

Source paramétrique de paires de photons dans le domaine visible en technologie Nitrure

Introduction :

Au cours des dernières années, l'intégration de l'optique quantique sur des circuits intégrés photoniques (PIC) est devenue une étape essentielle pour faire face à la complexité croissante des expériences quantiques, permettant par là même de répondre aux problématiques de stabilité, de reproductibilité, de robustesse et de facilité de mise en œuvre. Une démonstration remarquable¹ d'intrication multidimensionnelle a ainsi été réalisée très récemment dans un circuit photonique intégré comportant plus de 500 composants dont des sources de lumière non classique.

La génération de lumière non classique ou « comprimée » est une exigence essentielle pour les architectures photoniques à variables continues (CV), pour la simulation quantique et le calcul quantique^{2,3} mais aussi pour dépasser la « limite quantique » de la détection, qui est critique sous des contraintes de faible flux (imagerie, tissus biologiques délicats, budget de puissance limité,...). La détection quantique distribuée (DKS) est également basée sur une lumière non classique, qui exploite plusieurs mesures distribuées pour améliorer la sensibilité⁴. Il existe aujourd'hui une concurrence féroce pour démontrer des sources de lumière non classiques très efficaces, miniaturisées et facilement intégrables sur puce, afin de pouvoir transposer des expériences aujourd'hui sur table optique en composants facilement utilisables.

Fonctionnant en dessous du seuil, les oscillateurs paramétriques optiques (OPO) génèrent une lumière non classique grâce à laquelle les fluctuations du champ électromagnétique sont manipulées. Les OPO et les peignes à micro-fréquences sont apparus dans le contexte de l'optique intégrée il y a une dizaine d'années et sont basés sur des micro-disques ou des résonateurs en anneau⁵. Alors que l'interaction paramétrique non linéaire dans les résonateurs en anneau est couramment utilisée pour la génération de paires de photons dans les circuits photoniques en silicium, la forte absorption non linéaire pénalise le « squeezing » et empêche les oscillations paramétriques. Par conséquent, le recours à des matériaux alternatifs tels que le nitrure de silicium [^{6, 7, 8, 9}] s'est avéré nécessaire.

Cependant, le nitrure de silicium, en phase amorphe, offre un contraste d'indice relativement modeste par rapport au silicium, ce qui limite sévèrement le potentiel de miniaturisation (les rayons des anneaux utilisés varient entre 120 et 200 μm ¹⁰). Certains alliages des semi-conducteurs III-V (en

1 Wang, Jianwei, et al. "Multidimensional quantum entanglement with large-scale integrated optics." *Science* 360.6386 (2018): 285-291.

2 Weedbrook, Christian, et al. "Gaussian quantum information." *Reviews of Modern Physics* 84.2 (2012): 621.

3 Braunstein, Samuel L., et al. "Quantum information with continuous variables." *Reviews of modern physics* 77.2 (2005): 513.

4 Zhang, Zheshen, and Quntao Zhuang. "Distributed quantum sensing." *Quantum Science and Technology* (2020).

5 Kippenberg, Tobias J., et al. "Dissipative Kerr solitons in optical microresonators." *Science* 361.6402 (2018).

6 Dutt, Avik, et al. "On-chip optical squeezing." *Physical Review Applied* 3.4 (2015): 044005.

7 V. D. Vaidya, et al., "Broadband quadrature-squeezed vacuum and nonclassical photon number correlations from a nanophotonic device," *Science Advances* 6, eaba9186 (2020).

8 Y. Zhang, et al. «Squeezed light from a nanophotonic molecule », arXiv :2001.09474

9 Zhao, Yun, et al. "Near-degenerate quadrature-squeezed vacuum generation on a silicon-nitride chip." *Physical Review Letters* 124.19 (2020): 193601.

10 Vaidya, Varun D., et al. "Broadband quadrature-squeezed vacuum and nonclassical photon number correlations from a nanophotonic device." *Science advances* 6.39 (2020): eaba9186.

phase cristalline) permettent un confinement bien plus fort grâce à un indice de réfraction plus élevé. Par exemple la génération de peignes de fréquences (« combs ») a été démontrée dans des anneaux en AlGaAs d'environ 10 μm de rayon¹¹ avec des puissances de seuil de l'ordre de 40 μW [¹²], dans le domaine spectral télécom.

Afin d'être compatibles avec les systèmes quantiques opérant dans le domaine visible (essentiellement pour permettre l'interaction avec des atomes), ces sources paramétriques doivent utiliser des matériaux dont les pertes linéaires et non linéaires sont faibles dans ce domaine spectral. La famille des nitrures (GaN et AlN et leurs alliages) est parfaitement transparente dans le visible et les pertes non linéaires sont faibles car la bande interdite électronique est très large. D'autre part, le contraste d'indice est nettement supérieur à celui du SiN, ce qui permet un confinement important.

A titre d'exemple, une équipe à Yale a démontré une série de résultats impressionnants en interaction paramétrique à partir de résonateurs à fort Q (>500000) en AlN dans le visible [¹³, ¹⁴, ¹⁵]

Dans le cadre de cette thèse nous souhaitons exploiter un mécanisme pour le confinement de la lumière alternatif à la réflexion totale interne, à savoir la réflexion de Bragg dans les « cristaux photoniques ». De manière générale, les résonateurs sont beaucoup plus petits, ce qui favorise l'interaction non linéaire, mais ils offrent aussi un très large nombre de degrés de liberté pour faire de l'ingénierie du confinement.

