VITESSE DE GROUPE DE 450 KM/S DANS UN FORT RESEAU APODISE

George Skolianos,[1] Arushi Arora,[1] Martin Bernier,[2] Réal Vallée,[2] et Michel J. F. Digonnet[1*]

[1]Edward L. Ginzton Laboratory, 348 Via Pueblo Mall, Stanford University, California
[*]silurian@stanford.edu
[2]Center for Optics, Photonics, and Lasers (COPL), Université Laval, Québec G1K 7P4, Canada

RÉSUMÉ

Nous démontrons expérimentalement un retard de groupe de 11.3 ns dans un réseau de Bragg apodisé à forte modulation d'indice (0.0024) et faible perte (0.0076 dB) et de seulement 5.1 mm de longueur. Ceci correspond à une vitesse de groupe record dans une fibre de 450 km/s, et à un facteur de qualité Q de ~7.8×10^6. Ce résultat a été obtenu en inscrivant le réseau avec un laser femtoseconde dans une fibre chargée de deutérium et traitée thermiquement. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives d'applications des réseaux, en particulier en optique non-linéaire et en électrodynamique quantique.

MOTS-CLEFS : *réseaux de Bragg ; lumière lente ; vitesse de groupe ; facteur Q.*

1. INTRODUCTION

Les réseaux de Bragg photo-inscrits sont parmi les composants fibrés les plus critiques dans plusieurs domaines, tout particulièrement les capteurs, les lasers à fibres, et en télécommunication. Une application plus récente et encore peu explorée mais fondamentalement importante consiste à utiliser un réseau de Bragg comme un interféromètre à ondes multiples, auquel cas il peut produire des résonances extrêmement étroites. Au voisinage d'une telle résonance, la lumière est piégée et sa vitesse de groupe est très faible. Ces composants peuvent donner lieu à des applications intéressantes sur une plateforme compacte, robuste, thermiquement stable, et de fabrication peu coûteuse, y compris la génération de lumière lente en milieu fibré, des capteurs de contraintes aux sensibilités records, des cavités optiques à facteurs de qualité élevés, le stockage d'information, et les applications en électrodynamique quantique nécessitant des confinements optiques élevés.

La Fig. 1a montre le profil de modulation de l'indice d'un réseau fortement apodisé. Dans un tel réseau, la condition de Bragg s'écrit

$$\lambda_B(z) = 2(n_0 + \Delta n_{dc}(z))\Lambda \tag{1}$$

où n_0 est l'indice effectif du mode de la fibre avant l'inscription, Λ la période du réseau, et $\Delta n_{dc}(z)$ la moyenne locale de la modulation d'indice. Puisque Δn_{dc} dépend de la position z le long du réseau, la longueur d'onde de Bragg dépend également de z, selon la courbe pleine de la Fig. 1b. Pour une longueur d'onde de Bragg donnée, par exemple λ_{B1}, il y a deux positions le long du réseau, aux alentours de z_1 et z'_1, qui réfléchissent à λ_{B1}. Entre z_1 et z'_1 la longueur d'onde de Bragg est suffisamment différente de λ_{B1} pour que le réseau soit essentiellement transparent à λ_{B1}. Le réseau se comporte donc comme un interféromètre de Fabry Perot. Dans ce continuum de paires de longueurs d'onde de Bragg, il y a certaines paires ($i = 0$ à 3 sur la Fig. 1b) pour lesquels le chemin optique entre z_i et z'_i est tel que les multiples portions de champ électrique transmises par le réseau sont en phase, tout comme dans un Fabry Perot, et produisent une résonance en transmission. Dans un réseau uniforme, ces résonances existent également, mais elles ont une force limitée à cause de la forte réflexion du réseau entre z_i et z'_i (toutes les positions le long d'un réseau uniforme réfléchissent à la même longueur d'onde). Pour obtenir de fortes résonances, il faut donc que le réseau (1) soit apodisé, (2) ait de faibles pertes (comme dans tout résonateur optique), et (3) soit aussi fort que possible (un grand Δn_{dc}). Pour satisfaire ces conditions, il est préférable d'utiliser des réseaux fabriqués par laser femtoseconde, une technique qui produit des réseaux à bien moindres pertes que les réseaux photo-inscrits classiques [2], ainsi que des modulations élevées.

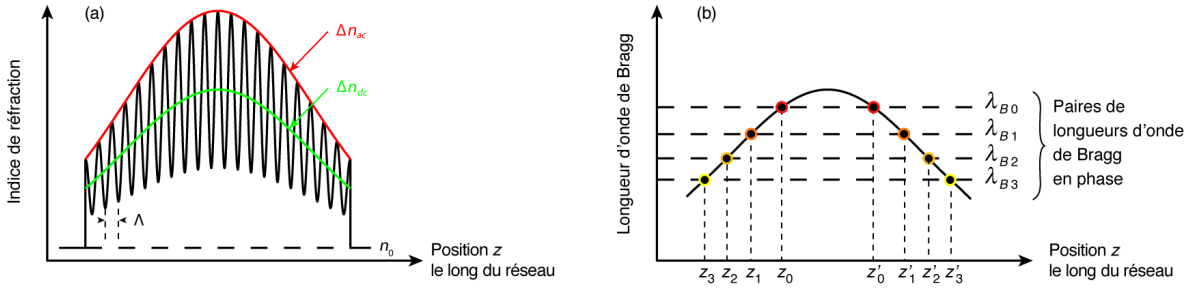

Fig. 1 : Profil d'indice d'un réseau apodisé, et condition pour l'existence de modes de Fabry Perot.

