

# INTERACTION OPTOMECHANIQUE DANS UN CRISTAL PHOTONIQUE EN $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ POUR LA GENERATION DE SIGNAUX MICRO-ONDES

Inès Ghorbel<sup>1,2</sup>, Rui Zhu<sup>2</sup>, François Swiadek<sup>1</sup>, Aude Martin<sup>1</sup>, Loïc Morvan<sup>1</sup>, Daniel Dolfi<sup>1</sup>,  
Grégory Moille<sup>1</sup>, Gaëlle Lehoucq<sup>1</sup>, Rémy Braive<sup>2,3</sup>, Sylvain Combrié<sup>1</sup>, Alfredo De Rossi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Thales Research and Technology, 1, avenue Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau, France

<sup>2</sup> Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, France

<sup>3</sup> Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 75207 Paris, France

[ines.ghorbel@u-psud.fr](mailto:ines.ghorbel@u-psud.fr)

## RÉSUMÉ

Nous présentons le premier cristal optomécanique fait de GaInP, un matériau à faible absorption résiduelle basé sur un nouveau design. Il permet d'atteindre de haut facteur de qualité optique et d'observer des oscillations auto-entretenues avec une faible puissance optique seuil et une faible largeur de raie : 70 Hz à 2.92 GHz.

**MOTS-CLEFS :** *optomécanique, cristal photonique, micro-ondes*

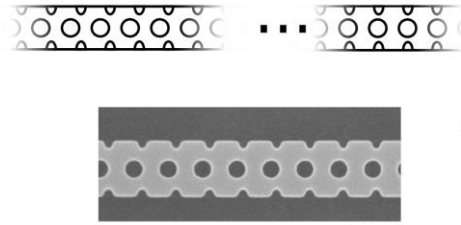
## 1. INTRODUCTION

Les cristaux optomécaniques (OM) [1] sont des structures à cristaux photoniques qui ont été conçues de manière à confiner les modes optiques ainsi que les modes mécaniques. La colocalisation des modes optiques et des modes mécaniques dans un volume extrêmement compact résulte en un couplage optomécanique fort à des fréquences de résonnance mécanique au GHz. Couplé à la transduction piézoélectrique, le couplage des signaux micro-ondes et optiques dans un même système mécanique a de profondes implications aussi bien en physique fondamental qu'en recherche appliquée [2], particulièrement en traitement du signal. Des cristaux optomécaniques avec un couplage important ont récemment été réalisés en Arséniure de Gallium (GaAs) [3]. Ici, nous présentons un nouveau matériau pour les cristaux optomécaniques, le phosphure de gallium et d'indium (GaInP). Tout comme le GaAs, le GaInP est un matériau piézoélectrique mais sa bande interdite est plus grande. Par conséquent, l'absorption à deux photons est supprimée aux longueurs d'onde télécom [4]. Nous présentons un cristal (OM) fait de GaInP dont le design est nouveau, basé sur le concept de bichromaticité [5]. Il permet de co-localiser les modes optiques et mécanique, avec un haut facteur de qualité optique et est très facile à optimiser car il est défini par un nombre limité de paramètres.

## 2. DESIGN DE LA CAVITE ET MODELISATION

Le cristal optomécanique consiste en une poutre suspendue, patternée par une ligne de trous avec une période constante  $a$ . Sur les côtés, la poutre est patternée par des demi-ellipses, avec une période  $a'=0.98a$  (Fig. 1). Ces deux motifs de période légèrement différente constituent la maille bichromatique. Dans [5], il a été démontré que des cristaux photoniques 2D bichromatiques créent un potentiel parabolique effectif confinant le mode optique avec peu de fuites. Ici, nous montrons grâce à la Finite Time Domain Difference Method, que notre structure 1D confine également des

a)



b)

