

OPTOMÉCANIQUE AVEC DES MEMBRANES À CRISTAL PHOTONIQUE

Kevin Makles¹, Inna Krasnokutska¹, S. Deléglise¹, Tristant Briant¹, P-F Cohadon¹, A. Heidmann¹, Viktor Tsvirkun², Remy Braive², Isabelle Robert²

¹ Laboratoire Kastler Brossel, UPMC-ENS-CNRS, Case 74, 4 place Jussieu, F75252 Paris Cedex 05, France

² Laboratoire de Photonique et Nanostructures, CNRS UPR 20, Route de Nozay, 91460 Marcoussis France

makles@spectro.jussieu.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons le développement d'une nouvelle génération de résonateurs optomécaniques combinant une haute réflectivité grâce au design d'un cristal photonique ainsi que de faibles pertes mécaniques, dans le but d'atteindre son régime quantique. De plus le développement d'un schéma d'excitation par couplage capacitif permettra par la suite de coupler notre système à un circuit RF.

MOTS-CLEFS : *Optomécanique; Cristal photonique; cavité Fabry-Pérot*

1. INTRODUCTION

Le couplage optomécanique entre le mouvement d'un miroir et les fluctuations quantiques d'un faisceau de photon est apparu premièrement dans le contexte des détecteurs d'ondes gravitationnelles. Depuis, plusieurs schémas impliquant une cavité Fabry Perot et un miroir mobile subissant les effets du couplage optomécanique ont été proposés dans le but de pouvoir observer les fluctuations quantiques de position du résonateur, ou les effets de pression de radiation ou encore de pouvoir le coupler à d'autres systèmes quantiques, tels que des atomes ou des jonction Josephson. Dans les régimes précédemment évoqués le bruit thermique du résonateur est la première limite à dépasser. Il faut donc que la température du mode mécanique soit inférieure à la température quantique qui elle est proportionnelle à la fréquence mécanique du résonateur, celle-ci devra être suffisamment élevée (MHz au GHz). Le résonateur devra aussi être compatible avec les techniques de cryogénie classiques ainsi que le refroidissement actif (cold damping) ou laser (sideband cooling) qui nous permettront d'atteindre des températures de l'ordre de la centaine de μK . De plus les fluctuations de mouvement du point d'énergie zéro d'un oscillateur mécanique étant inversement proportionnelles à la masse, celle-ci devra être la plus faible possible. Pour pouvoir les sonder un schéma de mesure très sensible utilisant les techniques de détections optiques les plus fines sera employé, celui-ci nécessitant une très grande réflectivité de notre oscillateur mécanique.

2. OPTOMECHANIQUE AVEC DE MEMBRANES À CRISTAL PHOTONIQUE

La plupart des dispositifs optomécaniques sont recouverts par des empilements de couche de diélectrique dans le but d'augmenter leur réflectivité, malheureusement ces dépôts souffrent de fortes pertes mécaniques et augmentent la masse du résonateur. Dans ce contexte les nanomembranes à cristal photonique semblent être des candidats très prometteurs. Grâce au design géométrique du cristal photonique une réflexion totale en incidence normale et théoriquement atteignable, figure 1, elle jouira donc des propriétés d'un miroir de grande réflectivité et une faible masse (100pg). Pour observer le mouvement de notre membrane nous avons construit une cavité Fabry Pérot de grande finesse dont la membrane sera le miroir de fond. Au vu des faibles dimensions de nos membranes, ($20 \times 10 \times 0.26 \mu m^3$) figure 2, nous avons besoin d'une cavité optique ayant un très faible waist, environ $3 \mu m$, pour cela nous avons développé nos propres miroirs à très faible rayon de courbure et les intégrer dans des cavités ultra courtes ($100 \mu m$) [1].

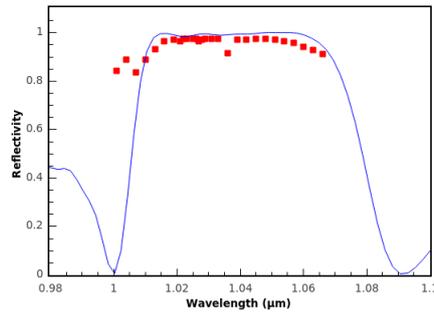


FIGURE 1 : Simulation FDTD et mesure de la réflectivité de la membrane en fonction de la longueur d'onde.

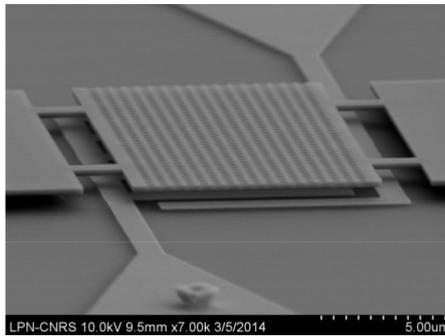


FIGURE 2 : Vu MEB de la membrane avec l'actuateur électrostatique

Une fois terminée notre cavité nous permet de résoudre des déplacements de l'ordre de $10^{-16} m \cdot Hz^{-1/2}$ qui théoriquement serait suffisant pour observer les fluctuations du point zéro de notre oscillateur. Par ailleurs elle nous a déjà permis d'observer le bruit thermique de nos membranes.

