

Les cristaux photoniques

Photonic Crystals

Jean-Michel LOURTIOZ, Institut d'Électronique Fondamentale (IEF), UMR 8622 du CNRS, Université Paris Sud XI, Bât. 220, 91405 Orsay, France. – e-mail: jean-michel.lourtioz@ief.u-psud.fr

Abstract

Photonic crystals represent one of the main routes towards integrated nanophotonics. In particular, two-dimensional photonic crystals have given birth to impressive realizations in semiconductors such as microguides, microcavities and microlasers with state-of-the-art performances. We review some of the decisive advances in this active field of research along with the underlying physics. We also show how photonic crystals can be used to manage the dispersion of light, thereby leading to slow-light, superprism and negative refraction effects. We finally consider periodic structures combining dielectrics and metals, the so-called metamaterials, as such structures could provide the simultaneous control of the dielectric permittivity and magnetic permeability. Their studies actually participate to a strong revival of plasmonics with the hope of truly sub-wavelength photonics.

Key words: [photonic crystals](#), [microcavities](#), [nanophotonics](#), [metamaterials](#), [plasmonics](#)

Abstract

Les cristaux photoniques représentent l'une des principales voies vers la nanophotonique intégrée. En particulier, les cristaux photoniques bidimensionnels ont donné naissance à des réalisations impressionnantes dans les semiconducteurs, telles que des microguides, des microcavités et des microlasers avec des performances à l'état de l'art. Nous faisons une revue de quelques progrès décisifs dans ce domaine en y incluant la physique sous-jacente. Nous montrons aussi comment les cristaux photoniques peuvent servir à contrôler la dispersion de la lumière, conduisant ainsi à des effets de lumière lente, de superprisme et de réfraction négative. Nous considérons finalement les structures périodiques combinant diélectriques et métaux, que sont les métamatériaux, car celles-ci pourraient permettre le contrôle simultané de la permittivité diélectrique et de la perméabilité magnétique. Leur étude participe, de fait, à un renouveau de la plasmonique avec l'espoir d'une photonique véritablement sub-longueur d'onde.

Mots clés : [cristaux photoniques](#), [microcavités](#), [nanophotonique](#), [métamatériaux](#), [plasmonique](#)

Introduction

Depuis les expériences pionnières de E. Yablonovitch *et al.* mettant en évidence une bande interdite photonique tri-dimensionnelle en micro-onde [1], le nombre d'études sur les cristaux photoniques a véritablement "explosé" [2]. Dans l'extension des travaux aux longueurs d'onde de l'optique, les chercheurs ont porté leur attention principale sur les cristaux photoniques 2D, car de fabrication plus facile que les structures 3D, mais aussi plus propices à une véritable intégration photonique à l'instar de l'intégration électronique. Aujourd'hui, force est de constater que le "tout-photonique" n'est pas une réalité, mais l'association de la nanophotonique et de la nanoélectronique est bien à l'ordre du jour, et les cristaux photoniques représentent l'une des voies majeures dans cette direction. Les progrès récemment accomplis sur les microguides, les microcavités et les microlasers à cristal photonique sont impressionnants et porteurs d'espoir à la fois pour les applications et des recherches plus fondamentales. Nous en faisons une brève synthèse dans la première partie de l'exposé. Au-delà de l'exploitation du concept de bande interdite photonique, les cristaux photoniques présentent aussi des propriétés remarquables de dispersion de la lumière. Les effets de superprisme, de ralentissement de la lumière ou de réfraction négative sont parmi les effets qui résultent de ces propriétés et qui permettent en retour de déboucher vers de nouvelles fonctions optiques et de nouveaux dispositifs. Nous les abordons dans la deuxième partie de l'exposé en considérant tout particulièrement les effets de réfraction négative, qui suscitent aujourd'hui un grand intérêt de la communauté scientifique. L'intérêt se porte notamment sur les métamatériaux qui offrent la perspective d'un contrôle simultané de la permittivité diélectrique et de la perméabilité magnétique. Dans la troisième partie de l'exposé, nous évoquons ainsi brièvement l'extension des métamatériaux aux fréquences optiques, et le renouveau de la plasmonique qui l'accompagne.

