

NANO-OSCILLATEUR ÉLECTRO-OPTOMÉCANIQUE À BOUCLE FERMÉE POUR LA PHOTONIQUE MICRO-ONDE INTÉGRÉE

Inès GHORBEL¹, Alfredo DE ROSSI¹, Sylvain COMBRIE¹, Rémy BRAIVE^{2,3,4,*}

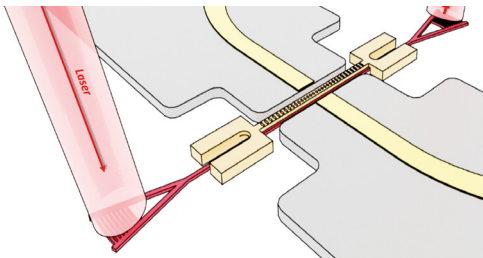
¹ Thales Research and Technology, Campus Polytechnique, Palaiseau, France

² Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Université Paris Saclay, Palaiseau, France

³ Université Paris Cité, Paris, France

⁴ Institut Universitaire de France (IUF)

* remy.braive@universite-paris-saclay.fr



**La forte interaction optomécanique au sein d'une nanos-
tructure intégrée sur un circuit photonique permet la gé-
nération d'oscillation directement aux fréquences GHz sur
une porteuse optique. L'ajout d'une boucle de rétroaction
opto-électro-mécanique renforce la stabilité court terme
de l'oscillateur.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202412947>

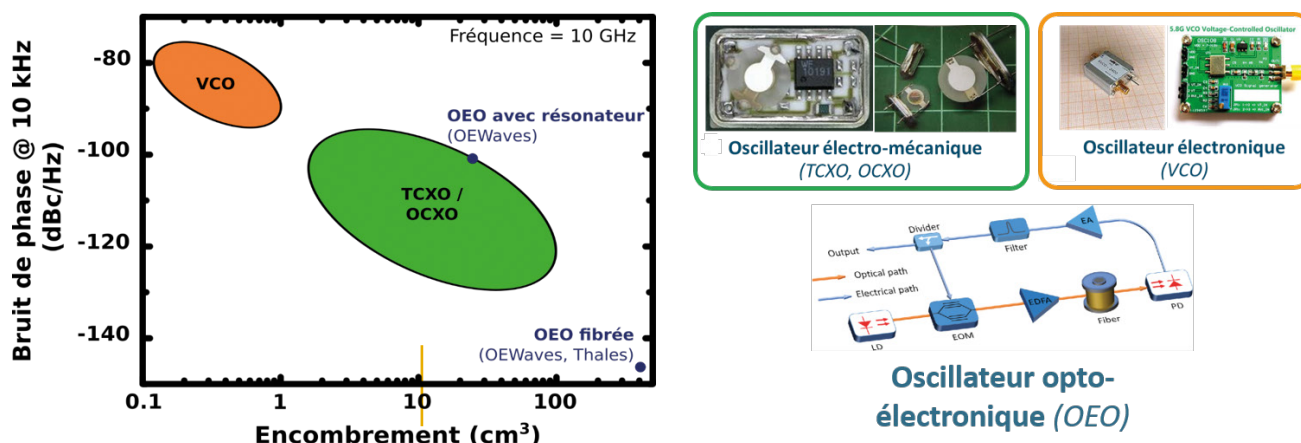
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

L'optomécanique ou autrement dit l'interaction réciproque entre la lumière et le mouvement mécanique d'un objet, est un domaine de recherche dont les origines se trouvent au cœur de la mécanique quantique. L'image d'un objet mobile interagissant avec la lumière via la pression de radiation a été proposée très tôt comme support théorique pour illustrer certaines

des prédictions quantiques emblématiques. Formalisées au milieu des années 1970 dans le contexte de l'interférométrie à ondes gravitationnelles, les développements de la mesure continue de la position jusqu'aux limites fondamentales sont une contribution essentielle à la théorie de la mesure quantique (voir article p.38). Au cours de cette période, l'impact de la pression de radiation a été observé dans une grande diversité de systèmes, allant des interféromètres

à ondes gravitationnelles à l'échelle du kilomètre aux micro-résonateurs couplés à des cavités optiques de conceptions, de tailles, de matériaux et de géométries variés. De manière remarquable, tous ces systèmes peuvent être décrits par les mêmes principes sous-jacents [1].

