



**HAL**  
open science

# Résonateurs optiques à très forts facteurs de qualité pour la stabilisation d'oscillateurs hyperfréquences à très haute pureté spectrale

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

► **To cite this version:**

Pierre-Henri Merrer, Aude Bouchier, Olivier Llopis, Gilles Cibiel. Résonateurs optiques à très forts facteurs de qualité pour la stabilisation d'oscillateurs hyperfréquences à très haute pureté spectrale. Journées Nationales Microondes, May 2009, Grenoble, France. pp.4. hal-00379736

**HAL Id: hal-00379736**

**<https://hal.science/hal-00379736v1>**

Submitted on 29 Apr 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.

## Résonateurs optiques à très forts facteurs de qualité pour la stabilisation d'oscillateurs hyperfréquences à très haute pureté spectrale

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

### Résumé

Les performances des résonateurs hyperfréquences en termes de facteurs de qualité sont actuellement limitées. Une solution consiste à transporter les hyperfréquences sur un support différent, en l'occurrence une onde optique. Les résonateurs optiques deviennent alors des objets très intéressants pour l'élaboration de nouveaux résonateurs hyperfréquences plus performants. Des facteurs de qualité optiques supérieurs à  $10^9$  peuvent être atteints avec des résonateurs fibrés ou à modes de galerie, par exemple, donnant ainsi accès à des facteurs de qualité supérieurs à  $10^5$  à 20 GHz. Nous présentons donc notre étude de différents résonateurs optiques (résonateurs à modes de galerie et boucles de fibre) destinés à la stabilisation d'oscillateurs hyperfréquences autour de 10 GHz, ainsi que leur application à la réalisation d'un oscillateur opto-micro-onde à cette fréquence.

### 1. Introduction

L'amélioration des performances des sources et filtres microondes nécessite de nouveaux résonateurs alliant très fort facteur de qualité (Q) et volume réduit. Avec la technologie actuelle, obtenir des résonateurs compacts est difficile, en particulier en gamme centimétrique. De plus, le facteur de qualité décroît quand la fréquence microonde augmente. Actuellement, les résonateurs saphir à modes de galerie montrent les meilleures performances autour de 10 GHz avec des facteurs de qualité à vide de l'ordre de  $10^5$ .

Une méthode élégante pour diminuer la taille des résonateurs est de transporter l'onde hyperfréquence sur un support différent. On peut par exemple travailler dans le domaine acoustique ou dans le domaine optique. Nous avons dans cette étude choisi de piéger l'onde hyperfréquence dans un dispositif optique, grâce à une porteuse optique : un laser émettant dans les fréquences des télécommunications. Puisque la longueur d'onde de la porteuse est petite (de l'ordre de 1,55  $\mu\text{m}$ ), les dispositifs réalisés seront de petites dimensions et plus compacts que les dispositifs micro-ondes actuels. Le résonateur optique utilisé présente une succession de

modes de résonance distants de la fréquence microonde à stabiliser, ou d'un de ses multiples. Chacun de ces modes présente un coefficient de qualité optique  $Q_{\text{opt}}$  et un coefficient de qualité équivalent en hyperfréquence  $Q_{\text{rf}}$ . Le facteur  $Q_{\text{rf}}$  est le produit de  $Q_{\text{opt}}$  et du rapport entre les fréquences micro-onde  $f_{\text{rf}}$  et optique  $f_{\text{opt}}$  (éq. 1) :

$$Q_{\text{rf}} = Q_{\text{opt}} \cdot \frac{f_{\text{rf}}}{f_{\text{opt}}} \quad (1)$$

Contrairement au cas des résonateurs hyperfréquences,  $Q_{\text{rf}}$  augmente proportionnellement avec la fréquence micro-onde. Le rapport des fréquences impose néanmoins que le facteur de qualité optique de ces résonateurs soit plus élevé que  $10^9$  à 1,55  $\mu\text{m}$  (ou 194 THz) pour que le facteur de qualité à 20 GHz soit supérieur à  $10^5$  et donc qu'ils puissent permettre d'obtenir des performances meilleures que les résonateurs micro-ondes.

Dans le domaine de l'opto-micro-onde, l'utilisation des résonateurs optiques est une alternative à l'approche utilisant une ligne à retard optique, plus facile à mettre en œuvre et aujourd'hui très bien connue. Ces lignes sont des fibres optiques de quelques kilomètres de long permettant d'atteindre des  $Q_{\text{rf}}$  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.

