



HAL
open science

Miroir Brillouin inversé en présence d'une forte dispersion et d'un faible amortissement acoustiques dans une cavité optomécanique

Carlos Montes, Éric Picholle

► To cite this version:

Carlos Montes, Éric Picholle. Miroir Brillouin inversé en présence d'une forte dispersion et d'un faible amortissement acoustiques dans une cavité optomécanique. Journées Nationales d'Optique Guidée JNOG 2022, Jul 2022, Nice, France. , 2022. hal-03726473

HAL Id: hal-03726473

<https://hal.science/hal-03726473>

Submitted on 18 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Miroir Brillouin inversé en présence d'une forte dispersion et d'un faible amortissement acoustiques dans une cavité optomécanique

Carlos Montes et Éric Picholle
eric.picholle@inphyni.cnrs.fr

1. INPHYNI, Institut de Physique de Nice, UMR CNRS 7010, CNRS & Université Côte d'Azur

Les guides d'ondes silicium nanostructurés permettent aujourd'hui un contrôle extrêmement fin des relations de dispersion acoustique aussi bien qu'optique. En configuration suspendue, de telles cavités optomécaniques présentent en outre l'avantage de très faibles pertes acoustiques. Nous explorons théoriquement et numériquement la dynamique d'établissement de la diffusion Brillouin stimulée dans de tels composants, et en particulier le rôle de l'amortissement acoustique et montrons qu'ils permettent d'envisager l'observation expérimentale d'un nouveau régime non linéaire de miroir Brillouin à profil acoustique inversé.

Modèle inertiel cohérent de la DBS

En présence d'une forte dispersion acoustique, si l'évolution des amplitudes complexes des enveloppes des ondes pompe et Brillouin, E_p & E_B reste bien décrites par le système habituel [1,2] :

$$\begin{aligned} (\partial_t + c/n\partial_x + \gamma_e)E_p &= -K_{SBS}E_B E_a, \\ (\partial_t - c/n\partial_x + \gamma_e)E_B &= K_{SBS}E_p E_a^*, \end{aligned}$$

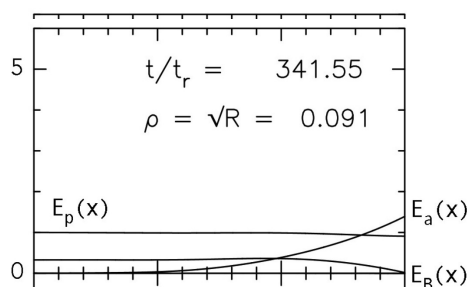
il convient de prendre en compte des termes d'ordre supérieur dans la description de celle de l'enveloppe acoustique, E_a , pour aboutir au modèle inertiel de la DBS en présence de dispersion acoustique forte [3,4]:

$$[(1 + 2i\alpha)\partial_t + c_a\partial_x + i\alpha(\partial_{tt} - \varepsilon^2\partial_{xx} + \gamma_a)]E_a = K_{SBS}E_p E_B^*$$

avec : $\alpha = c_a \frac{d^2 k_a}{d\omega_a^2}(\omega_a) K_{SBS} \sqrt{I_p} / 2\omega_a$ et $\varepsilon = c_a/c \sim 10^{-5}$

Miroir Brillouin à profil acoustique inversé

Dans un résonateur Brillouin en anneau, le régime dominant est alors un nouveau régime de miroir Brillouin inversé, dans lequel l'intensité acoustique est minimale à l'extrémité d'injection de la pompe laser.

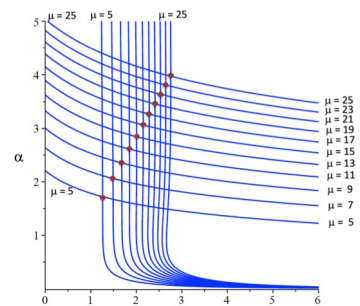


Relation de dispersion complexe dans la limite inertielle

En linéarisant ce système pour une instabilité acoustique avec un taux de croissance γ , on obtient une relation de dispersion complexe à 5 paramètres, qu'on peut ramener à une expression polynomiale comprenant 114 termes [4]. Il est alors possible de déterminer par un calcul formel les gammes de paramètres maximisant γ .

Un résultat inattendu est que ce taux de croissance est positif pour toute valeur > 0 de la dispersion acoustique α .

Évolution de la dispersion acoustique ($a(k)$) en fonction de l'amortissement (μ_a). Les points rouges marquent les croisements évités, seule la partie inférieure des courbes est pertinente. (résolution formelle)

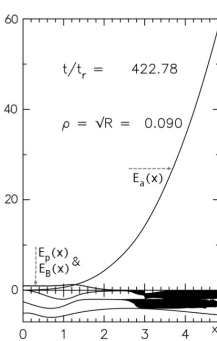


Comme dans le cas de la DBS dans les plasmas chauds, on se trouve alors en présence d'une *instabilité absolue* (c'est-à-dire d'une croissance de l'intensité acoustique en un point donné, par opposition à l'*instabilité convective* de la DBS habituelle dans les fibres, où elle ne s'observe dans le référentiel de l'onde Brillouin).

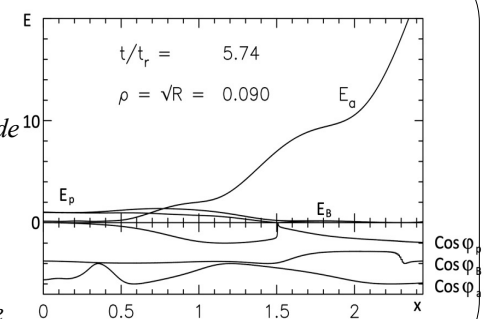
Un corollaire est qu'il n'est pratiquement possible d'étudier numériquement, dans ce régime, que des régimes transitoires, éventuellement très longs mais asymptotiquement noyés dans la croissance de l'onde acoustique, qui ne semble limitée que par l'apport d'énergie lumineuse (et donc pour des valeurs de l'intensité acoustique de l'ordre de $1/\varepsilon$, soit $E_a \sim 10^3$, qui nécessiteront un traitement numérique spécifique).

