



**HAL**  
open science

# Optimisation de coupleurs en poulie pour la génération de peignes de fréquences dans des micro-résonateurs de Nitrure de Silicium

Lise Morice, Baptiste Routier, Leopold Viro, Quentin Wilmart, Christelle Monat, Yoan Leger

## ► To cite this version:

Lise Morice, Baptiste Routier, Leopold Viro, Quentin Wilmart, Christelle Monat, et al.. Optimisation de coupleurs en poulie pour la génération de peignes de fréquences dans des micro-résonateurs de Nitrure de Silicium. Optique Normandie 2024, Jul 2024, Rouen, France. hal-04710255

**HAL Id: hal-04710255**

**<https://hal.science/hal-04710255v1>**

Submitted on 26 Sep 2024

**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.

# Optimisation de coupleurs en poulie pour la génération de peignes de fréquences dans des micro-résonateurs de Nitrure de Silicium

Lise MORICE <sup>1,2</sup>, Baptiste ROUTIER<sup>2,3</sup>, Leopold VIROT<sup>3</sup>, Quentin WILMART<sup>3</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, CNRS-UMR-5270, Ecole Centrale de Lyon, Ecully, France

<sup>3</sup>Univ. Grenoble Alpes, CEA, LETI, F38000 Grenoble, France

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

## RESUME

Les coupleurs en poulie entre un résonateur en anneau et un guide courbé sont généralement optimisés à une fréquence spécifique pour relâcher les contraintes de fabrication. Nous proposons ici une approche semi-analytique originale pour le design de ces coupleurs permettant d'assurer le couplage critique sur une plage spectrale étendue.

**MOTS-CLEFS :** *coupleur en poulie, couplage évanescent, Nitrure de Silicium*

## 1. INTRODUCTION

Les résonateurs en anneau sont des structures photoniques de premier choix pour générer des peignes de fréquences en raison de leurs faibles volumes de modes et de leurs facteurs de qualité élevés, permettant ainsi d'augmenter l'interaction lumière-matière. L'injection de lumière au sein de ces structures doit être réalisée par couplage évanescent. Il est courant de trouver dans la littérature le couplage de la lumière dans un résonateur à l'aide d'un guide d'accès droit [1]. Plus récemment d'autres schémas de couplages sont apparus tels que les géométries de coupleurs en poulie dont l'avantage principal vis-à-vis du coupleur droit est de préserver un couplage optimal à une longueur d'onde spécifique, en relâchant les contraintes de fabrication du dispositif, atout majeur pour les applications dans le visible ou l'UV [2]. Dans ce travail, nous présentons une approche semi-analytique originale pour l'optimisation de coupleurs en poulie, basée sur l'étude des supermodes de guides couplés, et démontrons que la géométrie d'un coupleur en poulie peut être optimisée afin d'élargir la bande passante du coupleur autour du couplage critique, sur plusieurs centaines de nm. Cette optimisation est réalisée sur un design de résonateurs en anneaux à base de Nitrure de Silicium (SiN<sub>x</sub>) conçus pour la génération de peignes de fréquences aux longueurs d'ondes télécoms.

## 2. THEORIE DES MODES COUPLES

La théorie des modes couplés (TMC) permet de modéliser le transfert de puissance photonique entre deux structures photoniques. Dans la littérature, deux approches de la TMC existent, l'une spatiale et l'autre temporelle [3] pour lesquelles un coefficient de couplage évanescent, généralement dénoté  $\kappa$ , peut-être calculé. Ces coefficients ne sont pas équivalents d'une méthode à l'autre. Dans le cas d'un coupleur en poulie où un guide d'accès interagit avec un anneau sur un arc  $2\theta_0$  le coefficient de couplage, déterminé par une approche temporelle, s'exprime de la manière suivante [4] :

$$\kappa_t = \frac{i\varepsilon_0\omega_0}{4\sqrt{P_{wg}}\sqrt{U_r}} \int_0^w \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \int_0^h (n^2 - n_{wg}^2) \vec{E}_{wg} e^{i(-m\theta + \beta_{wg}R_{wg}\theta)} \cdot \vec{E}_r^* dr R_r d\theta dz \quad (1)$$

avec  $\varepsilon_0$  la permittivité du vide,  $\omega_0$  la fréquence de résonance du résonateur,  $m$  le nombre azimutal du mode dans le résonateur,  $R_{wg}$  le rayon de courbure du guide d'accès,  $\vec{E}_{wg}$ ,  $P_{wg}$ ,  $\beta_{wg}$ ,  $n_{wg}$

