HAL open science

Mini resonateurs Fabry-Pérot fibrés à très haute finesse

Safia Mohand Ousaid, Germain Bourcier, Julien Roul, Julien Lumeau, Antonin Moreau, Stéphane Balac, Olivier Llopis, Arnaud Fernandez

To cite this version:

Safia Mohand Ousaid, Germain Bourcier, Julien Roul, Julien Lumeau, Antonin Moreau, et al.. Mini resonateurs Fabry-Pérot fibrés à très haute finesse. Optique Normandie 2024, Jul 2024, Rouen, France. hal-04687201

HAL Id: hal-04687201

https://laas.hal.science/hal-04687201v1

Submitted on 4 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.

Mini resonateurs Fabry-Pérot fibrés à très haute finesse

Safia MOHAND OUSAID[1], Germain BOURCIER[1,2], Julien ROUL[1], Julien LUMEAU[3], Antonin MOREAU[3], Stéphane BALAC[4], Olivier LLOPIS[1], Arnaud FERNANDEZ[1]

[1]*LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France*

[2]*CNES, 18 avenue Edouard Belin, F-31401 Toulouse, France*

[3]*Université Aix Marseille, CNRS, Centrale Med, Institut Fresnel, Marseille, France*

[4]*IRMAR, Université de Rennes, CNRS, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes, France*

safia.mohandousaid@laas.fr

RESUME

Cette étude explore l'optimisation des mini-résonateurs Fabry-Pérot fibrés en fonction de la réflectivité des miroirs et de l'aire effective des fibres. Un facteur de qualité de 5×10^9 a été mesuré, correspondant à une finesse intrinsèque de l'ordre de 10^5.

MOTS-CLEFS : *Résonateur Fabry-Pérot fibré, Facteur de qualité, Finesse.*

1. INTRODUCTION

Les résonateurs optiques à facteur de qualité (Q) et finesse (F) élevés sont d'une importance cruciale dans divers domaines allant des références de fréquence optiques aux capteurs quantiques et aux biosenseurs. Plusieurs technologies de résonateurs ont été développées pour répondre à ces exigences : les résonateurs Fabry-Pérot (FP) à expansion ultra-faible (ULE), les résonateurs à mode de galerie (WGM), les résonateurs en anneau intégrés et les cavités en anneau fibrés, atteignant une valeur de facteur qualité Q de 10^{10} et une de finesse de 10^6. Chacune de ces technologies présente ses propres limitations allant de la complexité de fabrication et de couplage à la sensibilité aux perturbations thermiques et mécaniques. Les mini-résonateurs Fabry-Pérot fibrés (FPF) sont constitués de quelques centimètres de fibre optique délimités par deux connecteurs standard FC/PC, aux extrémités desquels sont déposés des miroirs diélectriques identiques de quelques microns d'épaisseur. Ils émergent comme une alternative prometteuse, comblant le fossé entre les cavités en anneau fibrés ayant un Q et F élevés et les résonateurs intégrés compacts et miniatures. Ces dispositifs combinent les avantages des deux technologies, offrant ainsi flexibilité, simplicité de fabrication, reproductibilité, robustesse et facilité de couplage.

Dans cette étude, nous explorons les mini-résonateurs FPF en examinant différents types de fibres et de miroirs afin d'atteindre des performances optimales. Les résultats obtenus révèlent un facteur de qualité intrinsèque à l'état de l'art, avec $Q_{int} > 10^{10}$, et une finesse intrinsèque remarquable de $F_{int}=10^5$.

2. DESCRIPTION ET CARACTERISATION DE MINI-RESONATEURS FPF

Pour cette étude, nous avons fabriqué et caractérisé six séries de dix résonateurs de 7 centimètres de long, composés de fibres monomodes et multimodes. Les deux premières séries sont constitués de fibres monomodes avec des aires effectives de 12 µm² et 72 µm² et des miroirs de 99.86% de réflectivité. Les quatre séries restantes sont basées sur une fibre multimode d'aire effective de 320 µm² avec des réflectivités de 99.86%, 99.93%, 99.96% et 99.99%. La caractérisation des résonateurs est réalisée par la technique Spectro RF [1], mesurant l'amplitude et la phase du signal transmis. Ces mesures permettent de déterminer le facteur de qualité et la finesse des résonateurs. La largeur à mi-hauteur du signal transmis $(\delta f_{1/2})$ et la transmission maximale (T_{max}) sont extraites en utilisant le modèle général de Yariv [2] appliqué aux résonateurs Fabry-Pérot à miroirs identiques tel que :