Une alternative intéressante aux lignes à retard est fournie par les mini résonateurs optiques [2,3]. Ce sont des sphères, tores ou disques, dans lesquels l'onde optique circule en utilisant les modes de galerie. Ces structures devant être transparentes autour de 1,55  $\mu\text{m}$ , elles sont constituées de quartz, silice, fluorures de calcium ( $\text{CaF}_2$ ) ou magnésium ( $\text{MgF}_2$ ), etc... Comme nous allons le montrer ici, ces résonateurs présentent de forts coefficients de qualité optiques (de  $10^8$  à  $10^{10}$  à 1,55  $\mu\text{m}$ ), mais restent délicats dans leur mise en œuvre. Une dernière approche, que nous détaillerons également, consiste à utiliser les possibilités de l'optique fibrée, développée pour les télécommunications, et nous présenterons ici le principe et l'utilisation des boucles résonantes de fibre optique.

## 2. Etude de différents résonateurs optiques-microondes

### 2.1. Les résonateurs à mode de galerie

Nous avons étudié deux types de résonateurs à modes de galerie de faible volume : une sphère en silice de diamètre 3,3 mm et un disque en quartz de diamètre 7,7 mm. Les modes de galerie sont excités par le laser porteur de l'onde hyperfréquence. Le laser utilisé pour la caractérisation de ces résonateurs est un laser à fibre dopée erbium amplifié (Koheras) de très faible largeur de raie (~1 kHz pour un retard de 120  $\mu$ s). Il est accordable grossièrement sur une gamme de fréquences de 120 GHz via sa température, et finement sur 2 GHz grâce à un élément piézoélectrique. Il est couplé dans ces résonateurs via les ondes évanescentes issues d'une fibre effilée ou étirée d'environ 2  $\mu$ m de diamètre (fig.1) fabriquée par Laseo [4]. Le laser étant accordable en fréquence, le facteur de qualité optique du disque de quartz a été mesuré par une méthode dite de "scan" [4]. Cette méthode consiste à explorer les différents modes de la cavité résonante en faisant varier la fréquence du laser. Elle permet de déterminer l'intervalle entre deux modes (ou intervalle spectral libre (ISL)) et de mesurer finement la largeur d'un mode. En l'occurrence, la largeur de raie de notre laser étant très fine, plus faible que celle d'un mode du résonateur, elle nous permet d'avoir une très bonne résolution des pics principaux des résonateurs. Dans le cas du disque de quartz de 7,7 mm de diamètre, nous avons pu mesurer un intervalle spectral libre de l'ordre de 8 GHz, et une largeur à mi-hauteur des pics principaux de 47 kHz (fig. 1). Ces mesures nous conduisent à déterminer le facteur de qualité optique de ce résonateur à  $4.10^9$  à 1,55  $\mu$ m (~ 194 THz).

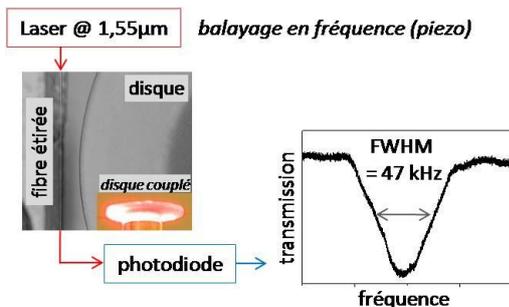


Figure 1. Caractérisation en "scan" direct des résonateurs à modes de galerie

Ce très fort facteur de qualité optique laisse envisager des facteurs de qualité hyperfréquences de l'ordre de  $4.10^5$  à 20 GHz. Néanmoins, ces résonateurs compacts ont des inconvénients. D'une part, le couplage du laser en utilisant des fibres étirées ou effilées et l'excitation des modes de galerie est délicat. D'autre part, ces résonateurs sont fortement multimodes transverses, c'est-à-dire que plusieurs modes spatiaux peuvent circuler à l'intérieur. Ceci est clairement visible en explorant les modes en fréquence avec un laser de très faible largeur de raie. La stabilisation du laser sur une fréquence de résonance est donc très difficile. Bien que nous étudions encore ces résonateurs, et que des techniques alternatives de couplage puissent être utilisées, avec notamment le

remplacement des fibres étirées ou effilées par des prismes [5], il est intéressant d'envisager une technique alternative.

