

OSCILLATEUR OPTOELECTRONIQUE A CONVERSION OPTO-RF DIRECTE A BASE D'UN RESONATEUR EN ANNEAU SILICIUM

Phuong T. Do¹, Carlos Alonso-Ramos², Xavier Le Roux², Laurent Vivien², Delphine Marris-Morini², Paul Crozat², Isabelle Ledoux-Rak¹, Bernard Journet¹ and Eric Cassan²

¹ LPQM (UMR-8537) École normale supérieure Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, 61 avenue du Pdt Wilson, 94235 Cachan Cedex

² C2N (UMR-9001), Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 10 Boulevard Thomas Gobert, 91120 Palaiseau

* Contact: tdo01@ens-paris-saclay.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons la mise en œuvre d'un oscillateur optoélectronique (OEO) qui exploite le peigne optique produit par un résonateur en anneau en silicium pour convertir directement les signaux optiques dans le domaine des micro-ondes. L'OEO comprend principalement un laser, un modulateur d'intensité, un résonateur en anneau silicium, un photodétecteur, et un amplificateur RF. En utilisant un micro-résonateur en silicium sur isolant de plusieurs millimètres de long, nous avons généré un signal d'oscillation avec une fréquence déterminée par l'intervalle spectral libre (ISL) de l'anneau. L'anneau a été optimisé à une longueur de 5,8 mm avec un ISL mesuré de 112 pm, un facteur d'extinction de 20 dB et un facteur de qualité optique de $2,2 \times 10^5$. La boucle OEO complète produit un signal de 14,12 GHz avec un niveau de bruit de phase de -100 dBc/Hz à un décalage de 100 kHz de la porteuse. Ce résultat montre que les OEO basés sur des anneaux de silicium de plusieurs millimètres de long sont une voie possible pour générer des signaux micro-ondes à faible bruit.

MOTS-CLEFS : Oscillateur optoélectronique, résonateur, photonique silicium

1. INTRODUCTION

L'oscillateur optoélectronique (OOE) a été introduit par X.S. Yao et L. Maleki en 1996 pour produire des signaux hyperfréquences et ondes millimétriques spectralement purs et stables avec un grand potentiel pour des applications en communications, radars, ou détection[1, 2]. La première structure de l'OOE reposait sur une ligne à retard à fibre optique de quelques km de long, utilisée comme élément retard pour permettre la condition d'oscillation de la boucle opto-RF hybride.

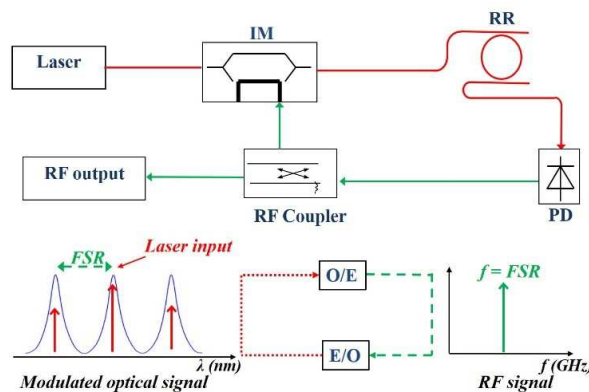


Fig. 1. Schéma de principe et principe de fonctionnement d'un OEO basé sur un résonateur en anneau de silicium. IM : Modulateur d'intensité, RR : résonateur en anneau de silicium, PD : photodétecteur.

Cette approche directe soulève néanmoins des exigences assez strictes sur le filtre RF de la boucle qui sélectionne les fréquence d'oscillation, nécessitant des facteurs de qualité d'au moins quelques milliers à des fréquences élevées ($\gg 100$ MHz). Par ailleurs, cette solution rend difficile

l'accordabilité en fréquence du signal produit. C'est la raison pour laquelle une modification du système bouclé par l'introduction d'un déphasage optique reposant sur un résonateur optique venant remplacer la fibre, a été proposé [3]. Des résultats marquants ont été rapportés dans cette configuration, soit en utilisant des résonateurs en anneau à fibre optique[4], des microdisques ou des résonateurs à mini-sphères[5, 6]. Cependant, ces dispositifs ont une capacité d'intégration limitée.

