

COMPENSATION DE LA DISPERSION CHROMATIQUE UTILISANT UN INTERFEROMETRE A BRAS MULTIPLES A BASE DE CRISTAUX PHOTONIQUES SUR PLATEFORME SILICIUM

L. Anet-Neto¹, M. Gay¹, L. Bramerie¹, C. Peucheret¹, M. Joindot¹, J.-C. Simon¹,
J. Bourderionnet², S. Combrié², A. De Rossi², Z. Han³, P. Boucaud³, X. Checoury³

¹ CNRS, UMR 6082 Foton, Université de Rennes 1, ENSSAT, F-22305 Lannion, France

² Thales Research and Technologies, 91767 Palaiseau, France

³ Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS, Univ. Paris Sud 11, 91405 Orsay, France

anetneto@enssat.fr

RÉSUMÉ

Cette étude théorique vise à démontrer l'utilisation d'un interféromètre optique à base de cristaux photoniques accordables pour compenser la dispersion chromatique d'un lien optique à modulation en intensité et détection directe. Le principe de fonctionnement est présenté pour des transmissions NRZ à 10 Gbit/s après propagation sur 150 km de fibre monomode standard.

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

1. INTRODUCTION

Nous sommes actuellement les témoins de l'émergence de thématiques de recherche portant sur l'utilisation du silicium comme plateforme pour la réalisation de circuits photoniques intégrés. L'intérêt suscité par la photonique sur silicium est dû notamment au fait que ces composants peuvent être fabriqués en mettant à profit la maturité des techniques de fabrication microélectroniques. Comme le silicium est couramment utilisé comme substrat dans les circuits d'électronique intégrée, il est également possible de concevoir des dispositifs hybrides dans lesquels des composants optiques et électroniques peuvent être intégrés sur une seule puce compacte. De plus, plusieurs travaux ont démontré le développement de briques de base pour le traitement tout-optique du signal, telles que les lignes à retard, les déphaseurs et les coupleurs de poids réglable [1]. Cette approche ouvre la porte à des solutions plus économes en énergie et permet, dans certains cas, la conception de fonctionnalités non envisageables avec des systèmes électroniques conventionnels.

Dans cet article, nous utilisons un interféromètre à bras multiples contenant des lignes à retard accordables à base de cristaux photoniques pour compenser les effets de la dispersion chromatique. Le principe de fonctionnement est démontré dans des liens optiques utilisant la modulation d'intensité non-retour à zéro (NRZ) à 10 Gbit/s et la détection directe sur 150 km de fibre monomode.

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU COMPOSANT

L'architecture du composant est montrée sur la Fig. 1a. Le dispositif est créé à partir d'une imbrication de plusieurs interféromètres constitués de séparateurs (C_0 , C_{00} et C_{01}), de lignes à retard fixes constituées de spires, de lignes à retards accordables à base de cristaux photoniques (PhC_0 , PhC_{00} et PhC_{01}) et de coupleurs (C'_0 , C'_{00} et C'_{01}). Le champ électrique à la sortie du dispositif est composé de la somme de tous les champs qui traversent les divers bras de la structure :

$$E_{OUT}(\omega_0, t) = e^{-j\omega_0 t} \sum_{m=0}^3 C_m A(t - \tau_m) e^{j\varphi_m} \quad \text{Éq. 1}$$

L'Éq.1 montre que la sortie du dispositif est caractérisée par un terme φ_m de pondération en phase sur la porteuse optique ω_0 et un terme τ_m de pondération en retard sur l'enveloppe d'information $A(t)$ modulant celle-ci en amplitude. Le coefficient C_m caractérise une pondération en amplitude

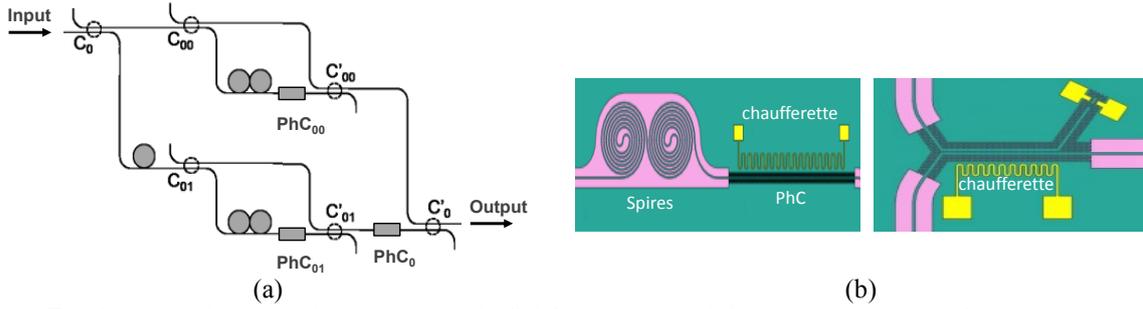


Fig. 1 : (a) Architecture du composant. (b) Schéma conceptuel des spires et cristaux photoniques.