### 2.2. Les résonateurs fibrés

Les fibres optiques sont particulièrement adaptées à une utilisation à la longueur d'onde que nous utilisons. Nous allons donc pouvoir utiliser des fibres monomodes transverses à 1,55  $\mu$ m. En construisant un résonateur avec ces fibres, nous pouvons travailler avec un peigne de fréquences unique dans le résonateur. D'autre part, le couplage du laser dans le résonateur devient direct en utilisant des lasers fibrés, ce qui permet d'avoir un couplage stable, mais aussi d'intégrer le système. Nous avons donc étudié un résonateur basé sur une boucle de fibre décrite dans la référence [6]. Cette boucle est composée de deux fibres optiques monomodes (corning SMF 28) reliées par deux coupleurs guides d'onde fibrés (couplage typique 99/1%) comme le décrit la figure 2. La connection des fibres à l'intérieur de la boucle est réalisée par des soudures. Sa longueur totale est de 1 à 20 m, ce qui correspond à un intervalle spectral libre de 10 à 200 MHz.

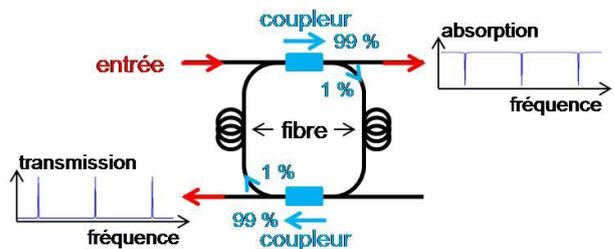
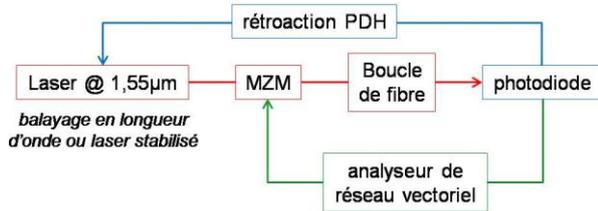


Figure 2. Boucle de fibre et modes résonants en absorption et en transmission

La simulation d'une telle boucle est décrite dans la référence [6]. Elle prend en compte les coefficients de couplage et de transmission des coupleurs, ainsi que leurs pertes. Elle tient aussi compte des pertes aux soudures des fibres. Après avoir caractérisé les coupleurs utilisés, des facteurs de qualité optiques de  $2.10^8$  pour une boucle de 1 m à  $5.10^9$  pour une boucle de 20 m, devraient pouvoir être atteints. Expérimentalement, nous avons donc principalement travaillé avec une boucle de 20 m de longueur totale.

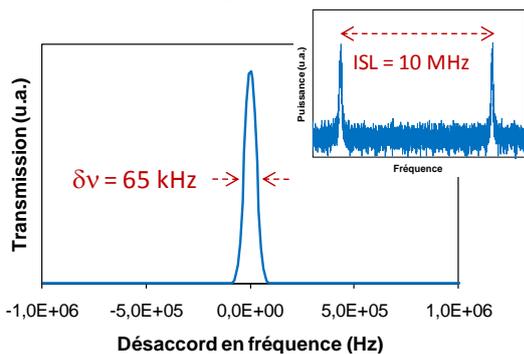
La méthode de "scan" utilisée pour l'étude des résonateurs à modes de galerie nous a permis de vérifier un intervalle spectral libre de 10 MHz pour cette boucle. Nous avons aussi pu observer que, à cause de leurs très forts facteurs de qualité, ces résonateurs sont très sensibles à toute influence extérieure. Les effets thermiques sont notamment les plus difficiles à gérer et sont dus d'une part aux variations de température de l'environnement, mais aussi à l'injection du laser dans les résonateurs qui modifie la température locale dans la fibre, et surtout dans les coupleurs. Pour ces derniers, des variations de température peuvent induire des modifications des caractéristiques de couplage mais aussi des pertes. Ces variations thermiques décalent donc les fréquences de résonance des résonateurs à fibre. Il est donc nécessaire de stabiliser le laser sur le résonateur, comme indiqué sur le schéma expérimental de la figure 3. La stabilisation du laser est réalisée grâce à une

boucle de type Pound-Drever-Hall (PDH) [7,8]. La modulation de phase est réalisée par un modulateur en niobate de lithium. Le signal d'erreur de la boucle est envoyé sur un intégrateur proportionnel différentiel. La correction est appliquée sur l'élément piézoélectrique permettant d'accorder finement la fréquence du laser.



**Figure 3. Dispositif pour le test du filtrage microonde par le résonateur optique**

Une fois le laser stabilisé sur le résonateur, il est possible de le moduler en hyperfréquences à l'aide d'un modulateur de Mach-Zehnder (MZM). Les modes latéraux sont alors explorés en faisant varier la fréquence du modulateur, c'est-à-dire en reliant le MZM à un analyseur de réseaux hyperfréquences. Le spectre du résonateur est alors stable et nous mesurons une largeur à mi-hauteur de 65 kHz (fig. 4).