Dans ce contexte, les travaux que nous avons menés apportent une contribution vers l'intégration photonique et optoélectronique des différents éléments d'un OOE. Nous avons choisi la plateforme d'intégration silicium et développé des résonateurs en anneau sur silicium sur isolant, que nous avons ensuite inséré au sein de la boucle d'un OOE pour en étudier les conditions de démarrage, de stabilité et de performances en bruit. Nous avons visé une fréquence d'oscillation d'environ 14GHz et travaillé sur la base d'un système tel que celui représenté en **Fig. 1**.

2. CONCEPTION ET FABRICATION DES RESONATEURS EN ANNEAUX

L'utilisation directe du peigne optique produit par un résonateur en anneau pour convertir des signaux optiques dans le domaine RF nécessite un intervalle spectral libre (ISL) très faible, typiquement dans la gamme de la centaine de pm ou moins, et simultanément des niveaux de pertes d'insertion et de propagation maîtrisés pour maintenir la capacité d'oscillation de la boucle opto-micro-onde, ainsi qu'une résonance de haute qualité optique pour la génération de signaux micro-ondes spectralement purs. Nos choix de conception ont été guidés par ces lignes directrices. La fabrication s'est appuyée sur des substrats SOI de un film mince de Si de 220 nm d'épaisseur sur une couche d'oxyde enterrée de 3 μm . Des guides d'ondes ruban (complètement gravés) de 550 nm de large et conçus pour fonctionner en polarisation quasi -TM à une longueur d'onde de 1,54 μm pour une fréquence RF cible autour de 14 GHz ont été considérés. En conséquence, la longueur du résonateur a été fixée à $L=5,8$ mm, l'indice de groupe du mode guidé ayant été estimé à l'aide d'un solveur de modes optiques vectoriel. Afin de réduire l'encombrement du dispositif, une forme d'anneau en spirale a été choisie, comme le montre la **Fig. 2**.

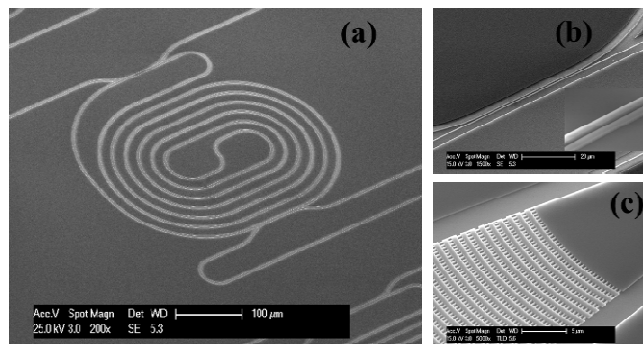


Fig. 2. Fabrication. (a) Forme en spirale du résonateur optique, (b) Détail du coupleur directionnel de l'anneau, (c) Détail d'un réseau d'injection/extraction de la lumière.

3. BOUCLE OPTO-MICROONDES

Un large éventail de caractérisations optiques et hyperfréquences du système a été réalisé, en boucle ouverte et en boucle fermée, dont les résultats seront présentés à la conférence.

En boucle fermée, nous avons obtenu une oscillation dont le spectre a été acquis par un analyseur de spectre (Agilent PSA-E4446A), comme le montre la **Fig. 3**, avec une bande passante de résolution de 2,7 kHz. En accord avec les résultats des expériences optiques menées, une fréquence d'oscillation de 14,2 GHz a été obtenue lors de l'utilisation du mode d'acquisition à un seul coup de l'analyseur de spectre RF. Nous avons vérifié les propriétés de la boucle en l'ouvrant et la fermant un grand nombre de fois afin de vérifier la répétabilité de la naissance des oscillations RF. Ces tests ont été positifs. Les spectres acquis ont tous donné lieu à des oscillations proches de 14,2 GHz, mais

sans se chevaucher strictement. Une fluctuation de la fréquence d'oscillation centrale de quelques dizaines de kHz a en effet été observée, ce que nous pensons pouvoir être attribué à une légère instabilité du laser utilisé. En principe, le signal d'oscillation est en effet créé avec une fréquence égale à la distance entre la porteuse qui est verrouillée sur un mode de résonance et la bande latérale de modulation correspondant à une résonance adjacente de ce mode. Si la longueur d'onde du laser subit de faibles fluctuations, la distance entre la porteuse et la bande latérale de modulation peut varier légèrement, ce qui affecte la fréquence du signal généré.