Depuis son origine, les développements scientifiques et technologique liés à l'optomécanique se sont principalement concentrés sur l'observation d'effets quantiques à ● ● ●



l'échelle mésoscopique. Néanmoins, dans le domaine classique, l'une des contributions notables de ce domaine est la manifestation d'une instabilité paramétrique, qui entraîne une amplification mécanique et donc une oscillation auto-entretenu du mode mécanique pilotée de manière purement optique [2]. Aujourd'hui, les oscillateurs, dispositifs permettant la mesure précise du temps ou la génération de référence de fréquence, sont principalement des quartz ou des générateurs électroniques avec des domaines d'application vastes et particulièrement impactants dans notre société moderne : les communications sans fil, l'électronique numérique à grande vitesse, les radars, les systèmes de chronométrage et la navigation moderne. Néanmoins, un des défis dans ce domaine réside dans la génération directe de signaux micro-ondes à haute fréquence dans le domaine des GHz et au-delà tout en conservant un bruit de phase ultra-faible ou autrement dit une stabilité importante. Dans ce cadre, l'optomécanique à l'échelle nanométrique peut permettre de répondre

Figure 1. Représentation de l'état de l'art des oscillateurs en fonction de l'encombrement et le bruit de phase à 10 kHz de la porteuse normalisé à une fréquence de 10 GHz avec en vert les oscillateurs à quartz, en orange les oscillateurs électronique type VCO et en bleu les oscillateurs opto-électroniques (OEO).

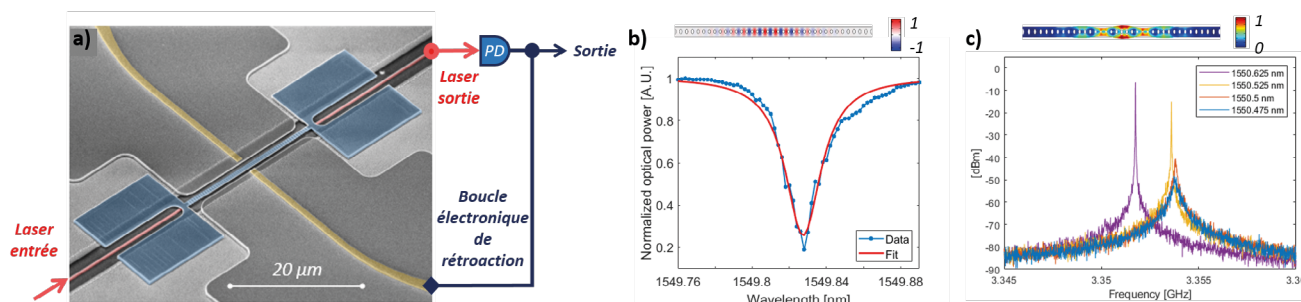
à ce défi et proposer une nouvelle technologie d'oscillateurs compacts pouvant à terme s'approcher des performances de l'état de l'art des oscillateurs électroniques et hybrides.

PERFORMANCE ET STABILITÉ DES OSCILLATEURS

De manière générale, la stabilité d'un oscillateur, que ce soit en phase ou en amplitude, est un facteur de mérite essentiel. Les oscillateurs dans leurs utilisations quotidiennes sont tous soumis à un bruit qui peut prendre différentes formes. Lorsque ce bruit est superposé au signal périodique de sortie de l'oscillateur, il induit une

variation aléatoire des signaux de sortie en amplitude et/ou en fréquence, ce qui limite la précision et l'exactitude des mesures temps-fréquence effectuées par l'oscillateur. En général, le bruit d'amplitude peut être supprimé par différentes techniques (ex : compression du gain...). Le bruit de phase quant à lui peut être divisé en deux typologies principales : le bruit additif et le bruit multiplicatif. Le premier comprend le bruit thermique et le bruit de grenaille, pour n'en citer que quelques-uns. Par contre, la contribution principale au second type de bruit provient des bruits ambiants tels que les fluctuations de

