

Les nouvelles fibres optiques microstructurées ou à band gap photonique

Jimmy PICAUD, Université Lille Nord de France

7 février 2010

Dans cette note de synthèse, on restreindra l'étude des cristaux photoniques aux propriétés de guidage de la lumière dans des fibres optiques.

Introduction aux cristaux photoniques

On connaît et on utilise dans de nombreux domaines (optoélectronique, acoustique...) la structure du *miroir de Bragg*. En optique, cette structure permet de réfléchir presque parfaitement les ondes électromagnétiques d'une certaine gamme de fréquences en empilant régulièrement des couches de deux matériaux d'indices optiques différents n_1 et n_2 . Par analogie avec les structures de bandes des superréseaux utilisés en électronique, ce « saut » dans les longueurs d'ondes transmissibles a été baptisé *band gap photonique*, ou PBG^A.

L'idée est d'utiliser cette propriété de réflexion très performante pour assurer le guidage des ondes optiques. Pour ce faire, on généralise la structure du miroir de Bragg en deux dimensions. On a deux possibilités :

- Réseau de pores dans le matériau
- Réseau de tiges dans l'air

Au sein d'un tel matériau, on peut alors creuser des canaux qui assurent le guidage de la lumière.

Application : les fibres optiques microstructurées air-silice

L'idée consiste à utiliser ces nouvelles propriétés de guidage pour construire des fibres optiques. Les fibres optiques conçues à partir de ce type de matériaux artificiellement construits s'appellent les fibres optiques microstructurées, ou MOFs^B.

Les fabricants de fibres optiques classiques ayant beaucoup d'expérience dans la filière silice, les premières MOFs apparues, et aujourd'hui les plus répandues, sont des fibres *air-silice*. Un fabricant de MOFs est, par exemple, le danois NKT Photonics.

Dans les MOFs, le guidage peut être assuré par deux phénomènes physiques différents suivant la constitution de la fibre¹ :

- par TIR^C, comme dans les fibres classiques
- par effet PBG

Les MOFs basées sur la TIR sont des MOFs où le cœur est en silice et la gaine en silice trouée. On en dénombre plusieurs types, parmi lesquelles les fibres HNL^D ou les fibres LMA^E. Le guidage y est assuré par le fait que l'indice de réfraction moyen du cœur est supérieur à celui de la gaine.

À l'inverse, les MOFs basées sur l'effet PBG sont des MOFs où l'indice de réfraction moyen du cœur est inférieur à celui de la gaine. On en dénombre plusieurs types, le plus représentatif étant le HC^F, pour lequel le cœur est un creux d'air et la gaine est en silice trouée.

Fabrication

Un avantage de la fabrication des MOFs par rapport à la fabrication des fibres classiques est la suppression du traitement chimique de dopage de la silice, opération délicate qui détermine le profil de n et donc les propriétés de guidage de la fibre. En revanche, il faut réussir dans une MOF à donner à la silice une structuration submicronique sur de grandes longueurs. Comment faire ?

Le processus global a été présenté pour la première fois en 1996,² et a été amélioré depuis.³ On dispose pour construire une MOF d'un grand nombre de tubes capillaires de silice, préalablement fabriqués (creux, pleins...). Ces capillaires sont ensuite agencés suivant le type de fibre que l'on souhaite réaliser, et maintenus en position dans une gaine. Par diverses étapes de chauffage et d'étirement, on est ensuite capable de fusionner ces capillaires entre eux et d'allonger la fibre tout en rétrécissant sa structure diamétrale.

D'apparence très simple, ce procédé a toutefois nécessité l'acquisition d'un certain savoir-faire de

A. Photonic Band Gap

B. Microstructured Optical Fiber

C. Total Internal Reflection

D. Highly Non Linear

E. Large Mode Area

F. Hollow-Core

la part des fabricants, et ce à plusieurs niveaux : techniques de fabrication de ces fameux capillaires élémentaires, suppression de l'espace parasite entre les capillaires, maîtrise de l'influence de la température et de la pression sur le résultat final...

Propriétés

Les MOFs ont des propriétés modales intéressantes : elles permettent de garder un comportement monomode jusqu'à des fréquences plus élevées que les fibres classiques. On rapporte ainsi des MOFs monomode à des longueurs d'onde de 250 nm.⁴ Cette propriété est particulièrement intéressante pour les fibres optiques destinées aux télécommunications, où le besoin d'augmentation du débit trouve une réponse dans l'augmentation du nombre de canaux par multiplexage en longueur d'onde (WDM), et où l'apparition de plusieurs modes est une limitation.

