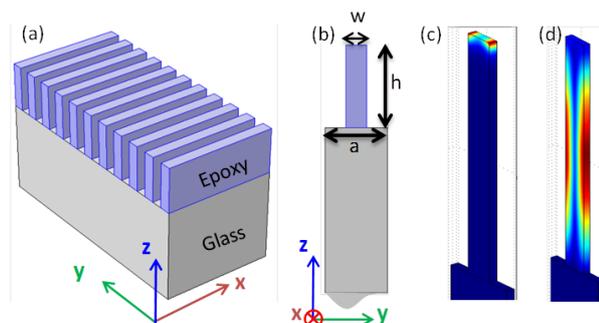


Figure 1 : (a) Cristal phononique formé de poutres d'époxy sur un substrat de verre. (b) cellule élémentaire utilisée pour le calcul par éléments finis. Localisation du champ élastique aux extrémités (c) et sur les faces latérales (d) des nano-poutres pour les faibles vitesses de phase.

Couplage optomécanique dynamique entre guides W_1

S. Dupont¹, J. Gazalet¹ et J.C. Kastelik¹,

¹ IEMN, CNRS UMR 6174, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Le Mont Houy, 59313 Valenciennes cedex 9

Résumé

La transmission optique entre des guides W_1 couplés par une cavité L_1 est analysée théoriquement. L'étude de la transmission révèle le comportement filtrant de la structure, les fréquences transmises correspondant aux modes de la cavité. Cette propriété peut être exploitée dynamiquement : en présence de phonons, l'effet du couplage optomécanique se traduit par une modulation de la transmission. L'évolution de la transmission révèle un comportement du premier ordre qui traduit la déformation des modes propres optiques de la cavité, par comparaison aux résultats du cas idéal de la cavité isolée.

1. Introduction

La recherche de dispositifs photoniques intégrés pour le contrôle de la propagation de la lumière a mené à de nombreux développements. Parmi ces dispositifs, les cristaux photoniques 2D sont prisés pour leur compatibilité avec l'optique intégrée et la grande diversité de dispositifs imaginables, passifs ou actifs^{1,2}. Nous présentons l'analyse d'un filtre optique actif par couplage optomécanique.

2. Etude du couplage dynamique

Nous étudions le couplage photons - phonons dans une structure phoXonique³ de silicium constituée de deux guides d'ondes W_1 couplés par une cavité L_1 . Deux mécanismes de couplage sont considérés dans notre modèle : l'effet de l'interface mobile et l'effet photoélastique⁴. Nous avons adopté une approche numérique utilisant la méthode des éléments finis. La transmission optique à travers la structure est impossible aux fréquences correspondant à la bande interdite (-40 dB), à l'exception des fréquences correspondant aux modes propres de la cavité L_1 . En présence de phonons, le coefficient de transmission optique est modulé à la fréquence acoustique, comportement du premier ordre. L'étude du cas idéal de la cavité isolée⁴, avait mis en évidence un comportement du second ordre. L'analyse fine de la distribution du champ dans la cavité révèle une déformation des profils de modes brisant ainsi leur symétrie et l'évolution du second ordre, en accord avec les enseignements de la théorie des perturbations.

3. Conclusion

Dans ce papier, nous avons montré qu'une structure de cristal photonique planaire comprenant deux guides couplés par une cavité L_1 , offre la possibilité de contrôler dynamiquement le couplage inter-guide par une onde acoustique.

4. Bibliographie

- [1] Notomi, Masaya. "Manipulating light with strongly modulated photonic crystals.", Reports on Progress in Physics **73**, 096501 (2010).
- [2] Vlasov, Yurii A., et al. "Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides.", Nature **438**, 65-69 (2005).
- [3] Sadat-Saleh, S., et al. "Tailoring simultaneous photonic and phononic band gaps.", Journal of Applied Physics **106**, 074912 (2009).
- [4] Rolland, Q., et al. "Acousto-optic couplings in two-dimensional phoxonic crystal cavities.", Applied Physics Letters **101**, 061109 (2012).