Figure 2. (a) Image MEB (image du haut) du cristal optomécanique (bleu) au-dessus d'un guide d'onde silicium (rouge) avec les électrodes (jaune) au cœur d'une boucle de rétroaction optoélectronique de rétroaction ; (b) Transmission optique avec le profil du champ électromagnétique du mode optique confiné ; (c) Résonance mécanique pour différentes longueurs d'onde avec le profil du déplacement.



température ou l'alimentation électrique. Ainsi, la génération d'un signal de haute pureté nécessite de mettre en œuvre des stratégies appropriées pour éliminer le bruit d'amplitude et réduire autant que possible le bruit de phase.

OSCILLATEURS ÉLECTRONIQUES ET HYBRIDES : ÉTAT DE L'ART

Traditionnellement, les oscillateurs à quartz et leurs versions apparentées telles que TCXO (oscillateur à cristal contrôlé par la température) ou OCXO (oscillateur à cristal contrôlé par un four) offrent aujourd'hui une combinaison inégalée de compacité et de pureté spectrale (Figure 1). Néanmoins, ils oscillent à des fréquences inférieures à quelques centaines de MHz. D'autres types d'oscillateurs (tels que les oscillateurs à résonateur diélectrique et les oscillateurs à saphir) produisent directement des signaux à haute fréquence reposant essentiellement sur des dispositifs résonants qui se caractérisent par des temps de stockage importants. Toutefois, les meilleurs résonateurs diélectriques présentent un facteur Q limité à haute fréquence, tandis que les oscillateurs en saphir sont encombrants et complexes. Les oscillateurs micro-ondes optoélectroniques (OEO) constituent une alternative prometteuse [3].

En ce qui concerne les oscillateurs à quartz et apparentés, pour un fonctionnement à des fréquences plus élevées, leurs fréquences doivent être multipliées au prix d'une augmentation du bruit de l'oscillateur. À l'inverse, les OEO permettent de générer directement des signaux micro-ondes à haute fréquence et ont déjà démontré de très hautes performances en termes de pureté spectrale (typiquement -145 dBc/Hz à 10 kHz de décalage pour une oscillation à 10 GHz) compatibles avec des applications telles que les radars. Cette pureté du signal micro-onde dans les OEO est obtenue grâce à une ligne à retard optique (généralement une fibre optique) insérée dans une boucle de rétroaction. Le facteur Q de l'oscillateur est alors donné par L/λ_{RF} , L représentant la longueur de la fibre et λ_{RF} la longueur d'onde du signal RF. Des facteurs Q de l'ordre de 105

sont nécessaires pour obtenir une pureté spectrale élevée. Cela impose l'utilisation de fibres de quelques centaines de mètres voire quelques km de long. Ces lignes à retard sont cependant sensibles à l'environnement (vibrations, température...) dégradant le bruit de l'oscillateur proche de la porteuse. En outre, l'architecture OEO se traduit par des dispositifs encombrants (typiquement quelques litres), empêchant leur intégration dans des systèmes embarqués (Figure 1).

Le défi réside donc dans la mise en œuvre d'oscillateurs miniaturisés, compacts, transportables et intégrés, en particulier pour les applications embarquées et le traitement du signal sur puce. Ce haut niveau de miniaturisation est important non seulement du point de vue de la compacité, mais aussi pour une meilleure insensibilité à l'environnement et également en termes de consommation énergétique. Dans ce cadre, la réalisation d'une synthèse de fréquence à haute pureté spectrale pour les applications micro-ondes, directement à la fréquence d'intérêt dans le domaine des GHz et dans un dispositif miniaturisé sur puce reste un défi dans le domaine de la photonique micro-onde.

