



# Design de microrésonateurs intégrés à base de phosphore de gallium pour la génération de peignes de fréquences dans le proche et moyen-infrarouge

Lise Morice, Christian Grillet, Alberto Della Torre, Jean-Pierre Landesman, Christelle Monat, Yoan Léger

## ► To cite this version:

Lise Morice, Christian Grillet, Alberto Della Torre, Jean-Pierre Landesman, Christelle Monat, et al.. Design de microrésonateurs intégrés à base de phosphore de gallium pour la génération de peignes de fréquences dans le proche et moyen-infrarouge. Journées Nationales de l'Optique guidée 2023, Jul 2023, Lyon, France. hal-04196110

**HAL Id: hal-04196110**

**<https://hal.science/hal-04196110v1>**

Submitted on 5 Sep 2023

**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.

# Design de microrésonateurs intégrés à base de phosphure de gallium pour la génération de peignes de fréquences dans le proche et moyen-infrarouge

Lise MORICE<sup>1</sup>, Christian GRILLET<sup>2</sup>, Alberto DELLA TORRE<sup>2</sup>, Jean-Pierre LANDESMAN<sup>1</sup>, Christelle MONAT<sup>2</sup>, Yoan LEGER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ Rennes, INSA, CNRS, Institut FOTON - UMR 6082, F-35000 Rennes, France

<sup>2</sup> Institut des nanotechnologies de Lyon, UMR CNRS 5270, Ecole Centrale Lyon, Ecully, France

[Lise.Morice@insa-rennes.fr](mailto:Lise.Morice@insa-rennes.fr)

## RESUME

Nous discutons ici de l'optimisation du design de microrésonateurs à base de GaP sur isolant pour générer des peignes de fréquences par effet Kerr optique. La modélisation numérique du système par éléments finis nous permet d'optimiser la dispersion du résonateur. Les résultats sont confrontés à l'état de l'art dans le proche IR et étendus au MIR.

**MOTS-CLEFS :** *peigne de fréquences, microrésonateurs à base de GaP, effet Kerr, dispersion.*

## 1. INTRODUCTION

La génération de peignes de fréquences associée à des lasers à impulsions ultra-courtes est un phénomène utilisé pour de nombreuses applications telles que la spectroscopie, la métrologie et la synchronisation temporelle. Mais depuis ces vingt dernières années, les progrès dans le domaine de l'intégration photonique ont permis la démonstration de peignes de fréquences générés par effet Kerr optique au sein de microrésonateurs sous pompage continu. [1] Les dispositifs photoniques permettant de générer ces peignes de Kerr, de petite taille, robustes et à faible consommation d'énergie ouvrent la voie à de nouvelles applications telles que le calibrage des spectrographes astronomiques, la transmission de l'information à très haut débit ou encore la spectroscopie moléculaire à haute résolution. Durant ces dernières années, la plateforme photonique basée sur le  $\text{Si}_3\text{N}_4$  s'est imposée comme filière d'excellence pour la génération de peignes Kerr aux longueurs d'onde télécom, malgré des propriétés matériaux modérées (contraste d'indice moyen, faible indice non-linéaire  $n_2$ ) principalement grâce à la démonstration de résonateurs en anneaux à fort Q ( $1.7 \times 10^7$ ) [2]. L'utilisation de nouvelles filières de matériaux telle que le phosphure de gallium pourrait permettre d'accroître considérablement l'efficacité de génération de peignes de fréquence et d'en étendre la plage spectrale tout en améliorant la compacité des dispositifs.

Dans cet article, nous discutons l'optimisation du design de microrésonateurs en anneaux à fort contraste d'indice, exploitant du Phosphure de Gallium (GaP) reporté sur isolant afin de générer des peignes de fréquences dans le proche et moyen infrarouge (NIR et MIR) par effet Kerr optique. Le GaP est un semiconducteur III-V possédant de nombreux avantages pour la photonique non-linéaire intégrée grâce à sa large bande de transparence (visible, NIR, MIR) repoussant le seuil d'absorption à deux photons en dessous de 1100nm, son indice de réfraction élevé ( $n_0 > 3$ ), son gap indirect, sa géométrie non-centrosymétrique qui entraîne une non-linéarité du deuxième ordre  $\chi^{(2)}$  ainsi qu'une importante non-linéarité du troisième ordre  $\chi^{(3)}$  ( $n_2 = 1.2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$  [3]). Pour renforcer l'efficacité de conversion entre les différents modes du résonateur, il est nécessaire de procéder à une ingénierie de dispersion. L'architecture du résonateur en anneau doit donc présenter une dispersion

anormale maximale à la fréquence de pompe. La méthode d'optimisation de nos structures est décrite ci-après.