Nous avons ensuite développé une boucle de refroidissement actif, boucle de rétroaction qui nous permettra de diminuer la température effective d'un mode mécanique en venant ajouter une force visqueuse sur la membrane [2]. Cependant cela sera au détriment de son facteur de qualité mécanique, il est donc crucial d'avoir un facteur de qualité le plus important possible. Dans ce but différentes géométries et matériaux ont été testés, récemment une technique de stress additionnel nous a permis d'augmenter d'un facteur 10 la qualité de nos résonateurs, atteignant des facteurs de qualité de 65000 à basse température. Parallèlement la petite taille de nos résonateurs donne naissance à des phénomènes mécaniques non linéaires, en effet le fort rapport d'aspect de nos structures conduit à des contraintes très importantes dans nos membranes lors de larges amplitudes de déplacement. Nous en avons observé le comportement statique comme la bistabilité de la réponse mécanique ou des effets dynamiques comme la génération de conjugués de phase ou encore le couplage entre plusieurs modes [3]. De ces effets nous pouvons tirer des avantages, comme par exemple la stabilisation en fréquence de l'oscillateur mécanique ou la mesure non destructive.

Nous sommes également entrain de développer un nouveau schéma d'excitation de résonateur, utilisant un couplage capacitif fait entre la membrane et deux électrodes interdigitées placées sur le substrat, figure 2. Ces électrodes interdigitées ont été conçues pour optimiser le couplage entre le déplacement de la membrane et la variation de la capacité du condensateur (30 Hz). Nous avons observé le ressort électrostatique, dû au champ électrique généré entre les électrodes, figure 3, où l'on voit que la fréquence naturelle du résonateur dépend quadratiquement du bias appliqué aux bornes des électrodes ainsi qu'un élargissement de la réponse qui correspond à un amortissement mécanique induit par la résistivité du circuit. Ces électrodes nous permettront dans un futur proche de pouvoir coupler notre résonateur avec

un circuit RF [4].

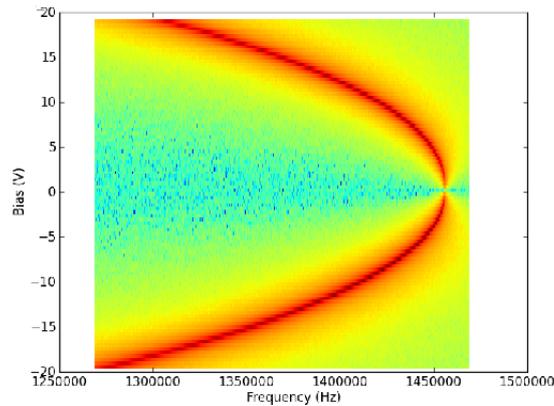


FIGURE 3 : Mesure de la réponse mécanique en fonction du bias appliqué sur les electrodes

CONCLUSION

Nous vous présentons la réalisation et l'optimisation pour l'optomécanique d'un résonateur fait en InP. Les propriétés optiques ont été ajustées à l'aide du design d'un cristal photonique qui permet d'atteindre des réflectivités proches de l'unité, et dont les propriétés mécaniques sont améliorées par la générations de contraintes internes. Une étude approfondie des propriétés mécaniques menant à une dynamiques non linéaire a été faite. Puis la mise en cavité Fabry-Perot du resonateur a permis d'observer et de contrôler son bruit thermique. Finalement un nouveau schéma d'excitation des modes mécaniques par couplage capacitif a été developpé.

RÉFÉRENCES

- [1] T. Antoni, A. G. Kuhn, T. Briant, P.-F. Cohadon, A. Heidmann, R. Braive, A. Beveratos, I. Abram, L. Le Gratiet, I. Sagnes and I. Robert-Philip, " Deformable two-dimensional photonic crystal slab for cavity optomechanics", *Opt. Lett.*, 36, 3434, 2011.
- [2] J.-M. Courty, A. Heidmann, M. Pinard, "Quantum limits of cold damping with optomechanical coupling", *Euro. Phys. Jour. D*, 17, 2001.
- [3] T. Antoni, K. Makles, R. Braive, T. Briant, P.-F. Cohadon, I. Sagnes, I. Robert-Philip and A. Heidmann, "Nonlinear mechanics with suspended nanomembranes", *Eur. Phys. Lett.*, 100, 68005, 2012.
- [4] T. Bagci, A. Simonsen, S. Schmid, L. G. Villanueva, E. Zeuthen, J. Appel, J. M. Taylor, A. Sørensen, K. Usami, A. Schliesser, and E. S. Polzik, "Optical detection of radio waves through a nanomechanical transducer", *Nature*, 507, 81-85, 2014.