Très récemment les équipes du C2N et de Thales ont démontré une nouvelle classe d'OPO miniatures basés sur une cavité à cristal photonique triplement résonante¹⁶. Cette démonstration repose sur l'utilisation d'un résonateur nanostructuré « bichromatique »¹⁷ dans lequel le potentiel de confinement des photons est rendu harmonique, permettant l'obtention d'un peigne de fréquences equi-espacées à fort facteur de qualité. Une accordabilité par effet thermique a été ici exploitée pour ajuster finement les fréquences de résonances afin de satisfaire la condition de conservation de l'énergie. La puissance nécessaire pour atteindre le seuil d'oscillation a été considérablement réduite grâce à un volume d'interaction très faible. Le matériau utilisé ici était le InGaP, un alliage transparent jusqu'à une longueur d'onde de 650 nm environ, qui n'est donc pas optimal pour répliquer ces résultats dans le domaine visible.

Description des objectifs :

Le but de la thèse est la démonstration d'une source paramétrique de photons ultra-miniaturisée et très efficace énergétiquement pour les technologies quantiques (senseur, calcul quantique, communication). Pour ce faire on s'appuiera sur le nouveau concept de résonateurs à cristaux photoniques à potentiel harmonique tels que développés en [16] qui permet de réduire plus encore

11 Pu, Minhao, et al. "Efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator." *Optica* 3.8 (2016): 823-826.

12 Chang, Lin, et al. "Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators." *Nature com.* 11.1 (2020): 1-8.

13 Jung, Hojoong, et al. "Green, red, and IR frequency comb line generation from single IR pump in AlN microring resonator." *Optica* 1.6 (2014): 396-399.

14 Bruch, Alexander W., et al. "On-chip χ (2) microring optical parametric oscillator." *Optica* 6.10 (2019): 1361-1366.

15 Liu, Xianwen, et al. "Ultra-high-Q UV microring resonators based on a single-crystalline AlN platform." *Optica* 5.10 (2018): 1279-1282.

16 G. Marty, S. Combrié, F. Raineri, A. de Rossi, "Photonic Crystal Optical Parametric Oscillator", *Nature Photonics*, 15.1 (2021): 53-58, <http://arxiv.org/abs/2011.13289>

17 Combrié, S., et al, *Laser & Photonics Reviews* 2017, 11, 1700099. <https://doi.org/10.1002/lpor.201700099>

le volume modal comparé aux résonateurs en anneau. Afin d'éviter les mécanismes d'absorption multi-photons dans la gamme proche infrarouge (NIR) et d'étendre le fonctionnement de la source au visible on s'appuiera sur des matériaux « grand gap » et plus particulièrement les matériaux nitrures (GaN, AlN, ...). Les équipes impliquées possèdent d'ailleurs déjà une grande expérience des matériaux grand gap et particulièrement des matériaux nitrures tels GaN¹⁸ et AlN¹⁹. Le matériau sera reporté sur un circuit en silicium ou en nitrure de Silicium (SiN) afin d'intégrer la source à d'autres fonctions et réaliser des fonctions plus complexes. Bien que l'écartement entre modes puisse être contrôlé par le dessin de la structure, un mécanisme d'accord est nécessaire afin de contrebalancer l'effet du désordre (imperfections) introduit durant la fabrication. Outre l'effet thermique on pourra exploiter les propriétés piezo-électriques des matériaux nitrures (GaN, AlN) pour générer une contrainte locale propre à accorder finement les résonances du résonateur afin de satisfaire la condition de conservation de l'énergie.

Description des tâches :

L'étudiant sera amené à effectuer des modélisations afin de concevoir la source de photon non classique. Il pourra ainsi, au travers du paramètre de commensurabilité des deux périodes du cristal photonique, modifier le nombre de résonances en jeu allant du système canonique à trois résonances à un comb présentant un nombre important de modes pour la génération d'états quantiques intriqués multi-photons²⁰.

L'étudiant réalisera ses structures dans les salles blanches du C2N. Divers étapes seront nécessaires telles que le report du matériau grand gap sur un circuit intégré photonique, des lithographies électroniques, des gravures chimiques ou plasma.

Enfin il procédera aux caractérisations des sources, principalement dans le centre de recherche de Thales situé non loin, d'abord dans un régime classique (facteurs de qualité, alignement des résonances, ...) et dans un deuxième temps dans le régime quantique (mesure de corrélations, ...).

Contacts :

alfredo.derossi@thalesgroup.com (Thales Research & Technology)

xavier.hecoury@c2n.upsaclay.fr (C2N – Centre de Nanosciences et Nanotechnologies)

sylvain.combrie@thalesgroup.com (Thales Research & Technology)

¹⁸ Roland, Iannis, et al. "Phase-matched second harmonic generation with on-chip GaN-on-Si microdisks." *Scientific reports* 6.1 (2016): 1-8.

¹⁹ Néel, Delphine, et al. "AlN photonic crystal nanocavities realized by epitaxial conformal growth on nanopatterned silicon substrate." *Applied Physics Letters* 98.26 (2011): 261106.

²⁰ Reimer, Christian, et al. "Generation of multiphoton entangled quantum states by means of integrated frequency combs." *Science* 351.6278 (2016): 1176-1180.