1. Composants semiconducteurs à cristal photonique bi-dimensionnel

Les cristaux photoniques (CP) 2D se présentent typiquement sous la forme d'un réseau périodique de trous gravés dans une ou plusieurs couche(s) semiconductrice(s). Le choix se porte le plus souvent sur un réseau de symétrie hexagonale, qui présente toujours une bande interdite photonique dans toutes les directions du plan pour au moins une polarisation du champ (TE, notamment). Cela étant, ce sont les modifications du

réseau (trous non gravés, trous de diamètre variable, etc.) qui vont permettre de réaliser les fonctions et composants optiques. La difficulté principale des CP 2D reste d'assurer le confinement optique dans la troisième direction de l'espace, la direction verticale. La solution standard de l'optoélectronique consiste à réaliser le CP dans un guide planaire multicouches avec un contraste modéré d'indice de réfraction entre couches. Le problème est alors de disposer d'un système de gravure profonde pour limiter les pertes par diffraction du CP. Une solution alternative est de réaliser le CP dans une membrane semiconductrice, suspendue dans l'air. Le contraste d'indice est alors élevé, un système de gravure standard peut être utilisé, et c'est avec cette solution qu'ont été obtenues les meilleures performances, autrement dit les pertes les plus faibles, pour les composants à CP 2D. La contrepartie est que les structures membranaires sont pénalisées par des effets accrus d'échauffement thermique et que la mise en œuvre d'une excitation électrique y est plus délicate. De ce point de vue, une troisième solution d'intérêt pour la nanophotonique silicium, en particulier, consiste à réaliser le CP dans la couche supérieure de silicium d'un substrat de SOI, laquelle forme un guide planaire confiné entre la silice et l'air.

1.1. Les microcavités

La microcavité optique est l'un des éléments de base pour les composants optiques, passifs ou actifs (filtres, lasers, commutateurs,...). L'intérêt majeur des microcavités à CP est que, non seulement elles peuvent être monomodes, mais elles présentent aussi les plus petits volumes de mode (V) comparées aux autres types de microcavités. La figure 1a montre l'évolution du facteur de qualité ($Q = \omega/\Delta\omega$) des microcavités à CP durant la dernière décennie. Grâce au développement récent des hétérostructures photoniques, il est possible d'atteindre des valeurs de Q supérieures à 10^6 pour des volumes de mode de l'ordre de $0,07 \mu\text{m}^3$ [3]. Une valeur élevée du rapport Q/V (et donc un facteur de Purcell élevé) peut conduire à un accroissement considérable du taux d'émission spontanée d'un émetteur en résonance avec le mode de cavité [2]. Toutes ces performances résultent véritablement d'une ingénierie des structures à l'échelle du nanomètre.