CRISTAUX OPTOMÉCANIQUES

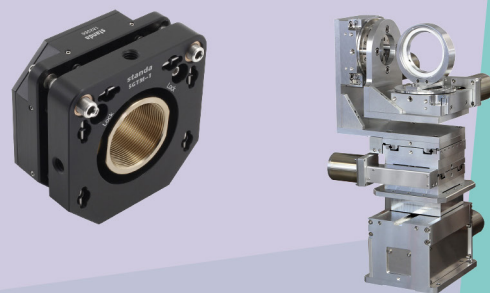
Les avancées récentes dans le domaine de l'optomécanique se sont en partie appuyées sur les techniques de nanofabrication afin d'approfondir, contrôler et renforcer les interactions photon-phonon au sein d'une structure nanométrique. La réduction de la taille du résonateur optomécanique à l'échelle nanométrique permet entre autres d'obtenir des modes à hautes fréquences (MHz – GHz) et nécessite des puissances optiques plus faibles. Les diverses implémentations à l'échelle nanométrique de l'optomécanique s'inspirent principalement des plateformes nanophotoniques largement explorées telles que les micro-disques, résonateurs en anneaux et les membranes à cristal photonique.

Ces dernières sont connues depuis plusieurs dizaines d'années pour offrir un fort confinement de la lumière dans des volumes limités par la diffraction grâce à une bande interdite photonique. ● ● ●

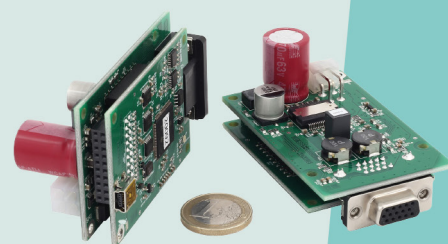
standa

par **OPTON LASER**
INTERNATIONAL

OPTO-MÉCANIQUE & MICRO-POSITIONNEMENT



- ▲ Tables Optiques & Breadboards à façon
- ▲ Large gamme de platines manuelles & motorisés compatibles vide
- ▲ Montures Optiques jusqu'à 6 "
- ▲ Grande capacité de customisation
- ▲ Carte de contrôle OEM & super versatile



www.optonlaser.com

Plus récemment, la mise en place simultanée d'une bande interdite acoustique et photonique a permis de mettre en évidence un confinement acoustique au sein de ces nanostructures. De par leurs géométries, elles sont le siège de modes de vibration oscillant directement aux fréquences GHz. Le couplage entre les degrés de liberté optique et acoustique ou couplage optomécanique est fortement renforcé dans ces résonateurs nanométriques du fait de la co-localisation dans le même volume des résonances photoniques et acoustiques.

Ces structures également appelées cristaux optomécaniques constituent donc une plate-forme de choix pour l'utilisation du couplage photon-phonon, en permettant une interaction optomécanique améliorée dans le domaine des GHz. Cette interaction quantifiée par le taux de couplage optomécanique dans le vide g_0 , décalage de fréquence optique induit par les fluctuations du point zéro du mode mécanique, dépasse les 100 kHz dans les cristaux optomécaniques.

En tirant parti de la fréquence élevée des modes mécaniques au sein des cristaux optomécaniques, de la transduction optique et du contrôle de la fréquence mécanique, il a été possible, au cours de la dernière décennie, de réaliser de nombreuses démonstrations que ce soit dans le régime quantique ou classique. Le développement de ces nouveaux systèmes optomécaniques a permis d'atteindre le régime où les effets de pression de radiation deviennent dominants, avec des réalisations telles que le refroidissement à l'état fondamental d'un résonateur mécanique, la transduction de qubit sur un photon ou encore la métrologie de la température. Dans le même temps, la capacité de ces mêmes systèmes optomécaniques à obtenir une oscillation auto-entretenu sans besoin de rétroaction électronique ouvre de nouvelles opportunités et des concepts innovants pour des capteurs ultra-compacts ou des oscillateurs micro-ondes stables.

