



**HAL**  
open science

# RESONATEURS OPTIQUES A TRES FORTS FACTEURS DE QUALITE POUR LES OSCILLATEURS HYPERFREQUENCES TRES PURS SPECTRALEMENT

Pierre-Henri Merrer, Aude Bouchier, Olivier Llopis, Gilles Cibiel

► **To cite this version:**

Pierre-Henri Merrer, Aude Bouchier, Olivier Llopis, Gilles Cibiel. RESONATEURS OPTIQUES A TRES FORTS FACTEURS DE QUALITE POUR LES OSCILLATEURS HYPERFREQUENCES TRES PURS SPECTRALEMENT. Optique Lille 2009, Jul 2009, Lille, France. 3p. hal-00397950

**HAL Id: hal-00397950**

**<https://hal.science/hal-00397950>**

Submitted on 23 Jun 2009

**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.

# RESONATEURS OPTIQUES A TRES FORTS FACTEURS DE QUALITE POUR LES OSCILLATEURS HYPERFREQUENCES TRES PURS SPECTRALEMENT

Pierre-Henri Merrer<sup>1,2</sup>, Aude Bouchier<sup>1,2</sup>, Olivier Llopis<sup>1,2</sup>, Gilles Cibiel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CNRS ; LAAS ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

<sup>2</sup> Université de Toulouse ; UPS, INSA, INP, ISAE ; LAAS ; F-31077 Toulouse, France

<sup>3</sup> CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31410 Toulouse Cedex 4

bouchier@laas.fr

## RESUME

Le facteur de qualité des résonateurs hyperfréquences est actuellement limité. Une solution consiste à transporter les hyperfréquences sur une onde optique, et à effectuer le filtrage ou la référence de fréquence dans le domaine optique. Des résonateurs optiques fibrés ou à modes de galerie permettent d'atteindre des facteurs de qualité supérieurs à  $10^9$ , donnant ainsi accès à des facteurs de qualité équivalents supérieurs à  $10^5$  pour le filtrage d'une modulation RF au voisinage de 20 GHz. Nous présentons donc une étude de différents résonateurs optiques destinés à la stabilisation d'oscillateurs hyperfréquences, ainsi que leur application à la réalisation d'un oscillateur opto-micro-onde à cette fréquence.

**MOTS-CLEFS :** *Résonateurs optiques; optique-micro-onde ; oscillateur micro-onde ; bruit de phase.*

## 1. INTRODUCTION

L'amélioration des sources et filtres micro-ondes nécessite de nouveaux résonateurs alliant très fort facteur de qualité (Q) et volume réduit. L'obtention de tels résonateurs est difficile, et les meilleures performances autour de 10 GHz sont atteintes par les résonateurs saphir à modes de galerie (Q à vide  $\sim 10^5$ ). Ce facteur Q décroît en plus quand la fréquence micro-onde augmente.

Transporter l'onde hyperfréquence sur une porteuse optique pour la piéger dans un résonateur optique peut permettre de diminuer la taille des résonateurs. Le résonateur optique génère alors un peigne de modes de résonance distants d'un sous-multiple de la fréquence micro-onde à stabiliser. Chaque mode présente un facteur de qualité optique  $Q_{opt}$  et un facteur de qualité équivalent en hyperfréquence  $Q_{rf}$ . Le facteur  $Q_{rf}$  étant le produit de  $Q_{opt}$  et du rapport entre les fréquences micro-onde et optique,  $Q_{rf}$  augmente proportionnellement avec la fréquence micro-onde. Cette technique est une alternative à l'approche utilisant une ligne à retard optique, mais nécessite de très forts  $Q_{opt}$ . Les lignes, faciles à mettre en œuvre et aujourd'hui très bien connues, sont des fibres optiques de quelques kilomètres de long. Permettant d'atteindre des  $Q_{rf}$  de l'ordre de  $10^6$  à 10 GHz, elles ont été utilisées pour la stabilisation d'oscillateurs [1], mais restent peu compactes et difficiles à stabiliser en température.

Nous présenterons ici des minis résonateurs optiques [2,3], tels que des sphères ou disques de quartz, silice, etc... qui utilisent des modes de galerie. Ils présentent de forts  $Q_{opt}$  (de  $10^8$  à  $10^{10}$  à  $1,55 \mu\text{m}$  ou  $\sim 200 \text{ THz}$ ), mais restent délicats dans leur mise en œuvre. Une dernière approche, que nous détaillerons également, consiste à utiliser un anneau résonant en fibre optique.