2. MESURES ET PROPRIETES

Les réseaux ont été fabriqués dans une fibre monomode de OFS, New Jersey. Cette fibre, semblable à la fibre SMF-28, a une gaine en polyimide afin de pouvoir traiter le réseau thermiquement (le polyimide résiste à des températures jusqu'à ~350°C). La fibre est d'abord saturée de deutérium dans une chambre pressurisée à 82 atmosphères à température ambiante pendant 14 jours. Les réseaux sont inscrits avec un laser Ti-sapphire vérouillé (806 nm) doublé en fréquence et un masque de phase, à travers la gaine afin de préserver l'intégrité mécanique du réseau. Afin de produire un réseau très court et fortement apodisé, la fibre n'est pas balayée par rapport au laser. Le traitement thermique consiste à chauffer le réseau à 100, 200, 300, et 350°C 30 minutes à chaque température. Après chaque palier, les spectres de transmission et de retard de groupe sont mesurés en utilisant un laser accordable et les principes décrits dans [1],[2]. En général, au cours de ce recuit la modulation d'indice Δn_{ac} diminue et les pics de transmission augmentent, alors que les pics de retard de groupe croissent puis décroissent au delà d'une certaine température.

Le spectre de transmission (cf. Fig. 2a) obtenu après le traitement à 300°C (traitement qui produit approximativement le retard de groupe le plus élevé) présente plusieurs résonances sur le bord et juste à l'intérieur de la bande interdite, du coté des courtes longueurs d'onde, et aucune résonance de l'autre coté, comme prévu pour cette forme d'apodisation [3]. Les résonances s'affinent vers le centre de la bande interdite. La largeur du pic de réflexion est de 2.5 nm ; elle est plus étroite que juste après la fabrication du réseau parce que le traitement thermique réduit la modulation de l'indice. Le pic de lumière lente le plus élevé a un retard de groupe de 11.3 ns et un indice de groupe de ~665, ce qui correspond à une vitesse de groupe de seulement 450 km/s. Cette valeur constitue un nouveau record pour une fibre optique. La largeur spectrale à mi-hauteur mesurée de cette résonance (~0.2 pm) donne un facteur de qualité $Q = 7.8\text{x}10^6$.

Ces spectres peuvent être simulés numériquement [3] si l'on connaît le profil $\Delta n_{ac}(z)$ du réseau. Si ce profil était proportionnel à l'énergie totale déposée pendant l'inscription, il aurait la même forme que le faisceau laser, une Gaussienne de largeur à mi-hauteur de 5 mm. Deux effets modifient ce profil : (1) la saturation du changement d'indice diminue la valeur maximum de $\Delta n_{ac}(z)$ autour du centre du réseau ; (2) puisqu'il y a un seuil d'intensité laser en dessous duquel l'indice n'est pas modifié, les bords du profil sont tronqués. Le profil a donc été modélisé comme une Gaussienne plus étalée que le faisceau laser et tronquée avec une sinusoïde (afin d'éviter de créer des oscillations artificielles). Nous avons supposé que Δn_{ac}, Δn_{dc}, et le profil des pertes du réseau ont la même forme spectrale (les pertes augmentent avec Δn_{ac}). Le bruit de détection a été tenu en compte en ajoutant -26.4 dB au spectre de transmission calculé. Nous avons simulé les spectres de transmission et de retard de groupe d'un réseau ayant ce profil et ajusté les paramètres du profil jusqu'à l'obtention du meilleur accord entre les spectres calculés et mesurés.

Le profil ainsi optimisé est montré sur la Fig. 2a. Le spectre calculé pour ce profil est en bon accord avec le spectre mesuré, pour la transmission (Fig. 2a) comme pour le retard de groupe (Fig. 2b). Chaque résonance est constituée de deux pics, un pour chaque mode de polarisation du réseau (les petits pics intermédiaires proviennent du bruit dans la détection synchrone). La largeur totale du profil est de 5.1 mm, proche de la largeur du faisceau. Cette optimisation suggère qu'au centre du

réseau $\Delta n_{ac} = \Delta n_{dc} = 2.42\text{x}10^{-3}$ et le coefficient de perte est de 0.34 m^{-1} (soit seulement 0.0076 dB). C'est une des plus faibles pertes mesurées dans un réseau si fort.