**Figure 4. Résonance du résonateur stabilisé et ISL de la boucle de 20 m en encart**

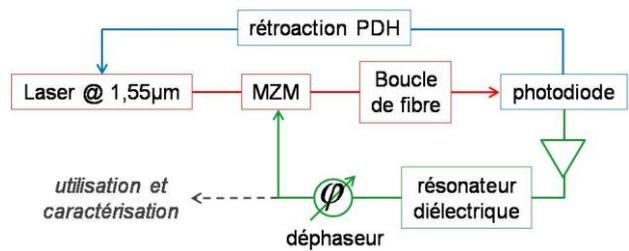
Le facteur de qualité optique déterminé avec cette technique est comparable aux calculs réalisés, avec une valeur de  $3 \cdot 10^9$  pour une boucle fibrée de 20 m, constituée de coupleurs 99/1. Ramenée en gamme micro-onde, cette performance conduit à un facteur de qualité de  $3 \cdot 10^5$  à 20 GHz, ce qui est largement supérieur à ce qui peut être obtenu à cette fréquence avec des techniques entièrement microondes.

Cependant, lors de la réalisation d'un oscillateur avec ce résonateur, nous nous sommes aperçus qu'il générerait une composante de bruit importante qui rendait moins intéressante cette performance en facteur de qualité. Un nouveau résonateur qui permet de résoudre ce problème a été conçu (brevet en cours de dépôt), mais il présente un facteur de qualité optique plus faible ( $\sim 2 \cdot 10^8$  à  $1,55 \mu\text{m}$ ). Malgré cela, un premier oscillateur a pu être assemblé avec ce nouveau résonateur.

### 3. Démonstration d'un oscillateur opto-hyperfréquence à résonateur optique

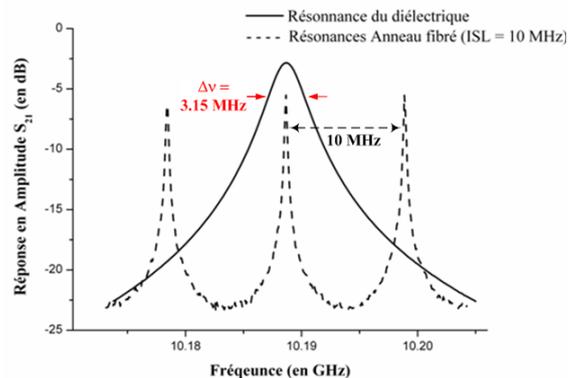
A partir du dispositif de la figure 3, nous avons réalisé un oscillateur optoélectronique (OEO)

fonctionnant autour de 10 GHz. Le principe du dispositif expérimental est décrit sur la figure 5.

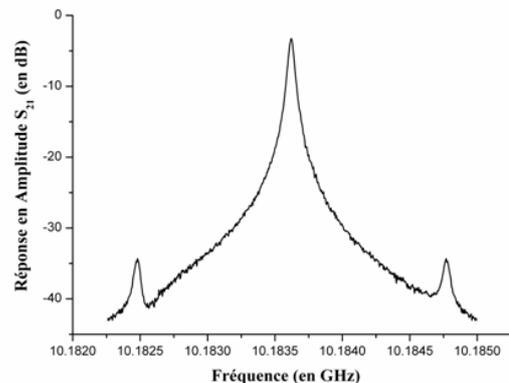


**Figure 5. Principe de l'oscillateur à 10 GHz**

Le signal issu de la photodiode est amplifié. Il contient les différentes fréquences des battements entre les modes résonants de la boucle. Pour réaliser un oscillateur ayant une fréquence de 10 GHz, nous utilisons un résonateur diélectrique, qui filtre une gamme de fréquence autour de 10 GHz pour ne sélectionner qu'un seul pic du peigne de fréquences issu du résonateur optique (fig. 6).



**Figure 6. Comparaison autour de 10 GHz de la fonction de transfert du résonateur diélectrique et de l'ISL de la boucle de 20 m**

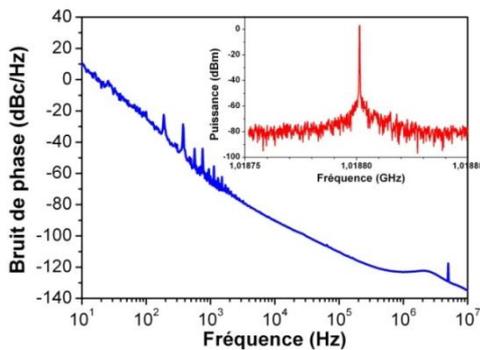


**Figure 7. Résonance autour de 10 GHz de la boucle de 20 m après filtrage par le résonateur diélectrique**

Ce signal (fig. 7) est envoyé sur le modulateur de Mach-Zehnder et module la porteuse optique. La fréquence de la porteuse optique est asservie sur une résonance de la boucle, afin que le système soit entièrement stable. On forme ainsi un oscillateur optoélectronique.

