



**HAL**  
open science

## Génération de peigne de fréquence électro-optique par un modulateur Mach-Zehnder en silicium

Lucas Deniel, Diego Perez-Galacho, Erwan Weckenmann, Mathilde Gay, Charles Baudot, Laurent Bramerie, Frédéric Boeuf, Laurent Vivien, Christophe Peucheret, Delphine Marris-Morini

► **To cite this version:**

Lucas Deniel, Diego Perez-Galacho, Erwan Weckenmann, Mathilde Gay, Charles Baudot, et al.. Génération de peigne de fréquence électro-optique par un modulateur Mach-Zehnder en silicium. Journée du Club Optique et Micro-ondes (JCOM 2019), Jun 2019, Brest, France. hal-02270919

**HAL Id: hal-02270919**

**<https://hal.science/hal-02270919>**

Submitted on 26 Aug 2019

**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.



JCOM 2019  
ENIB & Lab-STICC  
Brest  
7 juin 2019



## Génération de peigne de fréquence électro-optique par un modulateur Mach-Zehnder en silicium

Lucas Deniel<sup>1</sup>, Diego Pérez-Galacho<sup>1,+</sup>, Erwan Weckenmann<sup>2</sup>, Mathilde Gay<sup>2</sup>, Charles Baudot<sup>3</sup>, Laurent Bramerie<sup>2</sup>, Frédéric Boeuf<sup>3</sup>, Laurent Vivien<sup>1</sup>, Christophe Peucheret<sup>2</sup>, Delphine Marris-Morini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91120 Palaiseau, France

<sup>2</sup>Univ Rennes, CNRS, FOTON - UMR 6082, F-22305 Lannion, France

<sup>3</sup>ST Microelectronics, 850 rue Jean Monnet, 38920 Crolles, France

<sup>+</sup> Désormais à ITEAM research institute, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, Espagne

Les télécommunications, la métrologie ou la spectroscopie sont autant de domaines dans lesquels les peignes de fréquence optiques trouvent une application. La génération de peigne optique accordable peut être réalisée à l'aide de modulateurs électro-optiques et la photonique silicium est une technologie de modulateur intéressante pour cette application. Nous démontrons dans ces travaux la génération d'un peigne optique contenant 12 raies observables et distantes de 100MHz à l'aide d'un modulateur silicium à structure de Mach-Zehnder, sur lequel un signal électrique d'une puissance de 25dBm est appliqué.



JCOM 2019  
ENIB & Lab-STICC  
Brest  
7 juin 2019



## Génération de peigne de fréquence électro-optique par un modulateur Mach-Zehnder en silicium

Lucas Deniel<sup>1</sup>, Diego Pérez-Galacho<sup>1,+</sup>, Erwan Weckenmann<sup>2</sup>, Mathilde Gay<sup>2</sup>, Charles Baudot<sup>3</sup>, Laurent Bramerie<sup>2</sup>, Frédéric Boeuf<sup>3</sup>, Laurent Vivien<sup>1</sup>, Christophe Peucheret<sup>2</sup>, Delphine Marris-Morini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91120 Palaiseau, France

<sup>2</sup>Univ Rennes, CNRS, FOTON - UMR 6082, F-22305 Lannion, France

<sup>3</sup>ST Microelectronics, 850 rue Jean Monnet, 38920 Crolles, France

<sup>+</sup> Désormais à ITEAM research institute, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, Espagne

Les peignes de fréquences optiques sont utiles dans de nombreux domaines comme les télécommunications, la spectroscopie ou la métrologie. Les lasers à blocage de mode constituent une possibilité largement étudiée pour la génération de tels peignes, au même titre que les effets d'optique non-linéaire comme le mélange à quatre ondes dans des structures résonantes [1]. L'espacement des fréquences dans le peigne ainsi généré est néanmoins difficilement accordable. La génération de peigne par voie électro-optique est une alternative intéressante, offrant la possibilité de contrôler électriquement la distance de séparation régulière entre les fréquences du peigne optique [2].

Cette méthode nécessite l'utilisation de modulateurs électro-optiques de phase et/ou d'amplitude. Alors que l'essentiel des recherches menées dans ce domaine se concentre sur des modulateurs en niobate de lithium (LiNbO<sub>3</sub>), la photonique silicium présente l'avantage de fournir des composants de petite taille, efficaces, et productibles en masse par les mêmes procédés industriels que ceux utilisés pour la fabrication des circuits électroniques CMOS (complementary metal oxide semiconductor) [3]. Les travaux que nous présentons montrent un peigne de fréquence optique généré à partir d'un modulateur à structure Mach-Zehnder en silicium. Le modulateur silicium est brièvement présenté dans un premier temps. Une explication du principe de génération est ensuite proposée, enfin une observation de peigne généré expérimentalement est fournie.

Le modulateur utilisé est constitué de deux jonctions PN de 4mm de long faisant office de modulateurs de phase dans une structure interférométrique de Mach-Zehnder. La modulation de phase est induite par un changement d'indice effectif sous l'application d'une tension inverse, par l'effet de dispersion des porteurs libres dans la jonction PN, en régime de déplétion. Le modulateur fonctionne en push-pull, avec une tension RF unique appliquée le long des électrodes à ondes progressives. L'amplitude de tension RF maximale applicable est fixée par les tensions de seuil et d'avalanche des jonctions PN.

