# REDUCTION DU BRUIT DE PHASE NON-LINÉAIRE D'UN SIGNAL NRZ-QPSK A 20 GBIT/S GRACE A UNE NANOCAVITÉ A CRISTAL PHOTONIQUE

## Trung-Hien Nguyen<sup>1</sup>, Mathilde Gay<sup>1</sup>, Laurent Bramerie<sup>1</sup>, Kevin Lenglé<sup>1</sup>, Christophe Peucheret<sup>1</sup>, Olivier Sentieys<sup>2</sup>, Jean-Claude Simon<sup>1</sup>, Alexandre Bazin<sup>3</sup>, Rama Raj<sup>3</sup> et Fabrice Raineri<sup>3, 4</sup>

<sup>1</sup> CNRS, UMR 6082 Foton, Université de Rennes 1, ENSSAT, F-22305 Lannion, France
<sup>2</sup> INRIA / IRISA, Campus de Beaulieu, 35000 Rennes, France
<sup>3</sup> Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, CNRS, UPR20, 91460 Marcoussis, France
<sup>4</sup> Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 75007 Paris Cedex 13, France

tnguyen@enssat.fr

## Résumé

Dans ce papier, nous présentons les résultats d'expériences visant à démontrer le fonctionnement au sein d'un système de transmission optique d'un limiteur de bruit d'amplitude préservant la phase à l'aide d'une nanocavité à cristal photonique. Le dispositif est validé par des mesures de taux d'erreur binaire sur un signal NRZ-QPSK à 20 Gbit/s transmis dans une liaison de 100 km dans un régime où le bruit de phase non-linéaire est dominant.

**MOTS-CLEFS :** *cristaux photoniques ; nanocavité ; traitement tout-optique du signal.* 

## **1.** INTRODUCTION

Les technologies hybrides combinant phosphure d'indium (InP) et silicium sur isolant (SOI pour *silicon-on-insulator*) pour les dispositifs de traitement du signal optique sont très prometteuses pour l'intégration de circuits optiques, grâce notamment à leur compacité, leur faible consommation énergétique et leur rapidité d'opération [1, 2].

Le bruit de phase non-linéaire (NPN pour *nonlinear phase noise*), dans lequel les fluctuations d'intensité d'un signal sont converties en bruit de phase par l'effet Kerr dans la fibre optique, est connu pour limiter la transmission de signaux QPSK (*quadrature phase shift keying*) à puissance élevée. Le NPN pourrait être compensé dans le domaine numérique, mais au prix d'une complexité accrue des récepteurs cohérents. Par ailleurs, il a été montré que la limitation des fluctuations d'intensité permettait de réduire l'accumulation de NPN dans la liaison [3, 4]. Nous avons récemment montré un limiteur d'intensité [5] préservant la phase [6] en utilisant une nanocavité à cristal photonique (PhC) basée sur la technologie hybride III-V/SOI. La préservation de la phase a notamment été confirmée sur un signal QPSK à 20 Gbit/s par une analyse statistique de la dispersion de phase.

Dans ce papier, le potentiel de ce composant en tant que limiteur de puissance préservant la phase est démontré pour la première fois dans une liaison optique présentant de fortes non-linéarités.

## 2. PRINCIPE D'OPERATION

La structure est composée de deux niveaux optiques : le premier est un guide d'onde monomode en silicium et le second est une nanocavité à cristal photonique en InP. Le couplage du guide à la nanocavité se fait par onde évanescente. La nanocavité étudiée est une cavité dite en « fil » présentant une seule rangée de trous de taille identique mais dont l'espacement varie de telle manière qu'il en résulte une cavité résonnante. La croissance de puits quantiques à la surface permet de maximiser la réponse du dispositif. Le signal est injecté dans le dispositif par couplage vertical à travers des réseaux inscrits aux extrémités du guide ; une simple fibre clivée permet ainsi l'injection du signal. Plus de détails sur l'optimisation de cette structure sont donnés dans la référence [2]. Le dispositif présente une résonance (à 1540 nm), un facteur de qualité de 860 et une profondeur de 12 dB. Cette résonance se décale vers les longueurs d'onde plus courtes en présence de signal par une modification de l'indice de réfraction dépendant de l'intensité, comme illustré sur la Fig. 1. En ajustant correctement la longueur d'onde du signal, il est alors possible d'obtenir la fonction d'écrêtage recherchée, comme illustré dans l'encart de la Fig. 1. Ce dispositif est inséré dans un système de transmission optique.



base de commutation de la nanocavité.

Fig. 2 : Schéma expérimental.

#### 3. SCHEMA EXPÉRIMENTAL

Le montage expérimental est représenté sur la Fig. 2. Un signal de type NRZ-QPSK (*non return-to-zero QPSK*) à 10 Gbaud est généré en appliquant deux séquences binaires pseudoaléatoires (PRBSs) à un modulateur à quadrature (IQ). Les séquences sont générées en utilisant un générateur de signaux arbitraires (AWG pour *arbitrary waveform generator*). Le signal de sortie du modulateur IQ est ensuite amplifié par un amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA1) et filtré. Le signal est dégradé artificiellement par l'ajout de bruit d'intensité afin d'émuler un signal qui se serait déjà propagé dans une liaison longue distance. Ceci est réalisé en injectant de l'émission spontanée amplifiée (ASE) provenant d'un EDFA suivi d'un filtre optique de 1 nm de bande passante et d'un atténuateur optique variable (VOA) pour ajuster le rapport signal sur bruit optique (OSNR). Le signal, dont l'état de polarisation est contrôlé (PC) sur le mode transverse électrique (TE) du guide d'onde, est alors injecté dans le limiteur d'intensité (puissance d'entrée 9 dBm grâce à l'EDFA2).