## 2. ETUDE DE DIFFERENTS RESONATEURS OPTIQUES

**Résonateurs à modes de galerie :** Nous avons étudié une sphère de silice de 3,3 mm de diamètre et un disque en quartz de 7,7 mm de diamètre. Les modes de galerie de ces résonateurs de faible volume sont excités par la porteuse optique. Ce laser, aussi utilisé pour la caractérisation des résonateurs, est un laser à fibre dopée erbium amplifié de très faible largeur de raie ( $\sim 1 \text{ kHz}$  à  $120 \mu\text{s}$ ). Il est couplé dans ces résonateurs via les ondes évanescentes issues d'une fibre étirée sur

une longueur de quelques millimètres avec un diamètre d'environ  $2\ \mu\text{m}$  (fig.1) [4]. Le laser étant accordable en fréquence, l'intervalle spectral libre (ISL) et la largeur des modes résonants ont été déterminés par une méthode dite de "scan" [4], donnant accès au  $Q_{\text{opt}}$  des résonateurs, avec pour la sphère de silice, un facteur de  $10^8$  après réalisation et de  $10^6$  au bout de deux ans de stockage sans précautions particulières, et pour le disque de quartz, de  $4 \cdot 10^9$  à  $1,55\ \mu\text{m}$ .

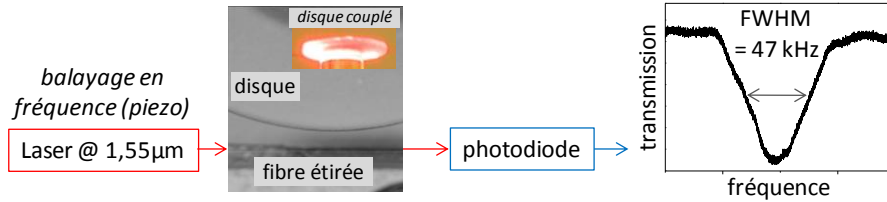


Fig. 1 : Caractérisation en "scan" direct des résonateurs à modes de galerie.

Le caractère multimode transverse de ces résonateurs rend difficile la stabilisation du laser sur une fréquence de résonance, et le couplage du laser dans ces résonateurs est très délicat. Malgré leurs très forts facteurs de qualité, il est intéressant d'envisager une alternative.

**Anneaux de fibre résonants :** Les anneaux de fibres résonants sont composés de deux fibres reliées par deux coupleurs fibrés. Le couplage d'un laser fibré est direct dans ces résonateurs, et permet d'intégrer le système. D'autre part, les fibres monomodes transverses permettent de travailler avec un peigne de fréquence unique. Nous avons utilisé des coupleurs 99/1 % pour une longueur totale des anneaux de 1 à 20 m [5].

Le dispositif expérimental est schématisé en figure 2 (a). A cause de leurs très forts facteurs de qualité, ces résonateurs sont très sensibles aux variations de température liées à leur environnement et surtout à l'injection du laser qui décale la fréquence de résonance. Il est donc nécessaire de stabiliser le laser sur le résonateur, et nous utilisons une boucle de Pound-Drever-Hall (PDH) [6]. La porteuse est ensuite modulée en hyperfréquence via un modulateur de Mach-Zehnder (MZM). Un analyseur de réseaux hyperfréquences permet de varier la fréquence du MZM et d'explorer les modes latéraux. Le  $Q_{\text{opt}}$  ainsi mesuré est de  $3 \cdot 10^9$  pour un anneau de 20 m. Ramenée en gamme micro-onde, cette performance conduit à un facteur de qualité de  $3 \cdot 10^5$  à 20 GHz, largement supérieur à ce qui peut être obtenu à cette fréquence avec des techniques entièrement micro-ondes.

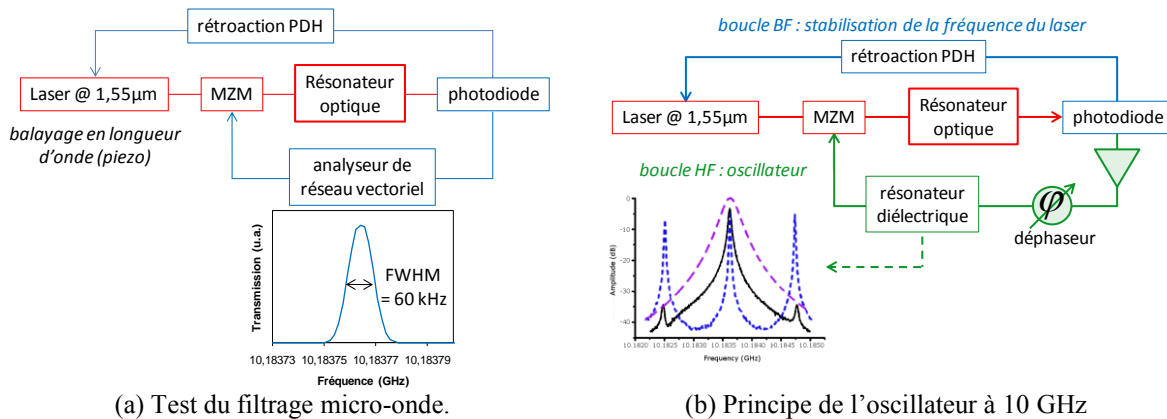


Fig. 2 : Dispositifs d'utilisation du résonateur optique.

