

GENERATION DE FORMATS DE MODULATION AVANCES PAR UN MODULATEUR MACH-ZEHNDER SILICIUM EN BANDE O

Lucas Deniel¹, Diego Pérez-Galacho^{1,+}, Mathilde Gay², Charles Baudot³, Laurent Bramerie², Oskars Ozolins^{4,++}, Frédéric Bœuf³, Laurent Vivien¹, Christophe Peucheret², Delphine Marris-Morini¹

¹ *Centre de Nanosciences et de Nanotechnologie, CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91120 Palaiseau, France*

² *Univ Rennes, CNRS, FOTON – UMR 6082, F-22305 Lannion, France*

³ *ST Microelectronics, 850 rue Jean Monnet, 38920 Crolles, France*

⁴ *Networking and transmission Laboratory, RISE AB, Kista Sweden*

⁺ *Désormais à ITEAM research institute, Universitat Politècnica de València, Espagne*

⁺⁺ *Également à SCI, KTH Royal Institute of Technology, Kista, Sweden*

lucas.deniel@u-psud.fr

RÉSUMÉ

Pour satisfaire les besoins croissants en efficacité spectrale dans les communications optiques intra-datacenters, les formats de modulation avancés présentent un intérêt majeur. Nous montrons qu'il est possible de générer des signaux optiques PAM-4 ou QPSK en appliquant deux signaux binaires sur un modulateur Mach-Zehnder dual-drive en silicium.

MOTS-CLEFS : *Modulateur ; Silicium ; PAM-4 ; QPSK*

1. INTRODUCTION

L'augmentation des débits requis et la limitation en bande-passante disponible pour les télécommunications optiques au sein des centres de données (data-centers) impliquent une évolution des formats de modulation utilisés. Les formats de modulation à 4 niveaux comme le PAM-4 (4-level pulse amplitude modulation) ou le QPSK (quadrature phase-shift keying) permettent de doubler le débit en comparaison de l'actuel OOK (on-off keying) pour une même occupation spectrale. Parmi les différentes technologies de modulateurs, la photonique silicium présente l'avantage de proposer des composants directement intégrables avec l'électronique et fabricables en grande série, par les mêmes procédés industriels matures que ceux utilisés pour les circuits intégrés CMOS (complementary metal-oxide semiconductor).

De nombreuses structures de modulateurs en silicium basés sur l'effet de déplétion des porteurs ont montré leurs capacités à réaliser des formats de modulations multi-niveaux d'intensité à très haut débits [1]. Cependant, la génération d'un signal à quatre niveaux est généralement assurée dans le domaine électrique par des CNA (convertisseurs numérique-analogique) coûteux en énergie. Pour éviter le recours à de tels composants, certaines structures de modulateurs électro-optiques permettent de convertir des signaux binaires électriques en un signal à quatre niveaux directement dans le domaine optique. Ces structures combinent généralement deux sous-modulateurs recevant chacun un signal binaire, et il a été montré que les deux modulateurs de phase d'une structure Mach-Zehnder Dual-Drive (MZM-DD) peuvent jouer ce rôle [2-4]. Pour la modulation QPSK, la structure communément utilisée consiste en deux MZM en parallèle. Chacun convertit un signal électrique binaire en modulation de phase optique, et l'un des signaux est déphasé en quadrature avant d'être ajouté à l'autre.

Nous montrons dans cet article comment un simple modulateur MZM-DD en silicium conçu pour fonctionner en bande O peut être utilisé pour générer des signaux QSPK et PAM-4 à partir de deux signaux électriques binaires. Après une brève présentation du composant, une explication du choix de l'amplitude des signaux électriques et du point de fonctionnement sera fournie. Enfin, deux démonstrations sont reportées, concernant la génération de signaux PAM-4 et QPSK à 20 Gb/s.