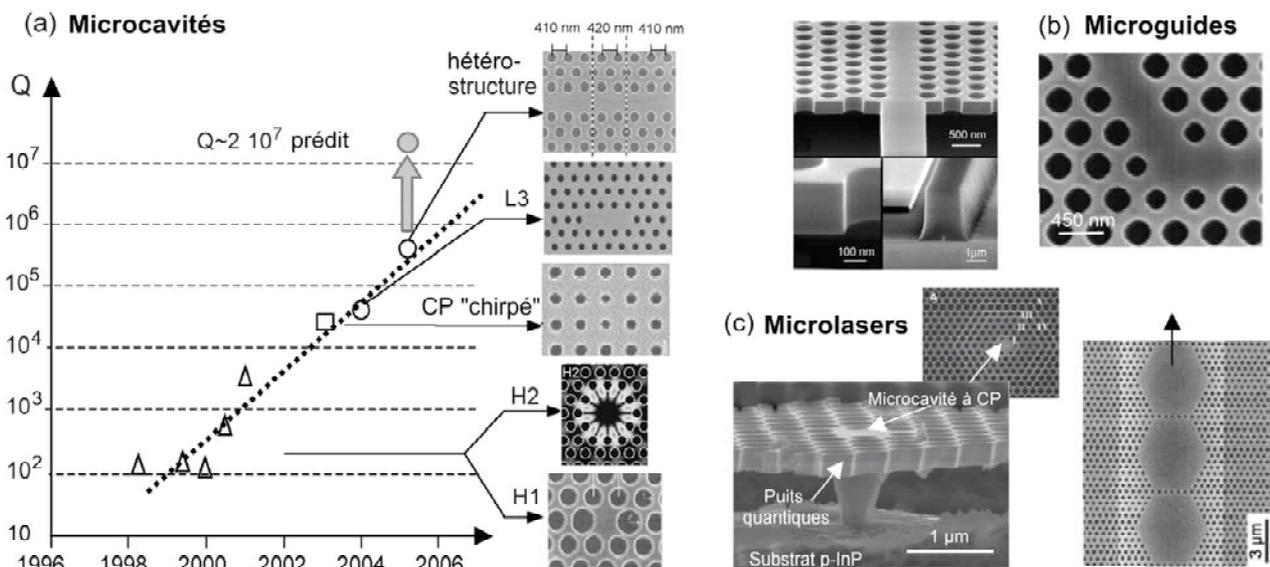


Fig.1 : Microcomposants à CP 2D. (a) évolution du facteur de qualité des microcavités à CP sur membrane, (b) microguide droit et coude de lumière réalisés sur membrane en silicium, (c) microlaser à émission verticale (à gauche) et microlaser à cavités couplées émettant par la tranche.

1.2. Les microguides

Le microguide est un autre élément de base de l'optique intégrée. La première application est évidemment de propager la lumière d'un point à un autre d'un circuit photonique. L'intérêt des guides à CP réside, ici aussi, dans leurs petites dimensions et le fait de pouvoir réaliser des "virages" de lumière à angle réduit. Comme pour les microcavités, des progrès considérables ont été réalisés au cours des dernières années. Les pertes de propagation de guides à une rangée de trous (fig.1b) sont inférieures à 5 dB/cm [4] et des coudes de lumière à 120° peuvent présenter une transmission de plus de 90% [5]. Rappelons qu'un centimètre est une distance considérable pour la nano-micro-photonique. Au-delà de ces performances, les guides à CP offrent aussi la possibilité de ralentir la vitesse de groupe de la lumière (voir 2.1).

1.3. Les microlasers

La source de lumière est le composant principal de l'optique. Différents types de microlasers à CP ont été réalisés dans les matériaux semiconducteurs III-V, utilisant soit le cristal photonique dans son ensemble (lasers à mode de Bloch [2]), soit une microcavité, soit encore un microguide. Dans les deux premiers cas,

l'émission laser a lieu verticalement, tandis que, pour les microguides, elle s'effectue dans le plan du cristal. Parmi les résultats récents marquants, on peut citer la réalisation d'un laser à microcavité, pompé électriquement et émettant vers $1,5 \mu\text{m}$ (fig.1c, à gauche [6]), et celle d'un laser guide d'onde à cavités couplées, délivrant une puissance continue de 2,3 mW (fig.1c, à droite [7]). L'obtention de seuils laser très bas et la réalisation de sources à photons uniques sont des objectifs qui mobilisent actuellement les chercheurs. La boîte quantique unique dans une microcavité à CP est l'un des schémas ultimes visés.

2. Contrôler la dispersion de la lumière avec les cristaux photoniques

Les propriétés originales de dispersion des cristaux photoniques résultent à la fois de la périodicité de la structure, de son anisotropie et du fort contraste d'indice entre le semiconducteur et l'air.

2.1. Le ralentissement de la lumière

La périodicité du cristal et l'existence de bandes interdites photoniques se traduisent par une forte courbure des caractéristiques de dispersion du cristal au voisinage de ces bandes. La vitesse de groupe de la lumière, $v_g = \nabla_{k_0} \omega(k)$, peut alors être considérablement réduite jusqu'à s'annuler en bord de bande interdite. Un ralentissement de la lumière par un facteur d'environ 100 a ainsi été mesuré dans des guides d'onde à CP [8]. Ralentir la lumière permet de renforcer son interaction avec le matériau et d'exalter des non linéarités optiques. Il est aussi possible de réaliser des lignes à retard optique de très petites dimensions. Un cristal photonique de $100 \mu\text{m}$ de longueur peut, par ailleurs, compenser la dispersion d'une fibre de 1 km !

2.2. La réfraction de la lumière

Dans un matériau homogène isotrope et pour une fréquence donnée, le module du vecteur d'onde est identique dans toutes les directions. Autrement dit, le contour isofréquence est circulaire (en 2D). Dans le cas des cristaux photoniques, qui sont fondamentalement anisotropes, le contour isofréquence peut avoir de multiples formes et de nombreuses situations peuvent se produire lorsqu'une onde incidente franchit l'interface entre un cristal photonique et un matériau homogène. Plusieurs de ces situations sont représentées en figure 2 en parallèle avec la "construction" de l'onde transmise à partir du contour isofréquence.