Un autre paramètre physique fondamental, jouant également sur la qualité de la WDM, est la dispersion chromatique de la fibre. Là encore, les MOFs ont leur mot à dire puisque l'on sait contrôler leur dispersion chromatique en jouant sur les paramètres géométriques de la structure.⁵ Pour les télécommunications, on sait ainsi réaliser des MOFs de dispersion chromatique très faible. On sait également y contrôler et retarder l'apparition des effets non linéaires.⁶

En ce qui concerne l'atténuation, certaines structures de PCF arborent aujourd'hui des pertes de 0,18 dB.km⁻¹ (à comparer à 0,15 dB.km⁻¹ environ pour des fibres classiques).

Enfin, la configuration particulière de la structure permet de véhiculer des puissances lumineuses plus importantes que dans les fibres monomode conventionnelles.

Au final, dans un avenir proche, la technologie des fibres optiques microstructurées air-silice sera un candidat sérieux pour les transmissions optiques longue distance.⁷

MOF polymères : les MPOFs

Tout comme pour les fibres optiques classiques, une partie de la communauté scientifique s'attaque à la question de la réalisation de fibres microstructurées dans des matériaux polymères, pour des raisons économiques évidentes. On parle alors de MPOF^G. Cependant, ce domaine n'en est encore qu'à ses débuts et se heurte aux difficultés de la manipulation de polymères aux petites échelles.

Une réalisation récente est une structure de PMMA et de polystyrène, de 70 mm de diamètre,

composée de 631 fibres de diamètre 1,5 mm séparées de 1,8 mm et agencées de manière hexagonale.⁸ Dans cet exemple, on s'intéressait à une application en microscopie optique et non en télécommunications. Les caractéristiques dynamiques de ce type de fibre n'étaient donc pas les paramètres les plus importants, les auteurs de cet article s'intéressant surtout à la résolution du système.

Autres applications

L'accentuation des effets non linéaires le long de certaines MOFs (HNL) permet la génération de très nombreuses longueurs d'ondes au cours de la propagation. Ceci pourrait être utile en télécommunications, à l'heure où le multiplexage WDM prend une importance de plus en plus grande. La figure 1 montre une MOF dans laquelle un faisceau impulsionnel dans le proche infrarouge a généré toutes les longueurs d'ondes du visible.



FIGURE 1 – Supercontinuum⁹

Les MOFs à très grande dispersion pourraient également jouer un rôle en médecine, où ils permettraient de véhiculer des impulsions LASER femtoseconde (extrêmement brèves et puissantes) pour la chirurgie.

Licence Ce texte est publié sous les licences GFDL et CC-BY-SA 3.0 et antérieures.

Références

- [1] Bjarklev, A. ; Sánchez, A. ; Broeng, J. *Photonic crystal fibers* ; Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [2] Knight, J. ; Birks, T. ; Russell, P. S. J. ; Atkin, D. All-silica single-mode optical fiber with

^G. Microstructured Polymere Optical Fiber

photonic crystal cladding. *Optics Letters* **1996**, *21*, 1547–1549.

- [3] http://www.nktphotonics.com/files/images/technology_pcf_tutorial-03.jpg.
- [4] Yamamoto, N. ; Tao, L. ; Yalin, A. Single-mode delivery of 250 nm light using a large mode area photonic crystal fiber. *Optics Express* **2009**, *17*, 16933–16940.
- [5] Ferrando, A. ; Silvestre, E. ; Andres, P. ; Miret, J. ; Andres, M. Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers. *Optics Express* **2001**, *9*, 687–697.
- [6] Knight, J. ; Birks, T. ; Russell, P. S. J. ; de Sandro, P. Large mode area photonic crystal fibre. *Electronics Letters* **1998**, *34*, 1347–1348.
- [7] Matsui, T. ; Nakajima, K. ; Fukai, C. Applicability of Photonic Crystal Fiber With Uniform Air-Hole Structure to High-Speed and Wide-Band Transmission Over Conventional Telecommunication Bands. *Journal of Lightwave technology* **2009**, *27*, 5410–5416.
- [8] Kong, D. ; Wang, L. Ultrahigh-resolution fiber-optic image guides derived from microstructured polymer optical fiber preforms. *Optics Letters* **2009**, *34*, 2435–2437.
- [9] Auteurs : Blinking Spirit et Dimitris Papadopoulos. Image sous licences GFDL et CC-BY-SA 3.0.