## 2. THEORIE SUR LA DISPERSION

Lorsqu'un microrésonateur en anneau (voir Figure 1a) présentant une non-linéarité du 3<sup>ème</sup> ordre est pompé par un laser continu à la résonance  $\omega_0$ , l'effet Kerr permet la diffusion de photons à la fréquence de pompe vers les modes longitudinaux voisins, par mélange à quatre ondes (Four Wave Mixing, FWM) [4]. C'est cet effet répété en cascade qui produit le peigne de fréquences. A première vue, la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement dans ce processus semble nécessiter un intervalle spectral libre (ISL) constant. En réalité, le résonateur doit présenter une dispersion anormale afin de compenser le phénomène d'auto-modulation de phase lié également à l'effet Kerr et les effets thermo-optiques [5]. Bien que la dispersion du matériau soit normale, la modification de la géométrie du guide d'onde formant le résonateur en anneau permet l'ingénierie de l'indice effectif  $n_{eff}$  au sein du résonateur et l'inversion de courbure de la dispersion.

Au sein du résonateur en anneau, on note  $\beta$  la constante de propagation du mode confiné à la fréquence  $\omega$ , telle que [6] :

$$\beta = \beta_0 + \frac{n_g}{c}(\omega - \omega_0) + \frac{GVD}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1)$$

Où  $n_g = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = n_{eff} - \lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda}$  est l'indice de groupe et  $GVD = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{\partial^2 n_{eff}}{\partial \lambda^2}$  la dispersion de la vitesse de groupe.

L'indexation des modes longitudinaux du résonateur par l'indice  $\mu$ , relativement à la résonance de pompe ( $\mu = 0$ ) permet de définir les fréquences de résonance sous la forme du développement de Taylor autour de la fréquence de pompe :

$$\omega_\mu = \omega_0 + D_1\mu + \frac{D_2}{2}\mu^2 + \dots \quad (2)$$

Où  $\frac{D_1}{2\pi}$  représente l'ISL théorique du microrésonateur, c'est-à-dire l'intervalle entre deux fréquences consécutives sans prendre en compte la dispersion, tandis que  $\frac{D_2}{2\pi}$  correspond à la dispersion. Les termes d'ordres supérieurs ( $D_3, D_4, \dots$  sont négligés car  $D_3, D_4, \dots < D_2$ ). Le terme de dispersion est proportionnel à la GVD par la relation suivante :

$$D_2 = -\frac{c^3}{n_g^3 R^2} GVD \quad (3)$$

où  $R$  est le rayon du microrésonateur. La dispersion est dite normale lorsque  $D_2 < 0$  et anormale lorsque  $D_2 > 0$ . Dans la suite, nous recherchons donc les architectures d'anneaux présentant une valeur de  $D_2$  positive autour de la fréquence de pompe et maximale au niveau de cette dernière.

## 3. DESIGN DES MICRORESONATEURS

En premier lieu, nous optimisons le design de résonateurs de GaP sur silice pour une pompe aux longueurs d'onde télécom (1.55  $\mu\text{m}$ ) afin de comparer nos résultats à la littérature. Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé afin de calculer par la méthode des éléments finis (FEM) les indices effectifs des modes propres du résonateur en géométrie 2D axisymétrique à fréquence fixe. Le résonateur en anneau modélisé consiste en une membrane de GaP de 300 nm reportée sur  $\text{SiO}_2$ , structurée de manière à obtenir un anneau de 50  $\mu\text{m}$  de rayon (Figures 1a, 1b) dont nous optimiserons la largeur  $w$ . La Figure 1c montre le profil du mode  $TE_{00}$  au sein de l'anneau autour de 1.55  $\mu\text{m}$ , présentant un indice effectif  $n_{eff} = 2.14$ . La recherche des indices effectifs est étendue à un intervalle de longueurs d'onde allant de 0.8  $\mu\text{m}$  à 2.4  $\mu\text{m}$  pour plusieurs largeurs de guide  $w$ .