Le spectre de cet oscillateur, ainsi que son spectre de bruit de phase, sont mesurés par un analyseur de signal

Agilent E5052. Les résultats sont présentés en figure 8.



**Figure 8. Spectre et bruit de phase de l'oscillateur OEO à 10 GHz**

Le spectre de bruit de phase présente plusieurs zones. Entre 10 et  $10^3$  Hz, le bruit de phase est dominé par le bruit de fréquence en  $1/f$ , caractérisé par une pente de -30 dB/dec. Les pics visibles entre 0,1 et 1 kHz peuvent être dus à des fluctuations mécaniques ou thermiques du résonateur. Le bruit blanc de fréquence, entre 1 et 400 kHz est caractérisé par une pente de -20 dB/dec. Le plancher de bruit de phase apparaît au-delà de 0,4 MHz, et est de l'ordre de -120 dBc/Hz. La chute finale du bruit, au-delà de 3 MHz, est due au filtrage réalisé par le résonateur diélectrique.

La fréquence  $f_{lim}$  de la limite entre le bruit blanc de fréquence et le bruit blanc de phase est reliée au facteur de qualité hyperfréquence en charge  $Q_{rf}$  par l'équation (2) :

$$f_{lim} = \frac{f_{rf}}{2 \cdot Q_{rf}} \quad (2)$$

où  $f_{rf}$  est la fréquence de l'onde hyperfréquence [9]. Avec une fréquence à cette limite de 0,4 MHz, le facteur de qualité en charge est de  $1,2 \cdot 10^4$  à 10 GHz, ce qui est cohérent avec un facteur de qualité optique de  $2 \cdot 10^8$  à  $1,55 \mu\text{m}$ .

Malgré un facteur de qualité important, cet oscillateur présente un niveau de bruit relativement élevé. Ce phénomène est principalement dû aux pertes en transmission dans le dispositif optique. Ces pertes s'ajoutent au faible taux de couplage entre la boucle et sa sortie en transmission (fig. 2) et contribuent à la dégradation du rapport signal à bruit en sortie du résonateur, et donc à l'augmentation du niveau de bruit de phase. Un deuxième facteur est lié aux différentes sources de bruit dans les composants optiques en hyperfréquence qui n'ont pas particulièrement été optimisés pour cette première réalisation. Nous travaillons actuellement à améliorer ces paramètres dans nos prochains oscillateurs.

## 4. Conclusion

Les résonateurs optiques donnent accès à des facteurs de qualité élevés dans le domaine des hyperfréquences tout en garantissant un volume réduit. Les résonateurs à mode de galerie devraient pouvoir permettre la réalisation d'oscillateurs compacts si des solutions peuvent être trouvées pour un couplage intégré (ou semi-

intégré) pour ces dispositifs. Les résonateurs fibrés de type boucles de fibre résonantes sont quant à eux plus faciles à mettre en œuvre. L'oscillateur OEO, présenté dans cette communication, utilisant un tel résonateur 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, les potentialités en termes de facteur de qualité hyperfréquence sont encourageantes et le développement en cours d'un nouveau résonateur fibré devrait nous permettre d'améliorer largement les performances de cet oscillateur.

## 5. Bibliographie

- [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] D.K. Armani, T.J. Kippenberg, S.M. Spillane and K.J. Vahala, « *Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip* », Nature, vol.421, pp. 925-8, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] P.H. Merrer, O. Llopis and G. Cibiel, « *Laser stabilization on a fiber ring resonator and application to RF filtering* », IEEE PTL, vol.20 (16), pp. 1399-1401, 2008.
- [7] R. V. Pound, « *Electronic frequency stabilization of microwave oscillators* », Rev. Sci. Instrum., vol. 17 (11), pp. 490-505, 1946.
- [8] R.W.P. Drever, J.L. Hall, F.V. Kowalski, J. Hough, G.M. Ford, A.J. Munley and H.Ward, « *Laser phase and frequency stabilization using an optical-resonator* » Appl. Phys. B., vol. 31, no. 2, pp. 97-105, Jun. 1983.
- [9] D.B. Leeson, « *A simple model of feedback oscillator noise spectrum* » Proc. of the IEEE, vol. 54, no. 2, pp. 329-330, Fev. 1966.