Dynamique d'établissement

Les lasers Brillouin traditionnels sont connus pour leur très grande cohérence [5], liée à un processus non linéaire très efficace d'auto-stabilisation de la phase de l'onde Brillouin, la phase de l'onde acoustique, la plus faible, "absorbant" d'éventuels défauts de phase de l'onde pompe, une alternance de processus Stokes et anti-Stokes maximisant le gain en annulant la phase globale $\Phi = \phi_p - \phi_B - \phi_a \sim 0$ [6]. Dans le cas du miroir Brillouin inversé, c'est maintenant l'onde Brillouin qui se trouve être plus faible que l'onde acoustique. Leurs rôles sont donc inversés, et c'est la phase de l'onde acoustique qui est stabilisée.

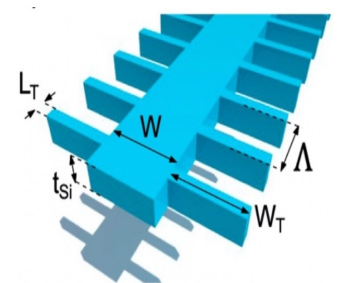


À gauche : miroir Brillouin inversé pour une forte dispersion et un fort amortissement acoustiques ($\alpha = 1$, $\mu = 21$). Noter les phases pompe et Brillouin turbulentes à l'extrémité de la fibre, quand la phase acoustique reste essentiellement constante. À droite : idem, pour un amortissement acoustique modéré ($\mu = 7$) Noter la croissance extrêmement rapide de l'amplitude acoustique



Diffusion Brillouin dans les cavités optomécaniques et perspectives

Compte tenu de la complexité, d'une part, de la structure modale acoustique des fibres optiques microstructurées [7], et d'autre part de la relation de dispersion acoustique dans le régime inertiel [5,6], il ne s'est pas avéré possible d'identifier de configuration raisonnablement robuste où ce régime pourrait être observé expérimentalement. Les récents progrès de l'ingénierie de dispersion, optique et acoustique, dans les cavités optomécaniques silicium [8,9,10] combinés aux très faibles pertes désormais autorisées par les nanoguides suspendus permettent toutefois désormais d'envisager des nanolasers Brillouin bénéficiant de facteurs de qualité optique ($Q_{opt} \sim 10^4$) et acoustique ($Q_{ac} \sim 10^3$) considérables, à la fois efficaces et aux propriétés optomécaniques parfaitement contrôlées [11]. L'observation de miroirs Brillouin inversés semble donc accessible dans des composants de ce type, qui pourraient donc également constituer des filtres très efficaces.



Exemple de cavité optomécanique présentant une forte dispersion et un faible amortissement acoustiques (membrane de silicium nanostructurée, C2N, Zhang et al.) [8]

Références

- J. Botineau, C. Leycuras, É. Picholle et C. Montes, "Stabilization of a stimulated Brillouin fiber ring laser by strong pump modulation", J. Opt. Soc. Am. B, 6, 3, pp. 300-312 (1989).
- R.W. Boyd, K. Rzaewski et P. Narum, "Noise initiation of stimulated Brillouin scattering", Phys. Rev. A, 42, p. 5514 (1990).
- R.I. Woodward, É. Picholle et C. Montes, "Brillouin solitons and enhanced mirror in the presence of acoustic dispersion in a small-core photonic crystal fiber", JNOG'35, Rennes (2015).
- A. Montes, C. Montes et É. Picholle, "SBS mirror with inverted acoustic profile in presence of strong acoustic dispersion", J. Opt. Soc. Am. B, 38, 2, pp. 456-465 (2021).
- S. Gundavarapu et al., "Sub-Hertz fundamental linewidth photonic integrated Brillouin laser," Nat. Photonics 13, 60–67 (2019).
- A. Montes, C. Montes et É. Picholle, "Autostabilisation de la phase acoustique dans un miroir Brillouin inversé en présence d'une forte dispersion acoustique, JNOG'40, Dijon (2021)
- 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).
- J. Zhang, X. Le Roux, M. Montesinos-Ballester, O.Ortiz, D. Marris-Morini, É. Cassan, L. Vivien, N.D. Lanzillotti-Kimura et C. Alonso-Ramos, "Generating 10 GHz phonons in nanostructured membranes optomechanic cavity", preprint, 2021 (ArXiv)
- D.T.T. Dinh, X. LeRoux, J. Zhang, M. Montesinos-Ballester, C. Lafforgue, D. Benedikovic, P. Cheben, É. Cassan, D. Marris-Morini, L. Vivien et C. Alonso-Ramos, "Shaping the modal confinement in silicon nanophotonic waveguides through dual-metamaterial engineering", preprint, 2022 (ArXiv).
- P. Nuno Ruano, J. Zhang, D. Melati, D. Gonzalez Andrade, X. LeRoux, É. Cassan, D. Marris-Morini, L. Vivien, N.D. Lanzillotti-Kimura et C. Alonso-Ramos, "Genetic optimization of Brillouin gain in subwavelength-structured membrane waveguides", JNOG Nice 2022.
- B.J. Eggleton, C.G. Poulton, P.T. Rakish, M.J. Steel et G. Bahl, "Brillouin integrated photonics", Nature Photonics, 13, pp. 664–677 (2019).