2. CONCEPTION ET CARACTERISTIQUES DU MODULATEUR

La figure 1.a est une vue de dessus schématique du modulateur utilisé pour les démonstrations expérimentales. Chaque bras de la structure comporte une jonction PN agissant comme modulateur de phase, dont une vue en coupe est proposée sur la figure 1.b. Les niveaux de dopage attendus sont respectivement de $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et $4,5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ pour les zones P et N, et 10^{19} pour les zones P++ et N++. Les signaux électriques se propagent le long d'électrodes à ondes progressives. Des pistes résistives chauffantes, non représentées, à proximité des guides permettent de régler le point de fonctionnement du modulateur sous l'application d'un courant continu. Le modulateur utilisé pour le QPSK possède une longueur de 2 mm et celui utilisé pour le PAM-4 1 mm. L'efficacité des modulateurs de phases a été mesurée allant de 1,2 V.cm autour de 0 V à 1,45 V.cm autour de 7 V ; une simulation des pertes optiques suggère d'autre part une atténuation de 18 dB/cm autour de 0 V et 11,5 dB/cm autour de 7 V dans ces mêmes modulateurs de phase. La bande passante électro-optique mesurée du modulateur de 1 mm est de 18 GHz et celle du modulateur de 2 mm est de 10 GHz.

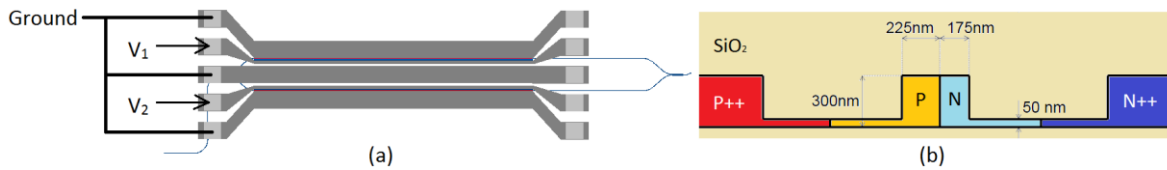


Fig. 1 : (a) Vue du dessus du modulateur, (b) Vue en coupe d'un modulateur de phase.

3. PRINCIPE DE GENERATION DES FORMATS PAM-4 ET QPSK

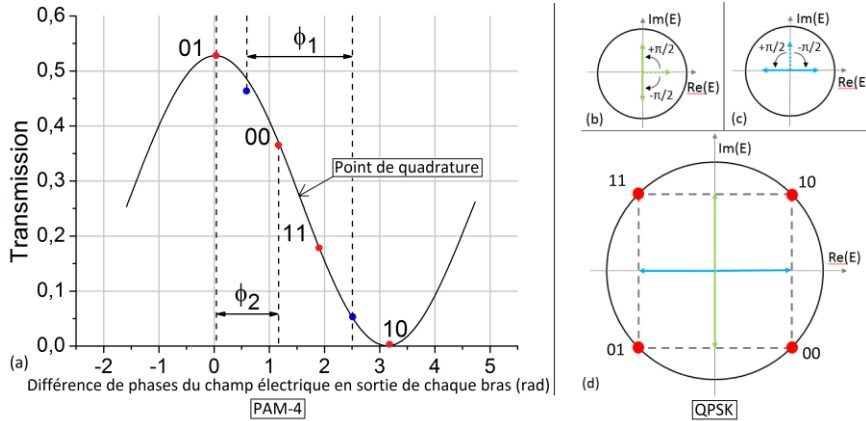


Fig. 2 : (a) Niveaux de transmissions PAM-4 d'un MZM-DD soumis à deux tensions binaires indépendantes d'amplitudes 7,64 Vpp et 4,4 Vpp (en rouge) ; (b) Champ électrique modulé par un premier modulateur de phase, représenté sur le plan complexe, (c) Champ électrique modulé par un second modulateur de phase en quadrature, (d) Superposition des champs (b) et (c) donnant la constellation du QPSK (en rouge).

Pour comprendre le principe de génération du signal PAM-4, la transmission du MZM en fonction du déphasage des champs électriques en sortie de chaque bras est présentée sur la figure 2.a. En insérant un déphasage constant de $\pi/2$ entre les bras, le modulateur fonctionne autour du point de quadrature. On peut appliquer un signal binaire V_1 sur le premier bras pour produire une

première variation de phase ϕ_1 et atteindre des niveaux intermédiaires (en bleu). Appliquer ensuite un signal binaire synchronisé indépendant V_2 de plus faible amplitude sur le second bras induit une variation de phase ϕ_2 permettant d'atteindre quatre niveaux de transmission. Un modèle numérique prenant en compte les caractéristiques des modulateurs de phase montre qu'appliquer des tensions d'une amplitude crête-crête de 7.64 Vpp sur le premier bras et 4.4 Vpp sur le second bras permet d'obtenir quatre niveaux equi-répartis sur la pleine échelle de la transmission [4].