### 3. OSCILLATEUR OPTO-MICRO-ONDE A BASE D'ANNEAU DE FIBRE RESONANT

Une fois le laser stabilisé (fig. 2(a)), il est possible de réaliser un oscillateur optoélectronique (OEO) (fig 2(b)). Le résonateur diélectrique sélectionne une fréquence de résonance, proche de 10 GHz, issue du peigne de fréquences optiques (fig. 2(b)). Le spectre de l'OEO ainsi que son bruit de phase sont mesurés par un analyseur de signal Agilent E5052. Nous avons pu observer une composante de bruit importante qui rendait moins intéressante la performance en facteur de qualité

du résonateur. Un nouveau résonateur a donc été conçu, résolvant ce problème (brevet en cours de dépôt) malgré un facteur de qualité optique plus faible ( $\sim 2 \cdot 10^8$ ). Les performances de cet oscillateur sont présentées en figure 3. Plusieurs zones sont visibles sur le spectre de bruit de phase [7]. Il est dominé par le bruit de fréquence en  $1/f$ , causé par une modulation basse fréquence et caractérisé par une pente de  $-30$  dB/dec, entre  $10$  et  $10^3$  Hz. Une pente de  $-20$  dB/dec caractérise le bruit blanc de fréquence, entre  $1$  et  $400$  kHz, lié au rapport signal à bruit hyperfréquence dans la boucle d'oscillation. Le plancher de bruit de phase, de l'ordre de  $-120$  dBc/Hz, apparaît au-delà de  $0,4$  MHz. La chute finale du bruit est liée au filtrage dû au résonateur diélectrique.

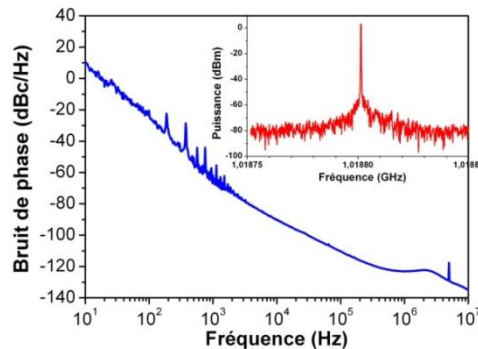


Fig. 3 : Spectre et bruit de phase de l'oscillateur OEO à 10 GHz.

La séparation entre le bruit blanc de fréquence et le bruit blanc de phase correspond au terme  $f_{rf}/(2 \cdot Q_{rf})$  où  $f_{rf}$  est la fréquence de l'onde hyperfréquence. Le coefficient de qualité en charge ainsi calculé est de  $1,2 \cdot 10^4$  à 10 GHz. Le niveau de bruit relativement élevé de cet oscillateur (compte tenu de son fort facteur de qualité) est en partie lié aux pertes en transmission dans le dispositif optique. Nous travaillons actuellement à optimiser le système pour améliorer ce paramètre.

## CONCLUSION

Les résonateurs optiques donnent accès à des facteurs de qualité élevés dans le domaine des hyperfréquences. Les résonateurs à mode de galerie devraient permettre la réalisation d'oscillateurs compacts si des solutions sont trouvées pour un couplage intégré (ou semi-intégré) de ces dispositifs. Les résonateurs fibrés sont quant à eux plus faciles à mettre en œuvre. L'oscillateur EO utilisant un tel résonateur et présenté dans cette communication est, à notre connaissance, le premier dispositif de ce type à faire l'objet d'une publication. Ses performances en bruit de phase sont encore modestes et de l'ordre de celles d'un DRO. Néanmoins, ses potentialités en termes de facteur Q sont très encourageantes et le développement en cours d'un nouvel anneau fibré devrait nous permettre d'améliorer largement ses performances.

## REFERENCES

- [1] X.S. Yao and L. Maleki, « Progress in the optoelectronic oscillator - a ten year anniversary review », *2004 IEEE Microwave Theory and Tech. Symp. Digest*, pp. 287-290.
- [2] M.L. Gorodetsky, A.A. Savchenkov and S.V. Ilchenko, « Ultimate Q of optical microsphere resonator », *Opt. Letters*, vol.21 (7), pp. 453-5, 1996.
- [3] V.S. Ilchenko, J. Byrd, A.A. Savchenkov, A.B. Matsko, D. Seidel and L. Maleki, « Miniature oscillators based on optical whispering gallery mode resonators », *Frequency Control Symposium, 2008 IEEE International*, pp.305-308, 19-21 May 2008.
- [4] P.H. Merrer, O. Llopis and G. Cibiel, « Laser stabilization on a fiber ring resonator and application to RF filtering », *IEEE Photon. Tech. Letters*, vol.20 (16), pp. 1399-1401, 2008.
- [5] P.H. Merrer, O. Llopis, S. Bonnefont, P. Feron and G. Cibiel, « Microwave filtering using high Q optical resonators », *Proc. of the European Microwave Conf.*, Amsterdam 2008.
- [6] R. V. Pound, « Electronic frequency stabilization of microwave oscillators », *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 17 (11), pp. 490-505, 1946.
- [7] D.B. Leeson, « A simple model of feedback oscillator noise spectrum », *Proc. of the IEEE*, vol. 54, no. 2, pp. 329-330, Fev. 1966.