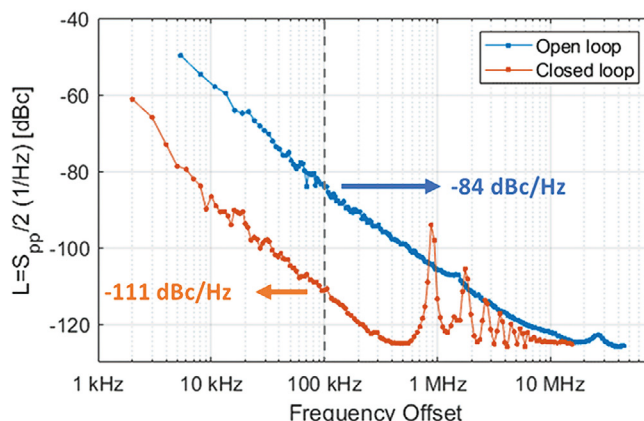


Figure 3. Mesure de bruit de phase sans (bleu) et avec (orange) la boucle de rétroaction.

OSCILLATEURS OPTOMÉCANIQUES MICRO-ONDES

L'architecture la plus simple pour un oscillateur à micro-ondes exploitant l'interaction optomécanique est un résonateur optomécanique (Figure 2a) à commande optique présentant des oscillations régénératives dans le GHz. Grâce à la résonance optique aux longueurs d'onde télécom (~1550 nm) – Figure 2b, l'énergie du laser est alors convertie en un signal micro-ondes sans aucune boucle de rétroaction. En exploitant l'interaction photon-phonon améliorée dans un cristal optomécanique de haute qualité oscillant directement dans le domaine des GHz (Figure 2c), ces derniers répondent déjà à l'une des exigences du domaine.

Cependant, bien qu'une telle architecture offre une simplicité inégalée et de petits facteurs de forme, s'appuyer uniquement sur les oscillations régénératives dans les résonateurs optomécaniques ne permet pas d'obtenir une pureté spectrale suffisante, en raison des fluctuations induites par l'environnement, du bruit thermo-mécanique, du bruit de grenaille.... La réduction de ces fluctuations nécessite l'intégration de plusieurs composants clés : (i) un circuit optique pour lire et « alimenter » l'oscillation mécanique ainsi (ii) qu'une excitation résonante efficace pour contrôler le mode mécanique dans la gamme des GHz (Figure 2a). L'objectif n'est pas seulement l'utilisation de

l'interaction optomécanique pour la génération de fréquences ultrastables, mais aussi la mise en place de stratégies de verrouillage et de rétroaction qui exploitent pleinement l'intégration sur puce des moyens de contrôle électrique et/ou acoustique.

Préalablement à l'obtention de performances de pointe en termes de bruit de phase, la mise en œuvre de techniques de stabilisation de la fréquence optomécanique est indispensable. Parmi les diverses techniques, le verrouillage par injection ou « injection locking » est l'une des plus répandues. Différentes architectures peuvent être mises en œuvre afin de réaliser ce verrouillage. Dans le cas présent [4], l'excitation résonante directe du mode mécanique au sein du cristal optomécanique a été choisie en tirant parti des propriétés piézoélectriques du matériau utilisé, à savoir le Phosphore de Gallium (GaP). Cela permet ainsi d'obtenir un actionnement électromécanique intégré sur puce. L'optimisation de cette excitation nécessite de placer la structure optomécanique au centre de deux électrodes métalliques, tout en minimisant l'impact de leur présence sur le champ optique. L'application d'un signal électrique à la fréquence mécanique, tout en couplant le laser à proximité de la résonance optique, permet d'observer l'actionnement électromécanique transduit dans le domaine optique. En fonction des désaccords spectraux (optique et électro-mécanique) ainsi que de l'intensité du laser et l'amplitude

de l'excitation électrique, une large zone d'« injection locking » est atteignable.