Le signal régénéré en intensité est finalement transmis dans la liaison de 100 km de fibre à dispersion décalée non nulle (NZDSF de dispersion chromatique 4 ps/(nm·km)) avec une forte puissance d'entrée de 17 dBm (EDFA3) pour émuler l'accumulation de non-linéarités dans une transmission longue distance. Au récepteur, un autre VOA suivi par un EDFA4 et un OBPF de 3 nm de bande passante sont utilisés afin d'ajuster l'OSNR de réception et effectuer des mesures de taux d'erreur binaire (TEB). Un récepteur cohérent est utilisé en réception avec une détection homodyne (le laser d'émission est également utilisé comme oscillateur local). Les composantes en phase et en quadrature sont ensuite détectées par des photodiodes équilibrées. Enfin, le traitement des données (DSP pour *digital signal processing*) est effectué en différé après l'acquisition des données à 20 GS/s sur un oscilloscope temps réel de bande passante 16 GHz [6].

#### 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

La Fig. 3 présente les résultats des mesures de TEB en fonction de la puissance reçue dans différents cas : lorsque l'émetteur et le récepteur sont connectés face à face (B2B pour *back-to-back*) ; dans le cas sans ajout de bruit (OSNR de 33 dB mesuré sur 0,1 nm) et pour un OSNR de 18 dB ; ainsi qu'après insertion de la liaison optique dans le cas avec et sans régénérateur pour un OSNR de 18 dB. Dans le cas du B2B, le bruit de phase linéaire est dominant (ASE), ce qui engendre une pénalité de 3,4 dB sur la puissance du récepteur pour un TEB de 10<sup>-3</sup>. Après 100 km et sans limitation d'intensité, un plancher d'erreur est mesuré pour un TEB de 10<sup>-3</sup> à cause de la limitation par le bruit de phase non-linéaire. Ce plancher est réduit de deux ordres de grandeur lorsque le limiteur d'intensité est inséré grâce à la réduction du bruit de phase non-linéaire.



Fig. 3 : TEB en fonction de la puissance après la transmission sans et avec limitation d'intensité pour des OSNR d'entrée de 18 dB et 33 dB.

Fig. 4 : TEB en fonction de l'OSNR d'entrée pour une puissance reçue  $P_{rec} = -20 \text{ dBm}.$ 

Finalement, la Fig. 4 montre les résultats de mesures de TEB en fonction de l'OSNR à l'émission afin d'étudier la gamme d'OSNR pour laquelle le dispositif est efficace. La puissance sur le récepteur est dans ce cas fixée à -20 dBm. Cette courbe montre une amélioration du TEB sur toute la gamme d'OSNR considérée (1 à 2 décades selon le cas). En outre, l'OSNR requis pour un TEB de 10<sup>-3</sup> est relâché d'environ 3.5 dB en présence du dispositif. Les constellations associées sont également clairement améliorées par la présence du régénérateur.

#### CONCLUSION

Nous avons démontré pour la première fois l'efficacité d'une nanocavité à cristal photonique à base d'InP sur silicium pour la réduction du bruit de phase non-linéaire d'un signal QPSK dans une liaison optique. Ce composant, permettant de réduire les fluctuations d'intensité tout en conservant la phase du signal, nous a permis de réduire le plancher d'erreur de  $10^{-3}$  à  $10^{-5}$  pour un signal transmis sur 100 km et possédant un OSNR initial de 18 dB et de relâcher l'OSNR requis pour un TEB de  $10^{-3}$  de 3.5 dB.

#### REMERCIEMENT

Ce travail est financé par le contrat de plan état-région PONANT et le ministère de la recherche. Les auteurs tiennent également à remercier I. Sagnes, G. Beaudoin et R. Braive pour la croissance du matériau et le traitement des échantillons.

#### Références

- [1] K. Lengle *et al.*, "Modulation contrast optimization for wavelength conversion of a 20 Gbit/s data signal in hybrid InP/SOI photonic crystal nanocavity," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 8, p. 2298, 2014.
- [2] A. Bazin *et al.*, "Ultrafast all-optical switching and error-free 10 Gbit/s wavelength conversion in hybrid InP-silicon on insulator nanocavities using surface quantum wells," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, 011102, 2014.
- [3] L. Bramerie *et al.*, "All-optical 2R regeneration with a vertical microcavity-based saturable absorber," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 18, no. 2, p. 870, 2012.
- [4] M. Matsumoto *et al.*, "Performance improvement of DPSK signal transmission by a phase-preserving amplitude limiter," *Opt. Express*, vol. 15, no. 13, p. 8094, 2007.
- [5] K. Lengle *et al.*, "Fast all-optical 10 Gb/s NRZ wavelength conversion and power limiting function using hybrid InP on SOI nanocavity," *Proc. ECOC*, We.2.E.5, Amsterdam, 2012.
- [6] T. H. Nguyen *et al.*, "Phase-preserving power limiting function using InP on SOI photonic crystal nanocavity," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, no. 12, p. 1215, 2014.
- [7] J. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 4th edition, Chap. 5 and Chap. 11, 2000.