respectivement le champ, la puissance, la constante de propagation, l'indice de réfraction du mode se propageant dans le guide d'accès,  $\vec{E}_r$ ,  $U_r$  le champ et l'énergie du mode se propageant dans le résonateur, et  $n$  l'indice de réfraction de la géométrie à deux guides. L'équation (1) peut être reformulée comme suit :

$$\kappa_t = i \kappa_S \sqrt{\frac{c}{2\pi R_r n_g}} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} e^{i(-m\theta + \beta_{wg} R_{wg} \theta)} R_r d\theta \quad (2)$$

où  $\kappa_S$  correspond au coefficient de couplage déterminé par l'approche spatiale de la TMC [5],  $R_r$  le rayon du résonateur et  $n_g$  l'indice de groupe du mode se propageant dans le résonateur. En résolvant l'intégrale, l'expression du coefficient de couplage devient :

$$\kappa_t = 2\theta_0 S(\lambda) \text{sinc} \left( [n_{eff,wg}(\lambda) R_{wg} - n_{eff,r}(\lambda) R_r] \frac{2\theta_0}{\lambda} \right) \quad (3)$$

avec le paramètre  $S(\lambda) = \kappa_S(\lambda) \sqrt{\frac{c R_r}{2\pi n_g}}$ ,  $n_{eff,wg}$  et  $n_{eff,r}$  respectivement les indices effectifs des modes dans le guide d'accès et le résonateur. A partir de ce coefficient de couplage, il est possible de calculer le facteur de qualité de couplage du dispositif tel que :

$$Q_c = \frac{2\pi c}{\lambda |\kappa_t(\lambda)|^2} \quad (4)$$

### 3. CALCULS DU COEFFICIENT DE COUPLAGE

Le calcul de ce coefficient de couplage  $\kappa_t$  est réalisé à l'aide de simulations numériques sur le logiciel COMSOL Multiphysics® par la méthode des éléments finis (FEM) en géométrie 2D axisymétrique. Cette méthode permet de déterminer les indices effectifs et les constantes de propagation des modes propres du résonateur et du guide d'accès, ainsi que ceux du système couplé à une longueur d'onde donnée. Ces derniers, appelés supermodes, sont représentés sur la Figure 1b,c.

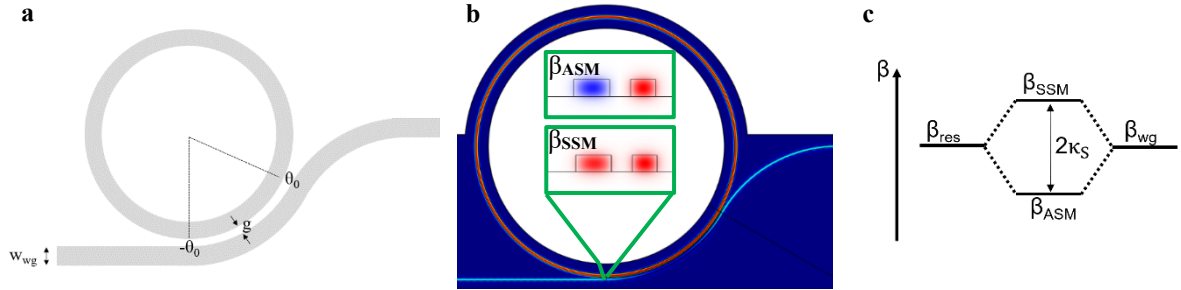


Figure 1: a) Schéma d'un coupleur en poulie. b) Simulation numérique de la puissance optique au sein d'un anneau avec coupleur en poulie proche d'une résonance réalisée par FEM 2D planaire en régime stationnaire. Les inserts montrent au contraire les profils des supermodes symétrique et antisymétrique à  $1.55\mu\text{m}$  obtenus par FEM 2D axisymétrique. c) Représentation de la séparation des constantes de propagation des supermodes. Cette séparation est liée au coefficient de couplage  $\kappa_S$ .

