

TRAITEMENT DU SIGNAL TOUT-OPTIQUE EN NANOPHOTONIQUE HYBRIDE III-V SUR SILICIUM

L. Constans^{1,2}, S. Combri  , D. Sanchez¹, F. Raineri¹, A. de Rossi²

¹ *Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France*

² *Thales Research and Technology, Palaiseau, France*

lea.constans@c2n.upsaclay.fr

RÉSUMÉ

Dans cet article nous présentons les propriétés de portes tout-optiques non linéaires ultrarapides en nanophotonique hybride III-V sur silicium. Cette technologie est ici utilisée pour échantillonner des signaux optiques jusqu'à 40 GHz, et pourrait également être exploitée pour former des circuits photoniques complexes, par exemple pour du calcul optique avancé.

MOTS-CLEFS : *Nanophotonique III-V sur silicium, cristaux photoniques, échantillonnage tout-optique, traitement du signal tout-optique*

1. INTRODUCTION

De nos jours la plupart des calculs ou des opérations de traitement du signal nécessaires à d'innombrables applications sont effectués numériquement, via des processeurs de plus en plus performants mais également consommateurs d'énergie [1]. Notamment afin de limiter cette problématique de l'énergie, des étapes de traitement ou de calculs pourraient être réalisées via un procédé optique, comme par exemple la corrélation optique [2], ou encore via des réseaux de neurones photoniques [3] qui suivent un nouvel essor depuis quelques années.

La photonique est en fait un élément-clé pour les futures technologies de traitement de signal, par exemple grâce aux sources optiques à faible gigue temporelle [4] qui permettent d'aller au-delà des performances des convertisseurs analogique-numérique (CANs)   lectroniques [5]. En effet, une horloge à faible gigue temporelle permet d'améliorer la résolution du convertisseur en restant à des fréquences d'échantillonnage équivalentes, ce qui mène à une amélioration globale de la performance des CANs. Ceci a permis le développement de CANs assistés optiquement [5], et a également ouvert la possibilité d'éviter des conversions optique vers électrique (O/E) coûteuses en énergie, ce via des approches tout-optiques. De tels systèmes, appelés portes tout-optiques, ont déjà été implémentés en composants intégrés via des micro-résonateurs à anneaux [6], des cristaux photoniques [7] ou par mélange à quatre ondes [8].

Dans cet article nous présentons nos portes tout-optiques constituées de cavités à cristaux photoniques en matériau III-V sur silicium (III-V/Si), ainsi que les résultats obtenus en échantillonnage tout-optique. Puis nous concluons sur le potentiel qu'elles représentent pour d'autres applications de traitement du signal tout-optique, notamment pour le calcul neuromorphique photonique.

2. PORTE TOUT-OPTIQUE : NANOCAVITÉ III-V SUR SILICIUM

Nos portes optiques reposent sur l'utilisation d'un résonateur optique, comme illustré en Fig 1. Le résonateur, ou cavité optique, est placé à côté d'un guide d'onde qui transporte le signal ainsi que l'horloge, et il est conçu de manière à ce que la longueur d'onde du signal λ_s corresponde à un mode résonant, et dans ce cas la porte est initialement fermée. La fonction non linéaire d'échantillonnage, ou de « switch », est obtenue comme suit : l'absorption d'une impulsion d'horloge par la cavité y excite des porteurs libres, ce qui induit un déplacement spectral des

résonances de la cavité vers le bleu. Le signal n'étant plus à la résonance, sa transmission est augmentée, et la porte optique est ouverte.

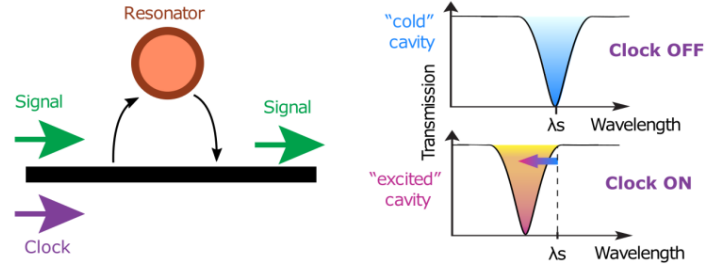


Figure 1 : Principe d'une porte tout-optique avec un résonateur optique

Comme cavité optique nous utilisons des cavités à cristaux photoniques en semi-conducteur III-V, dont les hauts facteurs de qualité et les faibles volumes modaux favorisent les effets non linéaires. De plus, l'utilisation d'alliages III-V permet de bénéficier d'une large variété de matériaux et de pouvoir optimiser les propriétés-clé, qui sont ici l'absorption, la dynamique des porteurs, et la non linéarité. Enfin les matériaux III-V sont intégrables sur une plateforme silicium grâce aux techniques de collage sur wafer silicium appliquées en salle blanche.