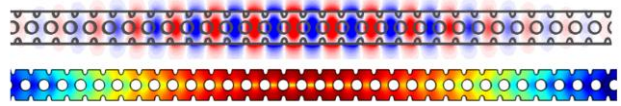


Fig. 1 : a) Design de la cavité opto-mécanique et photo au Microscope Electronique à Balayage de la cavité après fabrication b) Modélisation du mode optique et du mode mécanique

s'expliquer par la modulation de la rigidité de la poutre selon l'axe de la poutre (qui est plus molle au centre que sur les côtés). La structure est couplée optiquement par un guide d'onde à cristaux photoniques 2D qui sert aussi d'ancrage pour le cristal optomécanique. La résonance du monde fondamental mécanique se trouve à environ 3 GHz d'après les simulations faites avec la méthode des éléments finis. Le couplage optomécanique  $g_0$  sert à quantifier la force du couplage entre les modes optiques et mécaniques et est égal au shift en fréquence du mode optique dû au plus petit déplacement détectable. Pour le calculer, il faut prendre en compte le mouvement des bords de la cavité et le changement de l'indice dû à l'effet photo-élastique. Pour les modes fondamentaux optiques et mécaniques, nous trouvons  $g_0/2\pi=377$  kHz.

### 3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

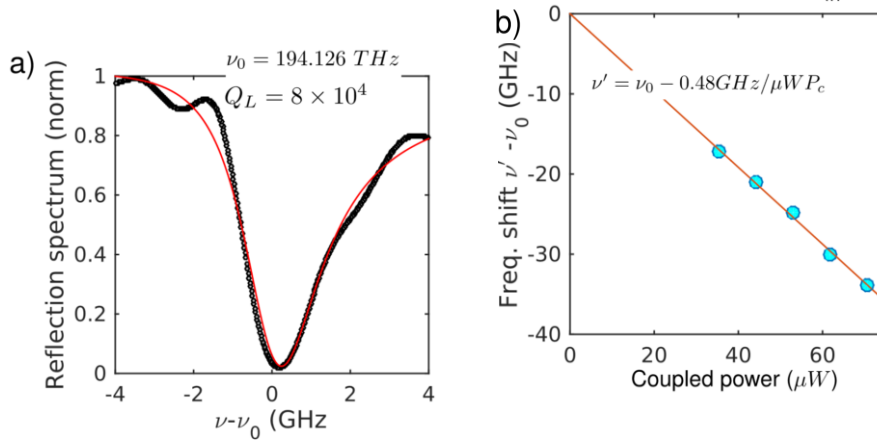


Fig2 : a) Résonance optique avec un facteur de qualité chargé de 80 000 b) Evolution de la fréquence de résonance due à l'effet thermo-optique

Nous commençons par caractériser le mode optique fondamental. Le facteur de qualité chargé de la cavité varie entre 30 000 et 120 000 alors que le facteur de qualité intrinsèque, limité par le désordre, est supérieur à 200 000. Alors que l'absorption non-linéaire est non présente, l'absorption résiduelle est toujours responsable d'une bistabilité thermo-optique (Fig 1b) qui révèle une dépendance linéaire de la fréquence de résonance optique avec la puissance optique injectée. Cela permet d'estimer le taux d'absorption à 0.4%.

En connectant le signal provenant de la cavité à une photodiode, nous pouvons observer la modulation de la lumière par l'oscillation mécanique. Le mode fondamental mécanique se trouve à 2.94 GHz. Son facteur de qualité à température ambiante et pression atmosphérique est de 2300, ce qui correspond à une largeur de raie de 1.2 MHz. Le couplage opto-mécanique  $g_0/2\pi$  se mesure grâce à la méthode proposée dans [7] et est égal à 380 kHz. Du fait de l'interaction opto-mécanique, un échange d'énergie se produit entre le mode optique et le mode mécanique lorsque la résonance optique est pompée du côté bleu [6] ce qui compense les pertes de l'oscillateur mécanique. Pour une puissance seuil optique de 40  $\mu$ W (la puissance seuil théorique peut se calculer grâce à [6] est égale à 47  $\mu$ W), nous observons des oscillations auto-entretenues. Pour une puissance optique injectée de 53  $\mu$ W, la largeur de raie des oscillations auto-entretenues obtenue en fittant le spectre est égale à

$80 \pm 20$  Hz (Fig 3) sans boucle de stabilisation. Nous mesurons également le bruit de phase de l'oscillateur opto-mécanique en régime d'oscillations auto-entretenues (Fig 3). La largeur de raie trouvée grâce à la pente en  $1/f^2$  est concordante avec celle trouvée en fittant le spectre. De plus, nous obtenons (après correction) un bruit de phase similaire à un micro-toroïde en nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) bien que notre système soit bien plus léger[8].