Le champ électrique en sortie d'un modulateur de phase peut-être exprimé comme :

$$E_{OUT} = E_{IN} \times \exp\left(i\left(\omega_0 t - \frac{2\pi L}{\lambda} \times [n_0 + \Delta n(A \cos(\omega_{RF} t))]\right)\right)$$

Où  $E_{IN}$  est le champ incident,  $\omega_0$  est la pulsation de la porteuse optique,  $L$  la longueur du modulateur,  $\lambda$  la longueur d'onde optique,  $n_0$  l'indice effectif du mode guidé,  $\Delta n()$  le changement d'indice effectif, fonction de la tension appliquée,  $A$  l'amplitude de la tension appliquée et  $\omega_{RF}$  sa pulsation. Si on considère que le changement d'indice effectif est proportionnel à la tension appliquée, le développement de Jacobi-Anger donne :

$$E_{OUT} = E_{IN} \times \left\{ \exp\left(i\left(\omega_0 t - \frac{2\pi n_0 L}{\lambda}\right)\right) \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} i^k J_k(C \times A) \times \exp(i(k\omega_{RF} t)) \right\}$$

Où  $J_k()$  est la fonction de Bessel du première espèce et d'ordre  $k$ ,  $C$  est un coefficient de proportionnalité dépendant de  $L$ ,  $\lambda$ , et de l'efficacité du modulateur. On voit qu'une infinité d'harmoniques pondérées par les coefficients de Bessel apparaissent dans le spectre. Les peignes ainsi générés en sortie de chaque modulateur de phase sont sommés au niveau du combineur.

Pour la démonstration expérimentale, un faisceau laser à une longueur d'onde de 1550nm est couplé dans le modulateur, sur lequel une tension sinusoïdale de 25dBm à une fréquence de 100MHz est appliquée. Pour observer le peigne résultant, un second laser est mélangé au signal sortant du modulateur par l'intermédiaire d'un combineur directionnel externe. La fréquence du second laser est distante de celle du premier laser de 1,9 GHz. Le signal résultant est envoyé sur une photodiode et le mélange hétérodyne permet d'imager le peigne optique sur un analyseur de spectre électrique, autour de la fréquence de battement (1,9GHz). La figure 1 montre le spectre obtenu. Un total de 12 raies peut être observé, dont 5 à moins de 10dB de la porteuse.

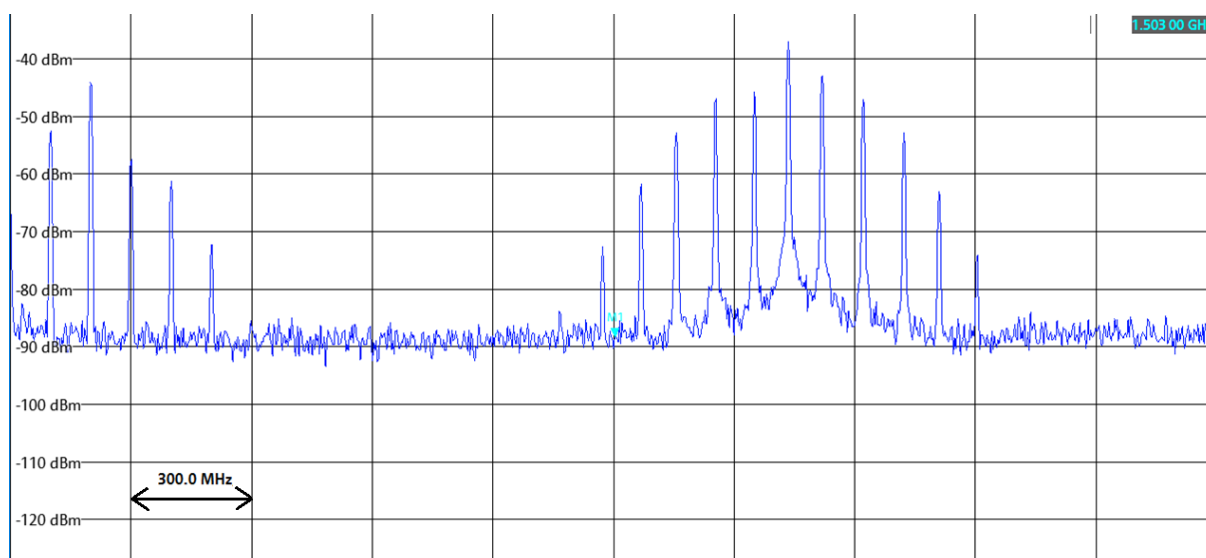


Figure 1. Observation de l'image du peigne sur un analyseur de spectre électrique. La partie droite montre le battement entre le peigne optique et le second laser, la partie gauche montre les battements entre les raies du peigne lui-même.

#### Références :

- [1] A. L. Gaeta, M. Lipson and T. J. Kippenberg: "Photonic-chip-based frequency combs", nature photonics, vol. 13 , p. 158 – 169, mars 2019
- [2] V. Torres-Company and A. M. Weiner: "Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics", Laser Photonics Rev. 8, No. 3, p. 368 – 393, 2014.
- [3] F. Boeuf, S. Cremer, E. Temporiti, M. Fere, M. Shaw, N. Vulliet, B. Orlando, D. Ristoiu, A. Farcy, A. Mekis, G.Masini, P. Sun, Y. Chi, H. Petiton, S. Jan, J.-R. Manouvrier, C. Baudot, P. Le Maitre, J.-F. Carpentier, L. Salager, M. Traldi, L. Maggi, D. Rigamonti, C. Zaccherini, and C. Elemi, "Recent Progress in Silicon Photonics R & D and Manufacturing on 300mm Wafer Platform," in Opt. Fiber Commun. Conf. (2015), pp. 4–6.