Pour nos travaux nous avons conçu et fabriqué des nanocavités 1D en InP appelées nanobeams, comme montré en Fig. 2(a), comprenant des puits quantiques de surface d'InGaAs afin d'induire de l'absorption linéaire et d'accélérer la dynamique des porteurs [9]. La dynamique non linéaire de la porte est caractérisée via des mesures pompe-sonde, ce qui permet d'évaluer la valeur du déplacement spectral des cavités, ainsi que le temps de relaxation de cet effet non linéaire. Comme montré en Fig. 2(b), cette mesure nous permet d'estimer le contraste dynamique, qui est le contraste de transmission entre les deux états de la porte : on mesure ici 10 dB de contraste, ce qui est satisfaisant et encourageant pour l'expérience d'échantillonnage décrite ci-après.

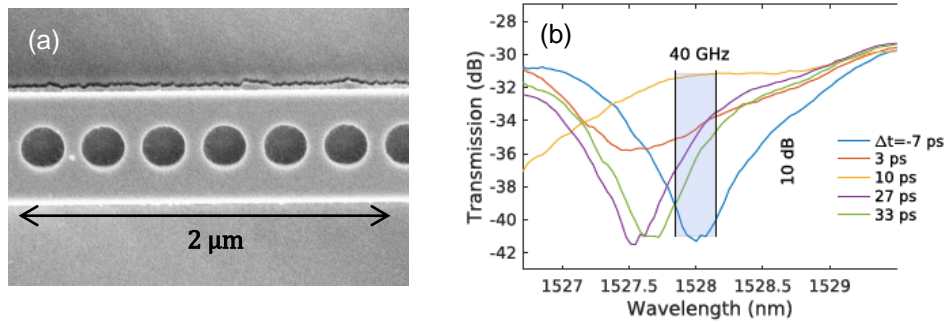


Fig. 2 : (a) Image MEB d'un nanobeam en InP/Si, qui fait 15 μm de long. (b) Estimation du contraste dynamique via une mesure pompe-sonde. L'instant 0 ps correspond à l'arrivée d'une impulsion d'horloge.

3. APPLICATION À L'ÉCHANTILLONNAGE TOUT-OPTIQUE

Les portes optiques que nous avons fabriquées (Fig. 2(a)) ont été conçues dans le but de réaliser de l'échantillonnage tout-optique, dont le principe de base est rappelé en Fig. 3(a). Pour évaluer la capacité d'échantillonnage du dispositif, on échantillonne puis reconstruit un signal optique connu, et en comparant le signal échantillonné au signal d'entrée, on déduit le rapport signal sur bruit (SNR) et le nombre de bits effectifs correspondant (ENOB), ainsi que la distorsion harmonique quand le signal connu est purement sinusoïdal. C'est ce qui est montré en Fig. 3(b), lors d'une expérience d'échantillonnage réalisée avec une nanocavité InP/Si : ici un signal modulé à 38.023 GHz a été échantillonné à une fréquence de 2GS/s (giga-sample per second), avec une puissance moyenne couplée d'horloge de quelques mW. Un SNR de 15 dB (ENOB 2.4) ainsi qu'une distorsion harmonique de -38 dBc ont été obtenus [10].