$$\delta f_{1/2} = \frac{v_g}{\pi L} arcos\left(\frac{2ar}{(1+(ar)^2)}\right) \qquad (1)$$

$$T_{max} = \frac{a.(1-r)^2}{(1-ar)^2} \qquad (2)$$

Où a représente les pertes intra cavité avec $a \in [0,1]$, $r = \rho^2$ est la réflectivité des miroirs $r \in [0,1]$, ρ est le coefficient de la réflexion du miroir, $v_g = c/n_g$ est la vitesse de groupe, c est la vitesse de la lumière dans le vide, n_g est l'indice de groupe et L la longueur totale de la cavité (aller-retour). La résolution du système d'équations (1) et (2) permet de découpler et de définir a et r. Le facteur de qualité intrinsèque (Q_{int}) est obtenu en fixant la réflectivité r =1.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Etude en fonction de l'aire effective

Nous avons d'abord étudié l'impact de l'aire effective de la fibre sur les performances des résonateurs. Pour cela, nous avons caractérisé les trois séries ayant une même réflectivité de 99.86 % et des aires effectives de 12 µm², 72 µm² et 320 µm². Les valeurs moyennes mesurées de Q et F pour les différentes aires effectives sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tab. 1 : Valeurs moyennes de Q et F pour les différentes aires effectives des résonateurs

Aire effective (µm²)	12	72	320
Facteur de qualité (Q)	9.3×10^7	1.08×10^8	2.4×10^8
Finesse (F)	673	797	1780

Nous constatons une augmentation de Q et F avec l'augmentation de l'aire effective des résonateurs corroborant les observations de Nie et al. [3] sur des fibres multimodes soulignant la présence de pertes liées à la diffraction du faisceau dans l'épaisseur du miroir multicouches qui deviennent significatives pour de faibles surfaces modales. Ces pertes sont considérablement réduites en utilisant des fibres multimodes avec une surface modale plus grande [4]. Malgré l'amélioration de nos techniques de fabrication, des imperfections subsistent. La caractérisation de surface des facettes par interférométrie a révélé une rugosité moyenne de 2 nm et une excentricité de fibre d'environ 20 µm. Ces irrégularités de surface et les légères imperfections de forme des miroirs contribuent aux pertes par diffusion et à une réduction du recouvrement entre le champ lumineux réfléchi et l'aire effective de la fibre dans laquelle il est couplé. Dans les fibres à large cœur le recouvrement est plus significatif et l'alignement devient moins critiques. Nos mesures indiquent que les pertes dans les résonateurs à fibre monomode (SMF) sont d'environ 10^{-2} dB et 10^{-3} dB dans les multimodes.

Etude en fonction de la réflectivité

Pour approfondir l'étude des résonateurs d'une large aire effective (320 µm²). Nous avons caractérisé le mode fondamental de résonateurs ayant des miroirs présentant des réflectivités de 99.86 %, 99.93 %, 99.96 % et 99.99 %. Les valeurs moyennes de Q et F mesurées sont données dans le tableau ci-dessous.

Tab. 2 : Valeurs moyennes de Q et F pour les différentes réflectivités des miroirs

Réflectivité (%)	99.86	99.93	99.96	99.99
Facteur de qualité (Q)	2.4×10^8	5.3×10^8	1.1×10^9	3.9×10^9
Finesse (F)	1780	4000	8600	29400

Nous constatons une augmentation de Q et F avec l'augmentation de la réflectivité des miroirs, mettant en évidence l'impact significatif de la réflectivité sur les performances des résonateurs multimodes. La figure 1(a) représente la fonction de transfert mesurée en module et en phase de la meilleure performance en termes de Q obtenue avec un résonateur multimode d'une réflectivité de 99,99 %. Le facteur Q mesuré atteint 5×10^9. Les Figures 1(b) et 1(c) représentent respectivement la variation des valeurs moyennes du Q_{int} et F_{int} calculées en fonction de la réflectivité des miroirs. Les barres d'incertitudes correspondent à l'impact d'une erreur de ±0.2 dB sur T_{max} mesurée.