A partir de là, il est donc possible de construire une boucle de rétroaction électro-opto-mécanique afin de réinjecter dans la cavité optomécanique le signal d'oscillation retardé, comme nous l'avons réalisé dans [4] (Figure 2a). Dans [4], la boucle est constituée de 210 mètres de fibre optique, ce qui fournit le délai nécessaire à une stabilisation optimale. L'intensité de la rétroaction est contrôlée par l'amplitude du signal RF envoyé directement aux électrodes à proximité de l'oscillateur optomécanique. Le bruit de phase minimal mesuré avec la boucle de rétroaction atteint une valeur typique de l'ordre de -111 dBc/Hz à 100 kHz de la porteuse (Figure 3), soit une largeur de raie de 0,7 Hz. Il s'agit d'une réduction drastique du bruit de phase par rapport à une architecture en boucle ouverte où un bruit de phase de -82 dBc/Hz (largeur de raie de 895 Hz) est mesuré au même décalage par rapport à la porteuse. L'utilisation d'une longueur de fibre de près de 210 m induit inévitablement des pics parasites à partir d'un décalage de 917 kHz, correspondant à l'intervalle spectral libre de la boucle. Cette dernière agit comme une cavité à Q élevé à cette fréquence de résonance spécifique. Une longueur de fibre plus courte réduirait les améliorations apportées par la stabilisation. À l'inverse, une fibre plus longue introduirait des pics parasites à une fréquence plus basse, augmentant ainsi le bruit proche porteuse. Par conséquent, le choix de la longueur de la fibre est un compromis entre ces deux considérations.

Il est important de noter que ces développements éliminent la nécessité d'un modulateur électro-optique externe encombrant sur le chemin optique pour

l'actionnement de la cavité, ce qui évite la conversion électrique-optique. Nous avons ainsi démontré une diminution de près de 30 dB sans perte optique supplémentaire. Il s'agit d'une étape importante vers des oscillateurs optomécaniques entièrement intégrés et un système plus compact.

LES DÉFIS À VENIR ET VISION

Néanmoins, pour atteindre les performances des OEO avec des oscillateurs optomécaniques, il est nécessaire d'améliorer l'efficacité de la transduction électromécanique ainsi que de réduire l'impact et les perturbations de l'environnement sur l'oscillateur lui-même. Afin d'obtenir un oscillateur optomécanique à très faible bruit de phase, ces exigences doivent également s'accompagner de l'intégration de la boucle de rétroaction sur puce. Des développements sont en cours pour la mise en place de délai optique et/ou acoustique suffisants pour une grande pureté spectrale. Alors, la stabilisation pourrait être obtenue en mettant en œuvre des boucles optoélectroniques compatibles avec l'intégration sur puce, exploitant un contrôle optique ou externe du mouvement mécanique. Cette intégration complète sur une unique puce reste actuellement un défi.

Au-delà de l'oscillateur optomécanique stable, l'architecture développée, l'intégration hybride de la plate-forme optomécanique sur le circuit optique SOI avec un contrôle résonnant électrique efficace, doit permettre d'ouvrir la voie à des fonctionnalités optiques plus avancées et cascadées pour le traitement du signal (y compris des détecteurs optiques, des éléments de multiplexage... sur la même puce), l'informatique à réservoir photonique voire même le développement de machines d'Ising cohérentes. ●

RÉFÉRENCES

- [1] M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg, and F. Marquardt, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 1391 (2014)
- [2] Michael Metcalfe, *Appl. Phys. Rev.* **1**, 031105 (2014)
- [3] T. Hao, Y. Liu, J. Tang *et al.*, *Adv. Photonics* **2**, 1 (2020).
- [4] R. Horváth, G. Modica, I. Ghorbel *et al.*, *ACS Photonics* **10**, 2540–2548 (2023)



HASO LP

Large pupil
wavefront
sensor

Optical
characterization

Laser testing

Focus distance
adjustment

Direct sensing
without relay optics



www.imagine-optic.com

sales@imagine-optic.com
+33 1 64 86 15 60

imagine  optic