associée aux coefficients de couplage des séparateurs et coupleurs ainsi qu'aux pertes des spires et cristaux photoniques traversés dans un bras m . Les pondérations en phase et retard sont constituées à la fois de composantes fixes (φ_s et $m\tau$), associées aux spires, et de composantes variables ($\varphi_{PhC,m}$ et $\delta\tau_m$), associées aux cristaux photoniques. L'accordabilité des cristaux photoniques est réalisée grâce à la variation thermique de l'indice de groupe des guides. Tout comme les paramètres des cristaux photoniques, les taux de couplage des séparateurs et coupleurs sont aussi accordables grâce à des chauffettes, comme montré sur le schéma conceptuel de la Fig. 1b. Les coupleurs et séparateurs sont modélisés comme des blocs à quatre ports, symétriques et sans pertes, tous parfaitement adaptés et isolés. Les pondérations en phase et en retard sont :

$$\varphi_m = \underbrace{mL_S\beta_S(\omega_0)}_{m\varphi_s} + \underbrace{L_{PhC}\beta_{PhC,m}(\omega_0)}_{\varphi_{PhC,m}} ; \quad \tau_m = \underbrace{mL_S \frac{\partial\beta_S}{\partial\omega} \Big|_{\omega=\omega_0}}_{=m\tau} + \underbrace{L_{PhC} \frac{\partial\beta_{PhC,m}}{\partial\omega} \Big|_{\omega=\omega_0}}_{\delta\tau_m} \quad \text{Éq. 2}$$

où β_S et β_{PhC} représentent, respectivement, les constantes de propagation dans les spires et cristaux photoniques. L_S désigne la longueur d'une spire (la longueur de spire du bras m vaut mL_S) et L_{PhC} désigne la longueur de la section de guide à cristal photonique. L_{PhC} est supposée identique dans chaque bras du composant ; seules les valeurs des $\beta_{PhC,m}$ différencient les cristaux photoniques.

Le principe de fonctionnement de ce dispositif paraît très similaire à celui d'un filtre électronique à réponse impulsionnelle finie : le champ optique en sortie est composé d'une combinaison des versions retardées et pondérées du champ à l'entrée. Cette propriété conduit, par exemple, à des applications de filtrage [2] qui ne seront pas abordées ici. Notons qu'une caractéristique essentielle différencie les approches dans le domaine optique et électrique, à savoir le fait que la première est basée sur le fonctionnement en régime cohérent. Pour l'approche égaliseur, nous fixons l'intervalle spectral libre de la fonction de transfert du dispositif et nous nous servirons essentiellement des déphasages $\varphi_{PhC,m}$ induits par les cristaux photoniques pour compenser la dispersion chromatique du lien.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Il est connu que les effets de la dispersion chromatique après détection directe se traduisent par l'apparition d'évanouissements en fréquence dans le canal de transmission limitant la capacité du système [3]. L'interféromètre à bras multiples peut compenser partiellement un tel effet. Cela revient à trouver les déphasages des cristaux photoniques capables de générer une réponse fréquentielle après détection directe (en bande de base) la plus uniforme possible, c'est-à-dire, avec le minimum de distorsions sur le spectre du signal de modulation.

Pour cela, nous utilisons l'algorithme de Nelder-Mead [4] pour trouver les déphasages $\varphi_{PhC,m}$ capables de minimiser l'erreur quadratique moyenne entre la réponse du canal après détection directe et un gabarit uniforme de référence. La propagation sur fibre optique est modélisée grâce à l'approche classique de l'enveloppe lentement variable [5]. Puis, nous calculons la réponse fréquentielle du canal à travers le rapport entre les spectres des signaux électriques transmis et après détection directe. Dans nos simulations, le dispositif est placé après l'émetteur, constitué d'un laser à 1550 nm sans chirp et dont la conversion courant électrique – puissance optique est linéaire.