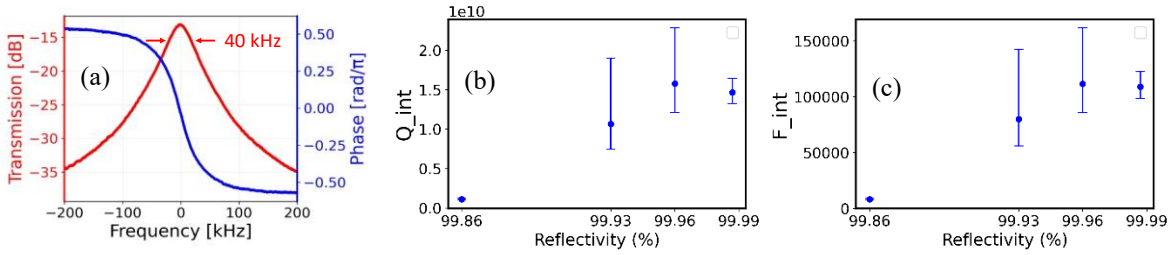

Figure 1 : (a) Mesures de résonateur par spectroscopie RF en transmission, amplitude (en rouge) et phase (en bleu). Valeurs intrinsèques calculées en fonction des réflectivités (b) facteur de qualité (c) finesse.

Pour des réflectivités de 99,86 %, 99,93 %, 99,96 % et 99,99 %, les valeurs minimales de Q_{int} et F_{int} sont respectivement de ($Q_{int}=10^9$, $F_{int}=7650$), ($Q_{int}=7.5\times10^9$, $F_{int}=50600$), ($Q_{int}=1.2\times10^{10}$, $F_{int}=85700$) et ($Q_{int}=1.3\times10^{10}$, $F_{int}=100000$).
Cette étude nous a également permis d'évaluer la capacité de stockage d'énergie ainsi que le régime du couplage dans les différents résonateurs. Les valeurs moyennes du facteur d'amplification de puissance (PEF), défini comme le rapport entre la puissance intra cavité et la puissance incidente, dans les résonateurs multimodes sont de 26 dB, 30 dB, 34 dB et 36 dB pour des réflectivités de 99,86 %, 99,93 %, 99,96 % et 99,99 %, respectivement. Pour les résonateurs monomodes, en moyenne, le PEF est de 15 dB. Le régime de coulage optimal d'un résonateur est caractérisé par une valeur de T_{max} = -6 dB. En moyenne, pour les résonateurs monomodes, le T_{max} mesuré est de -15 dB, indiquant de fortes pertes et un sous-couplage. En revanche, pour les résonateurs multimodes avec des réflectivités de 99,86 %, 99,93 % et 99,96 %, T_{max} moyen est de -3 dB, démontrant un sur-couplage. Pour ceux avec une réflectivité de 99,99 %, le T_{max} est de -5,5 dB, se rapprochant de la valeur optimale.

CONCLUSION

Nous avons mené une étude exploratoire visant à évaluer les performances et identifier les limitations de résonateurs Fabry-Pérot fibrés. Nos résultats mettent en évidence l'impact important de l'aire effective de la fibre sur les performances de ces résonateurs notamment par la présence de pertes par diffraction. L'optimisation de la réflectivité des miroirs est également nécessaire pour maitriser le régime de couplage et parvenir à des performances en Q et pertes adaptées aux applications. Dans les conditions quasi optimales de couplage, nous avons mesuré un très haut facteur de qualité optique de 5×10^9, correspondant à une finesse intrinsèque de 10^5, offrant des perspectives significatives pour leur utilisation dans diverses applications tels que la stabilisation de lasers, les oscillateurs électro-optiques où la génération de peignes de fréquences.

REFERENCES

[1] Z. Abdallah, Y. Boucher, A. Fernandez, et al, "Radio frequency spectral characterization and model parameters extraction of high Q optical resonators," *Sci Rep, vol.* 6, pp. 27208, 2016.

[2] Yariv, A, ''Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides,''vElectronics Letters, vol. 36, pp. 321, 2000.

[3] M. Nie, K. Jia, Y. Xie et al, "Synthesized spatiotemporal mode-locking and photonic flywheel in multimode mesoresonators," Nat. Com. Vol.13, pp. 6395, 2022.

[4] K. Jia, X. Wang, D. Kwon, et al. , "Photonic flywheel in a monolithic fiber resonator," *Phys. Rev. Lett, vol.* 125, pp.143902, 2020.