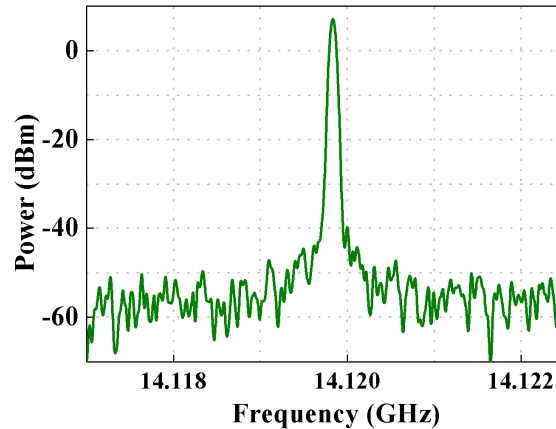


Fig. 3. Spectre du signal généré par la boucle OOE opto-RF complète, c'est-à-dire incluant le résonateur en anneau silicium de 5,8 mm de long.

Le bruit de phase de l'OOE a été mesuré en mode automatique de l'analyseur RF E446A, fonctionnant en mode "Phase Noise" pour caractériser et évaluer la qualité du signal généré. Nous avons obtenu un bruit de phase de -100 dBc/Hz à une fréquence décalée de 100 kHz par rapport à la porteuse, ce qui montre que l'intégration directe d'un résonateur en anneau silicium en spirale est une approche possible pour réaliser un OOE sur puce.

CONCLUSION

Pour conclure, nous avons étudié l'insertion d'un résonateur en anneau silicium dans une boucle opto-RF fermée pour générer un signal hyperfréquence. En utilisant un résonateur en forme de spirale de 5,8 mm de long (avec un facteur de qualité optique de $2,2 \times 10^5$), nous avons observé la génération d'un signal RF à une fréquence d'oscillation de 14,2 GHz avec un bruit de phase de -100 dBc/Hz à un décalage de 100 kHz par rapport à la porteuse. Ce travail est un premier pas vers l'intégration complète des fonctions OOE en photonique silicium.

REFERENCES

- [1] X. S. Yao and L. Maleki, "Optoelectronic oscillator for photonic system", IEEE Journal of Quantum Electronics, Jul 1996, 32 (7), pp. 1141-1149.
- [2] K. Saleh, R. Henriet, S. Diallo, et al., "Phase noise performance comparison between optoelectronic oscillators based on optical delay lines and whispering gallery mode resonators", Opt. Express, 2014, 22 (26), pp. 32158-32173.
- [3] L. Maleki, S. Yao, Yu Ji, et al., "New schemes for improved opto-electronic oscillator", Proc. Microwave Photonics, 1999. MWP '99. International Topical Meeting on, Melbourne, Vic., 1999, vol.1, pp. 177-180.
- [4] K. Saleh, P. H. Merrer, O. Llopis, et al., "Optoelectronic oscillator based on fiber ring resonator: Overall system optimization and phase noise reduction," 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings, Baltimore, MD, 2012, pp. 1-6.
- [5] A. B. Matsko, L. Maleki, A. A. Savchenkov, et al., "Whispering-gallery mode based opto-electronic oscillators," Journal of Modern Optics, 2003, 50 (15-17), pp. 2523-2542.
- [6] K. Volyanskiy, P. Salzenstein, H. Tavernier, et al., "Compact optoelectronic microwave oscillators using ultra-high Q whispering gallery mode disk-resonators and phase modulation," Opt. Express, 2010, 18, pp.22358-22363.