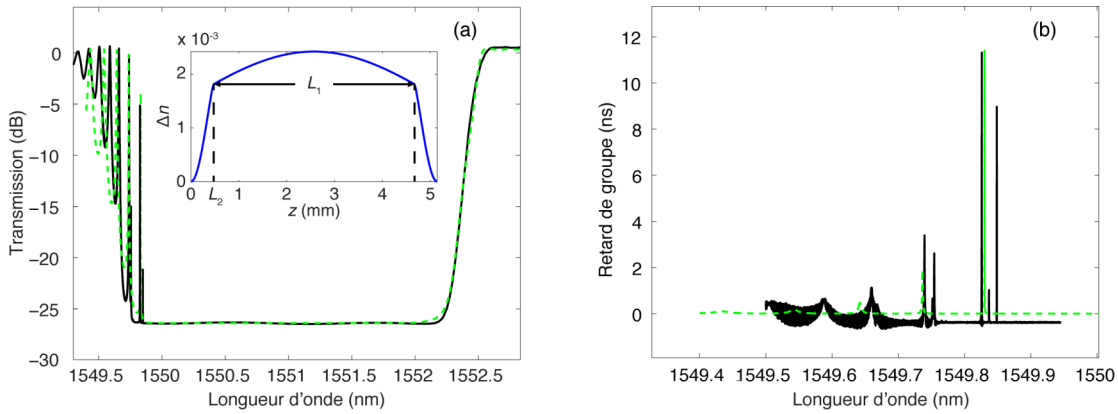

Fig. 2 : Spectres (a) de transmission et (b) de retard de groupe calculés et mesurés, et profil d'indice optimisé.

Ces simulations montrent également que la résonance la plus forte (la plus proche de λ_B) est le mode fondamental de la cavité Fabry Pérot qui existe au sein de ce réseau apodisé [1],[3]. Au voisinage de cette résonance, le champ électrique est donc concentré près du centre du réseau. Pour cette résonance, le facteur Q calculé est de $7.8\text{x}10^6$, en excellent accord avec la mesure. Le facteur de Purcell (importante métrique en électrodynamique quantique), $f = 3Q/(4n_0^3\pi^2V_m)$, où V_m est le volume du mode (calculé à partir de la distribution en intensité du mode), est de 25.52, une des valeurs les plus élevées publiées pour une fibre. Un réseau de ce type inscrit dans une fibre à fort $\chi^{(3)}$ fournirait le confinement nécessaire pour obtenir une conversion nonlinéaire très efficace. On s'attend à un bénéfice semblable pour un laser fait d'un tel réseau dopé avec des points quantiques.

Ces résultats ne représentent qu'une fraction des possibilités offertes par ces réseaux à lumière lente. Dans un autre réseau aux pertes encore plus réduites et de ~1 cm de longueur, nous avons observé un retard de groupe de 47 ns, soit un facteur Q de $2.5\text{x}10^7$. Cette valeur est comparable à ce qui a été observé dans des microsphères en silice [4], mais un réseau a l'avantage d'être beaucoup plus robuste et de couplage optique aisé. Dans un troisième réseau ayant une longueur de ~1 cm mieux adaptée aux pertes, nous avons mesuré une sensibilité à une contrainte longitudinale de $4.9\text{x}10^6$, soit plus de deux fois plus élevé que dans un réseau presque uniforme [2].

CONCLUSION

En utilisant un fort réseau apodisé de faible perte, nous avons ralenti expérimentalement la lumière dans une fibre jusqu'à 450 km/s, ce qui correspond à un retard de groupe de 11.3 ns sur une longueur de seulement 5.1 mm. Ce résultat a été possible en fabriquant le réseau avec un laser femtoseconde dans une fibre chargée de deutérium, suivi d'un recuit afin de réduire les pertes. Les spectres du réseau sont en bon accord avec la théorie. Ce réseau a une modulation d'indice de $2.42\text{x}10^{-3}$ et un coefficient de perte de seulement 0.34 m^{-1}. Ces travaux démontrent qu'il est possible de réaliser des structures résonantes ayant un grand facteur de qualité ($2.5\text{x}10^7$) avec un simple réseau, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour de nombreuses applications.

RÉFÉRENCES

[1] G. Skolianos, M. Bernier, R. Vallée, and M. J. F. Digonnet, "Observation of ~20-ns group delay in a low-loss apodized fiber Bragg grating," *Opt. Lett.* Vol. 39, No. 13, p. 3978, 2014.

[2] H. Wen, *et al.*, "Slow-light fiber-Bragg-grating strain sensor with a 280-femtostrain/√Hz resolution," *J. Lightwave Technol.* Vol. 31, No. 11, p. 1804, 2013.

[3] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *J. Lightwave Technol.* Vol. 15, p. 1277, 1997.

[4] D. W. Vernooy, A. Furusawa, N. P. Georgiades, V. S. Ilchenko, and H. J. Kimble, "Cavity QED with high-Q whispering gallery modes," Phys. Rev. A Vol. 57, R2293–R2296 (1998).