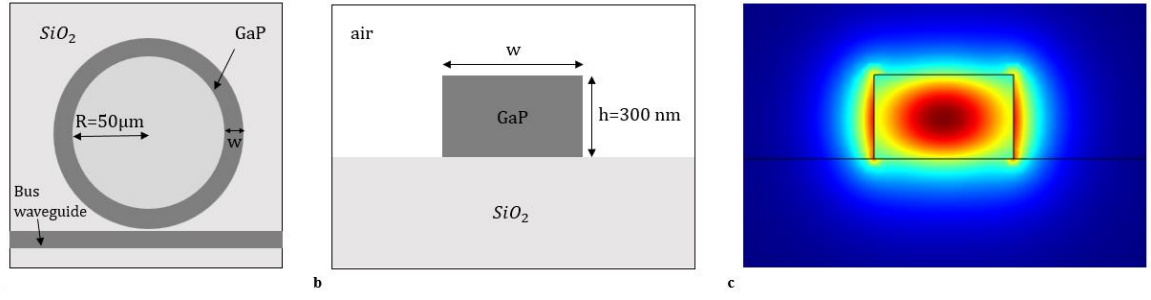


Figure 1: Schéma du résonateur en anneau à base de GaP : (a) vue de dessus (b) plan en coupe (c) Profil du mode  $TE_{00}$  ( $|E|^2$ ) au sein de l'anneau à  $1.55 \mu\text{m}$  obtenu par FEM.

Suite à une interpolation et un fit polynomial d'ordre 4 sur les valeurs  $n_{eff}(\lambda)$  afin de s'affranchir des artefacts de calcul liés à la discrétisation du problème, il est possible de déduire l'indice de groupe  $n_g$ , la dispersion de la vitesse de groupe GVD et le paramètre  $D_2$  du microrésonateur en fonction de la longueur d'onde (Figure 2).