La figure 2.b montre en rouge le champ électrique en sortie d'un modulateur de phase sur lequel une tension binaire V_1 provoque un déphasage de $\pm\pi/2$. Un second modulateur de phase en quadrature est soumis à un signal binaire V_2 indépendant de même amplitude ; le champ sortant est représenté en bleu sur la figure 2.c. Si ces modulateurs de phases constituent les deux bras d'un MZM, la superposition des champs en sortie du combineur permet d'obtenir la constellation du QPSK, en rouge sur la figure 2.d. Les caractéristiques des modulateurs de phases de 2 mm donnent une tension V_π de 7 V ; c'est l'amplitude crête-crête des tensions V_1 et V_2 à appliquer.

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Des signaux PAM-4 et QPSK à 20 Gb/s ont pu être générés suivant la méthode présentée précédemment. Pour générer le signal PAM-4, une séquence binaire pseudo-aléatoire de 7 Vpp à 10 Gb/s a été appliquée sur le premier bras, et une séquence différente de 4 Vpp au même débit a été appliquée sur le second bras du MZM de 1 mm. Le diagramme de l'œil ouvert présenté en figure 3.a est obtenu pour une puissance optique reçue de 0 dBm. Pour la génération d'un signal QPSK, les deux séquences à 10 Gb/s sont appliquées sur un modulateur de 2 mm avec une même amplitude crête-crête de 7 Vpp. Pour une puissance reçue de -22 dBm et après traitement des données par des algorithmes de traitement de signaux numériques (DSP), la constellation en figure 3.b a été obtenue. Les quatre niveaux de phase sont distincts, avec un EVM (error vector magnitude) de 33%.

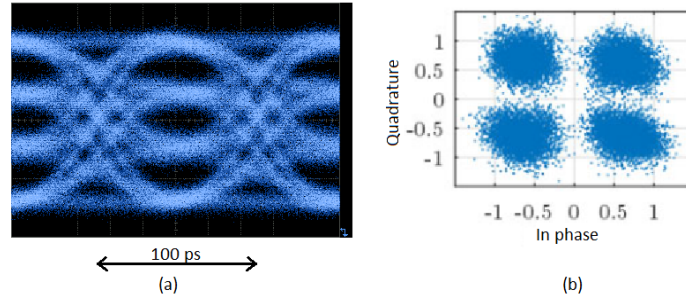


Fig. 3 : (a) Diagramme de l'œil PAM-4 à 20 Gb/s pour $V_1=7$ Vpp et $V_2=4$ Vpp à 0dBm (b) Constellation QPSK à 20 Gb/s pour $V_1=7$ Vpp et $V_2=7$ Vpp à -22 dBm après traitement du signal.

CONCLUSION

Deux formats de modulation optiques à 4 niveaux ont été générés à un débit de 20 Gb/s, en appliquant deux signaux électriques binaires à 10 Gb/s sur un MZM-DD en silicium fonctionnant en bande O et polarisé au point de quadrature. Un diagramme de l'œil ouvert a été observé au format PAM-4 et quatre phases distinctes sont visibles sur la constellation du format QPSK après traitement du signal.

RÉFÉRENCES

- [1] W. Shi, Y. Xu, H. Sepehrian, S. LaRochelle, and L. A. Rusch, "Silicon photonic modulators for PAM transmissions," J. Opt., vol. 20(2), 083002, 2018.
- [2] L. Zheng, J. Ding, S. Shao, L. Zhang, and L. Yang, "Silicon PAM-4 optical modulator driven by two binary electrical signals with different peak-to-peak voltages," Opt. Lett., vol. 42(11), pp. 2213-2216, 2017.
- [3] D. Perez-Galacho, L. Bramerie, C. Baudot, M. Chaibi, S. Messaoudène, N. Vulliet, L. Vivien, F. Bœuf, C. Peucheret, and D. Marris-Morini, "QPSK modulation in the O-band using a single dual-drive Mach-Zehnder silicon modulator," J. Lightw. Technol., vol. 36(18), pp. 3935-3940, 2018.
- [4] L. Deniel, M. Gay, D. Pérez-Galacho, C. Baudot, L. Bramerie, O. Ozolins, F. Bœuf, L. Vivien, C. Peucheret, and D. Marris-Morini, "DAC-less PAM-4 generation in the O-band using a silicon Mach-Zehnder modulator," Opt. Express, vol. 27(7), pp. 9740-9748, 2019.