### 4. OPTIMISATION DU DESIGN DE COUPLEURS EN POULIE

Nous cherchons ici à maximiser la plage spectrale sur laquelle la condition de couplage critique est atteinte, c'est-à-dire quand le facteur de qualité de couplage  $Q_c$  est égal au facteur de qualité intrinsèque du résonateur  $Q_0$ . Pour cela, il est possible de jouer avec trois paramètres : l'écart  $g$  entre l'anneau et le guide, la largeur du guide d'accès  $w_{wg}$  et l'angle  $2\theta_0$  comme le montre la Figure 1a. Dans l'équation (3), le terme  $S(\lambda)$  s'apparente à une intégrale de recouvrement. Comme l'illustre la Figure 2a, à mesure que la longueur d'onde augmente, la queue évanescence des modes s'étale entraînant ainsi une augmentation du paramètre  $S(\lambda)$ . Pour avoir un facteur de qualité de couplage constant cette augmentation doit être compensée par une contribution décroissante du sinus cardinal (Eq. (3)) comme le montre la Figure 2b. Pour faire correspondre au mieux les deux pentes, il

nécessaire de jouer sur la largeur du guide d'accès et l'angle d'interaction. En effet, ceux-ci permettent d'ajuster les positions spectrales du maximum du sinus cardinal et du premier zéro et donc la pente de cette contribution dans le domaine spectral d'intérêt. L'écart  $g$  entre le guide et l'anneau est choisi de manière à limiter les problèmes technologiques ( $g > 500\text{nm}$ ).

A titre d'illustration, les calculs des Figures 2 sont réalisés pour des anneaux de  $\text{SiN}_x$  encapsulés dans du  $\text{SiO}_2$  [6]. Les facteurs de qualités intrinsèques de ces résonateurs statistiquement situés autour de  $9 \cdot 10^6$ , sont représentés par la région grisée de la Figure 2c. Comme le montre cette même figure, il est possible d'augmenter par trois la bande passante à couplage critique par l'utilisation d'un coupleur en poulie en comparaison des performances d'un coupleur droit.

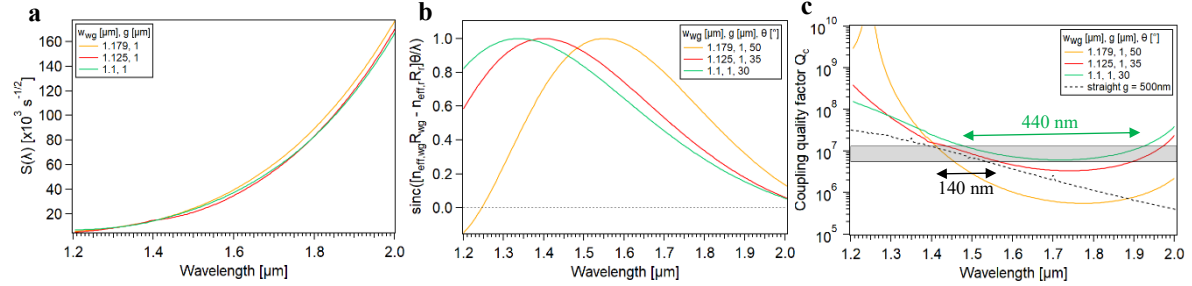


Figure 2: Les différents termes du coefficient de couplage et le facteur de qualité de couplage en fonction de la longueur d'onde pour différents designs de coupleurs en poulie pour des anneaux de  $\text{SiN}$ .

## CONCLUSION

En conclusion, nous avons présenté une méthode semi-analytique originale basée sur l'étude des supermodes de guides couplés, permettant l'optimisation de la géométrie d'un coupleur en poulie. Nous montrons ainsi que la condition de couplage critique peut être étendue sur plusieurs centaines de nm grâce à ce type de coupleurs, laissant envisager une génération de peignes de fréquence optimisée aux longueurs d'onde télécom.

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" et est soutenu par le réseau français Renatech.

## RÉFÉRENCES

- [1] 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.
- [2] X. Lu *et al.*, « Efficient telecom-to-visible spectral translation through ultralow power nonlinear nanophotonics », *Nat. Photonics*, vol. 13, n° 9, p. 593-601, sept. 2019, doi: 10.1038/s41566-019-0464-9.
- [3] W.-P. Huang, « Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview », *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, n° 3, p. 963, mars 1994, doi: 10.1364/JOSAA.11.000963.
- [4] E. Shah Hosseini, S. Yegnanarayanan, A. H. Atabaki, M. Soltani, et A. Adibi, « Systematic design and fabrication of high-Q single-mode pulley-coupled planar silicon nitride microdisk resonators at visible wavelengths », *Opt. Express*, vol. 18, n° 3, p. 2127, févr. 2010, doi: 10.1364/OE.18.002127.
- [5] J. Heebner, *Optical Microresonators*, vol. 138. in Optical Sciences, vol. 138. New York, NY: Springer New York, 2008. doi: 10.1007/978-0-387-73068-4.
- [6] H. El Dirani *et al.*, « Annealing-free  $\text{Si}_3\text{N}_4$  frequency combs for monolithic integration with Si photonics », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 113, n° 8, p. 081102, août 2018, doi: 10.1063/1.5038795.