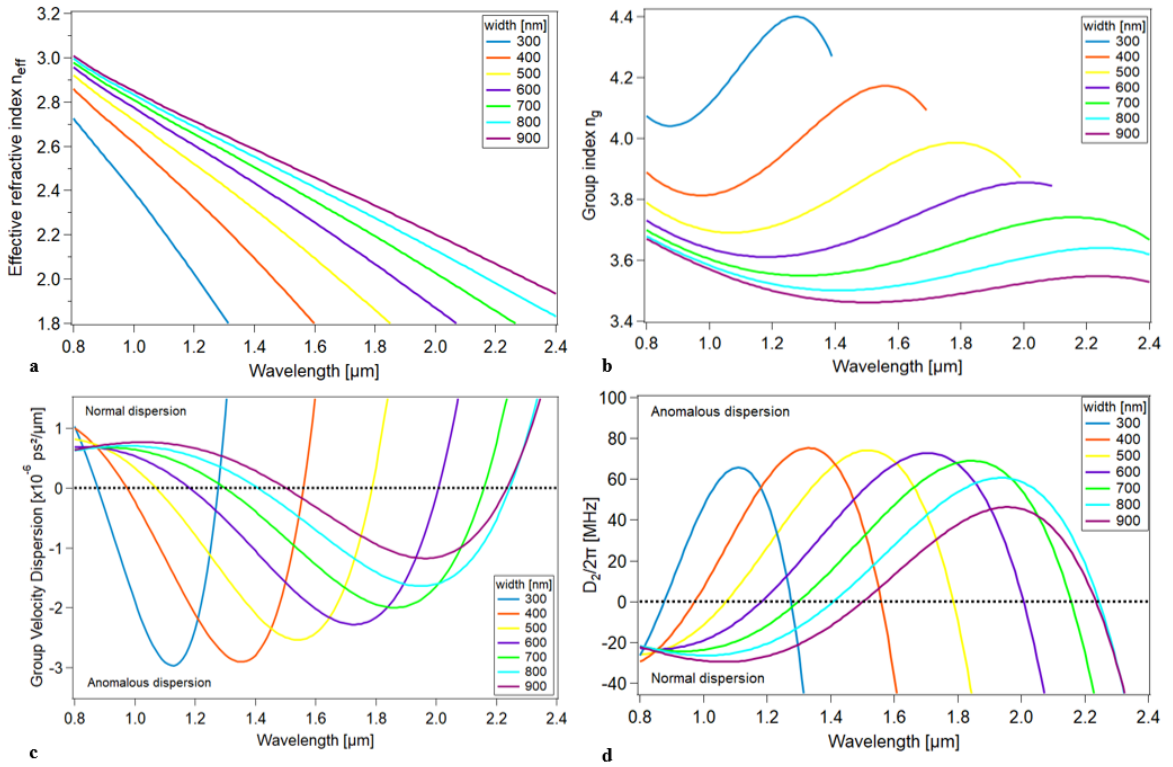


Figure 2: Simulation par éléments finis pour un microrésonateur en anneau de 300 nm de GaP sur  $\text{SiO}_2$  avec différentes largeurs de guide  $w$  pour le mode  $TE_{00}$ . (a) Indice de réfraction effectif  $n_{eff}$  en fonction de  $\lambda$ . (b) Indice de groupe  $n_g$  en fonction de  $\lambda$ . (c) GVD en fonction de  $\lambda$ . (d) Paramètre de dispersion en fonction de  $\lambda$ .

Ainsi, pour une longueur d'onde de  $1.55 \mu\text{m}$ , la dispersion anormale est maximale pour un résonateur en anneau avec une section de 300 nm de hauteur et 500 nm de largeur. Les courbes obtenues sont similaires à celles obtenues par Wilson et al. [3], validant notre approche numérique. De plus, ces dimensions permettent d'avoir un guide monomode avec un paramètre non-linéaire  $\gamma_{NL} = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}} = 3.8 \times 10^2 \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  trois ordres de grandeur au-dessus de ce qui est obtenu avec le  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $\gamma_{NL} = 0.6 \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  [2]). Ainsi, le design se prête à l'obtention de peignes de fréquences,

tant d'un point de vue de dispersion, que d'un point de vue de l'efficacité Kerr. Dans le MIR, nos résonateurs à base de GaP seront pompés par des laser à cascade interbande émettant à 2.5  $\mu\text{m}$  [7]. Le design des résonateurs doit donc être modifié en conséquence. Pour un anneau de même rayon que le précédent (50  $\mu\text{m}$ ), il est possible d'obtenir une importante dispersion anormale ( $D_2/2\pi = 175$  MHz) à la longueur d'onde de pompe pour une hauteur de 500 nm de GaP et une largeur de 800 nm. Ces résultats montrent que cette plateforme est bien adaptée à la réalisation de peignes de fréquences sur une large gamme spectrale.

## CONCLUSION

En conclusion, nous avons présenté des résultats numériques sur l'optimisation du design de résonateurs en anneau à base de GaP reporté sur isolant pour la génération de peignes dans le proche et moyen infrarouge. A présent, nos efforts se concentrent sur l'optimisation du couplage au guide d'accès et à la fabrication des structures.

Ce travail bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence "ANR-22-PEEL-0005".

## RÉFÉRENCES

- [1] P. Del'Haye, A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth, et T. J. Kippenberg, « Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator », *Nature*, vol. 450, n° 7173, p. 1214-1217, déc. 2007, doi: 10.1038/nature06401.
- [2] Y. Xuan *et al.*, « High-Q silicon nitride microresonators exhibiting low-power frequency comb initiation », *Optica*, vol. 3, n° 11, p. 1171, nov. 2016, doi: 10.1364/OPTICA.3.001171.
- [3] D. J. Wilson, K. Schneider, S. Hoenl, M. Anderson, T. J. Kippenberg, et P. Seidler, « Integrated gallium phosphide nonlinear photonics », *Nat. Photonics*, vol. 14, n° 1, p. 57-62, janv. 2020, doi: 10.1038/s41566-019-0537-9.
- [4] T. J. Kippenberg, R. Holzwarth, et S. A. Diddams, « Microresonator-Based Optical Frequency Combs », p. 6.
- [5] Y. K. Chembo et C. R. Menyuk, « Spatiotemporal Lugiato-Lefever formalism for Kerr-comb generation in whispering-gallery-mode resonators », *Phys. Rev. A*, vol. 87, n° 5, p. 053852, mai 2013, doi: 10.1103/PhysRevA.87.053852.
- [6] S. Fujii et T. Tanabe, « Dispersion engineering and measurement of whispering gallery mode microresonator for Kerr frequency comb generation », *Nanophotonics*, vol. 9, n° 5, p. 1087-1104, févr. 2020, doi: 10.1515/nanoph-2019-0497.
- [7] L. Cerutti *et al.*, « Quantum well interband semiconductor lasers highly tolerant to dislocations », *Optica*, vol. 8, n° 11, p. 1397-1402, nov. 2021, doi: 10.1364/OPTICA.438272.