Le courant de seuil du laser est de 25 mA et celui-ci est polarisé à 100 mA avec une efficacité de conversion électro-optique unitaire. Pour assurer le fonctionnement en régime de petit-signal, nous fixons l'indice de modulation en intensité m_{IM} à 10^{-6} (Icrête = 0.1 mA). La bande passante du laser est supposée beaucoup plus élevée que la bande occupée par le signal et aucune distorsion n'est donc induite sur ce dernier lors de la modulation de la porteuse optique. Seule la dispersion chromatique est prise en compte dans la propagation sur les 150 km de fibre. Le coefficient de dispersion à 1550 nm est de 16.5 ps/km·nm. La photodiode a un facteur de conversion de 1 A/W et une bande à -3 dB de 8 GHz. En ce qui concerne les signaux NRZ, nous considérons un débit de 10 Gbit/s avec des temps de montée et de descente (10% - 90%) de 35 ps. Un amplificateur électrique en réception compense les pertes dues à la propagation dans les cristaux photoniques et dans les spires.

Les coefficients de couplage de tous les séparateurs du dispositif sont fixés à 50% pour limiter le nombre de paramètres d'ajustement. Les pertes des cristaux photoniques sont considérées fixes (4.5 dB) et indépendantes du retard associé. Des excursions de phase entre 0 et 2π rad sont obtenues dans les cristaux photoniques avec une variation du retard $\delta\tau_m$ associé entre 9.5 ps et 9.7 ps. Les spires ont un coefficient d'atténuation de 2 dB/cm et des indices de groupe et de phase à 1550 nm de 3.6 et 2.7 respectivement. Les coefficients de couplage des coupleurs sont adaptés afin de compenser les pertes engendrées par les spires et cristaux photoniques dans chaque bras. Nous fixons le retard τ d'une spire à 50 ps afin d'assurer un ISL de 20 GHz et permettre l'égalisation d'un signal NRZ à 10 Gbit/s occupant la plage fréquentielle [-10,10] GHz en bande de base.

La réponse fréquentielle (paramètre S_{21}) sans égalisation et en régime petit signal montrée dans la Fig.2 annonce une limitation de la bande de transmission du canal à peu près à 4 GHz (permettant la transmission d'un signal NRZ à environ 4 Gbit/s) pour une transmission sans distorsion sur 150 km. L'effet d'un tel canal sur le diagramme de l'œil NRZ à 10 Gbit/s, en régime large signal (taux d'extinction de 4.8 dB), est également montré dans la Fig. 2 avec un diagramme de l'œil complètement fermé. L'apport de l'interféromètre dans l'amélioration de la transmission peut être identifié à la fois sur la réponse du canal et sur le diagramme de l'œil après détection. En effet, en utilisant les valeurs optimales $\varphi_{PhC,0} = 3.3$ rad, $\varphi_{PhC,00} = 0.4$ rad et $\varphi_{PhC,01} = 3.6$ rad trouvés grâce à l'algorithme de Nelder-Mead, nous éliminons notamment l'évanouissement du canal à 5 GHz et diminuons ainsi les distorsions du signal. Cela nous permet d'avoir un diagramme de l'œil plus ouvert et donc une meilleure transmission.

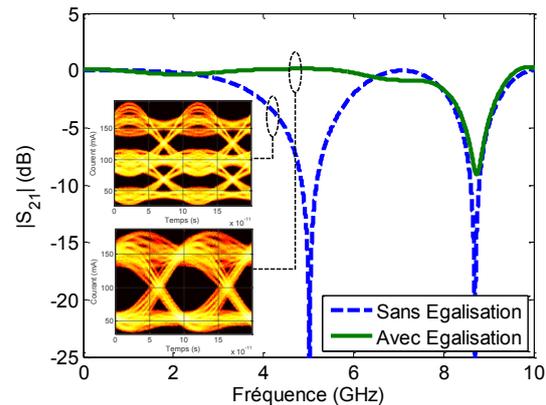


Fig. 2 : Effets de la propagation sans et avec égalisation optique.

CONCLUSION

Nous avons démontré le principe de fonctionnement d'un interféromètre à bras multiples à base de cristaux photoniques accordables pour la compensation de la dispersion chromatique d'un lien à modulation en intensité et détection directe. Une amélioration conséquente du diagramme de l'œil NRZ à 10 Gbit/s après 150 km a pu être constatée grâce au bon choix des déphasages des cristaux photoniques avec l'algorithme de Nelder-Mead.

REFERENCES

- [1] Capmany, J., Novak, D., Nature Photonics, vol. 1, pp. 319-330, 2007.
- [2] Sancho, J. *et al.*, Nature Communications, vol. 3, pp. 1075, 2012.
- [3] Bjerkan, L. *et al.*, Journal of Lightwave Technology, vol.14, no.5, pp. 839-850, 1996.
- [4] Nelder, J. A., Mead, R., The Computer Journal, vol. 7, pp. 308-313, 1965
- [5] Agrawal, Govind P., "Nonlinear Fiber Optics," Academic Press, 2013.