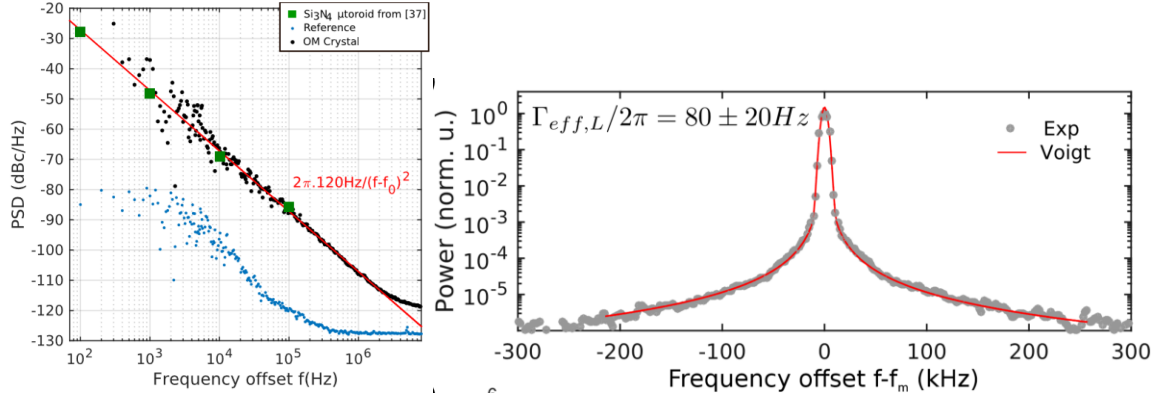


Fig 3 (à droite) Spectre du mode mécanique en régime d'oscillations auto-entretenues (à gauche) bruit de phase de l'oscillateur opto-mécanique en régime d'oscillations auto-entretenues

### 3. CONCLUSION

En conclusion, nous avons présenté un nouveau design pour les cristaux optomécanique basé sur le concept de bichromaticité. Nous avons prouvé que ce design pouvait avoir un fort facteur de qualité optique ( $> 200\,000$ ) et qu'il pouvait confiner à la fois les photons et les phonons. Nous avons aussi réalisé le premier cristal optomécanique en InGaP, un matériau à grand gap permettant de s'affranchir de l'absorption à deux photons et ayant une faible absorption résiduelle. Nous avons mesuré un fort couplage optomécanique de 380 kHz ainsi que des oscillations auto-entretenues à 2.94 GHz. La largeur de raie des oscillations est de l'ordre de la centaine de Hertz et ce, sans boucle de stabilisation. La prochaine étape est d'implémenter une boucle de stabilisation et d'explorer la dynamique non-linéaire de cet oscillateur.

### RÉFÉRENCES

- [1] Eichenfield, Matt et al. Nature Vol 462, November 2009, p. 78 -82
- [2] Balram, Krishna C. et al. Physical Review Applied, Vol 7, 2017, p. 024008.
- [3] Balram, Krishna C. et al. Optica, Vol 1 December 2014, p. 414
- [4] Combrié, Sylvain et al., Laser & Photonics Reviews, Vol 11, Issue 11, November 2017, p.1700099
- [5] Alpeggiani, Filippo et al., Applied Physics Lett., Vol 107, December 2015, p. 2611
- [6] M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg, and F. Marquardt, Reviews of Modern Physics 86, 1391 (2014).
- [7] M. Gorodetsky, A. Schliesser, G. Anetsberger, S. Deleglise, and T. J. Kippenberg, Optics express 18, 23236 (2010).
- [8] S. Tallur, S. Sridaran, and S. A. Bhawe, Optics Express 19, 24522 (2011).