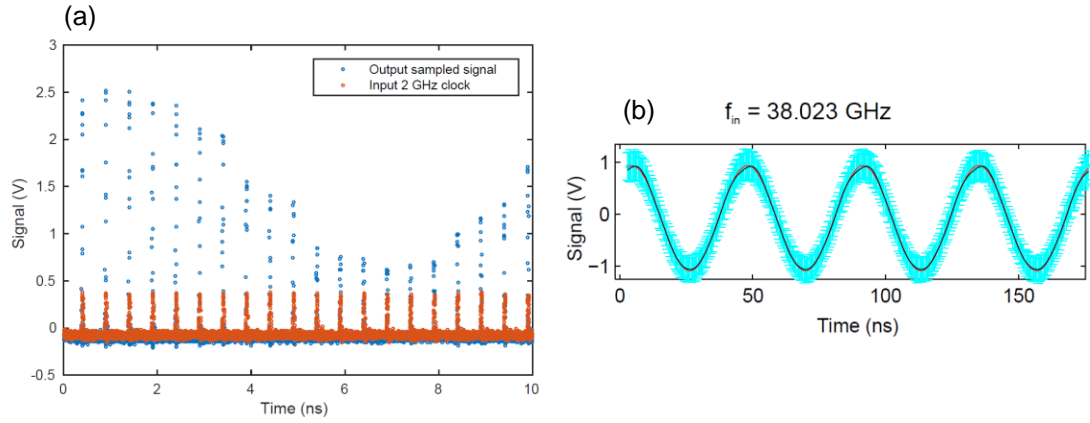


Fig. 3: (a) Trace à l'oscilloscope après conversion O/E d'une mesure d'échantillonnage tout-optique : un signal optique sinusoïdal a été échantillonné par une porte tout-optique activée par une horloge optique (**rouge**) (ici atténuée), ce qui donne le signal en **bleu**. (b) Signal reconstruit après échantillonnage d'un signal à 38.023 GHz par une nanocavité InP/Si. Les points de mesure sont en **bleu**, l'ajustement correspondant en **noir** et le signal idéal en **rouge**.

Ces résultats sont préliminaires, et les performances de la porte optique pour l'échantillonnage seront optimisées avec la future intégration du circuit complet d'échantillonnage. Ce circuit permettra notamment de réaliser de l'entrelacement temporel en échantillonnant via plusieurs portes, afin d'augmenter la fréquence d'échantillonnage finale.

4. AUTRE TYPE D'APPLICATION : CALCUL PHOTONIQUE NEUROMORPHIQUE

Pour gérer l'augmentation massive des données apparue ces dernières décennies, de nouveaux concepts de calcul informatique doivent être développés, comme les architectures non-Von-Neumann pour contourner le 'goulot d'étranglement des données' entre l'unité de calcul et la mémoire. Parmi ces architectures on trouve les réseaux de neurones artificiels qui imitent les processus de calcul analogique du cerveau, implémentés en électronique [11] ou en optique [3]. Ces systèmes nécessitent une fonction d'activation non linéaire, telle la fonction de Fano obtenue dans [7]. Nous estimons que nos portes non linéaires en III-V/Si sont tout à fait adéquates pour fournir cette fonction pour un système tout-optique, d'autant plus qu'elles peuvent être facilement intégrées et cascades, donc insérées au sein d'un circuit neuromorphique photonique.

CONCLUSION

Nous avons démontré et présenté des portes tout-optiques intégrables et efficaces énergétiquement, implémentées en nanophotonique III-V/Si, constituées de cavités à cristaux photoniques à faible encombrement, qui ont permis d'effectuer de l'échantillonnage tout-optique. Plus généralement, ces portes optiques sont tout à fait pertinentes pour construire des architectures intégrées évolutives et comportant des fonctions non linéaires, tels des circuits neuromorphiques sur plateforme photonique silicium.

RÉFÉRENCES

- [1] S. Mittal and J. S. Vetter, *ACM Comput. Surveys*, 47, 19:1–19:23, 2014.
- [2] H. Rajbenbach et al., *OSA Trends in Optics and Photonics* 170, 1998.
- [3] Y. Shen et al., *Nat. Phot.* 11, 441, 2017.
- [4] R. Bouchand et al., *IEEE Photonics Techn. Letters* 29, 1403–1406, 2017.
- [5] A. Khilo et al., *Opt. Exp.* 20, p.12, 2012.
- [6] V. Van et al., *IEEE Photonics Techn. Letters* 14, 74–76, 2002.
- [7] D. A. Bekele et al., *Opt. Exp.* 26, 2018.
- [8] M. Pu et al., *Lasers, Photonics and Reviews* 12, 2018.
- [9] A. Bazin et al., *Applied Physics Letters* 104, 2014.
- [10] L. Constans et al., *OSA Advanced Photonics*, Paper IM3B.4., 2018.
- [11] G. W. Burr et al., *Advances in Physics: X* 2, 89–124, 2017.