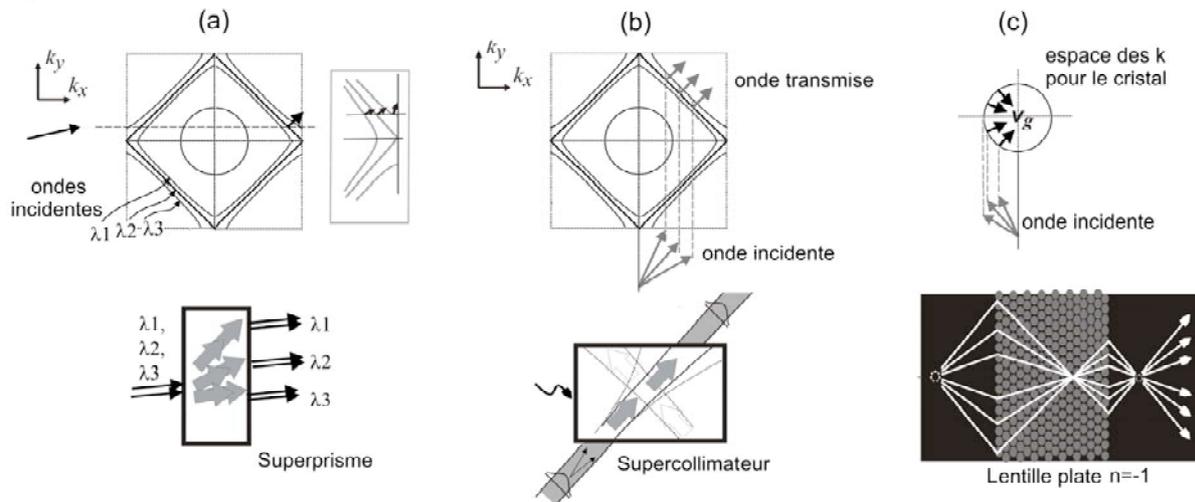


Fig.2 : Différentes situations de réfraction rencontrées dans les cristaux photoniques: (a) superprisme, (b) supercollimateur, (c) lentille plate et réfraction négative. Pour chaque situation, la figure du haut correspond à l'espace des k , celle du bas à l'espace réel.

Lorsque la construction de l'onde transmise se fait au voisinage d'un point anguleux du contour, on assiste à un effet de superprisme, une faible variation de longueur d'onde conduisant à une forte déviation angulaire [9]. À l'inverse, lorsque la construction met en jeu une partie plate du contour, un faisceau fortement divergent se retrouve collimaté, et l'on parle de supercollimation [10]. Enfin, il peut aussi arriver que le contour soit circulaire, mais avec la normale dirigée vers l'intérieur du contour. Tout se passe alors comme si le cristal photonique possédait un indice de réfraction négatif [11]. Lorsque l'indice vaut -1 , on peut alors réaliser une lentille "quasi-parfaite" à partir d'une lame mince de cristal photonique, celle-ci permettant de reproduire l'image d'une source ponctuelle en champ proche [12].

3. Des cristaux photoniques aux métamatériaux

La situation de réfraction négative, qui vient d'être évoquée, peut, en fait, se réaliser différemment. Si l'on est capable de fabriquer un matériau artificiel dont la permittivité électrique effective (ϵ) et la perméabilité magnétique effective (μ) sont toutes deux négatives, alors ce matériau possédera un indice de réfraction négatif. Cette idée avait été suggérée par V.G. Veselago dans un travail pionnier dès 1968 [13]. Un réseau

périodique de fils métalliques possède un "epsilon" négatif en basse fréquence. Un réseau d'anneaux métalliques coupés possède un "mu" négatif dans une fenêtre étroite de fréquence. C'est en combinant ces deux réseaux pour former un "métamatériau" que des chercheurs ont effectivement concrétisé la proposition de V.G. Veselago en 2001, obtenant pour la première fois un effet de réfraction négative dans le domaine des micro-ondes [14]. Le passage au domaine optique est aujourd'hui un véritable challenge. Les métaux présentent des pertes et l'obtention d'une réponse magnétique dans ce domaine n'est pas triviale. À ceci s'ajoutent les problèmes de fabrication, qu'heureusement les nanotechnologies résolvent peu à peu. Néanmoins, des progrès substantiels ont été obtenus récemment, aussi bien concernant la réponse magnétique de structures en optique que la perspective d'obtenir un indice de réfraction négatif. La figure 3 présentent quelques-unes de ces réalisations récentes.

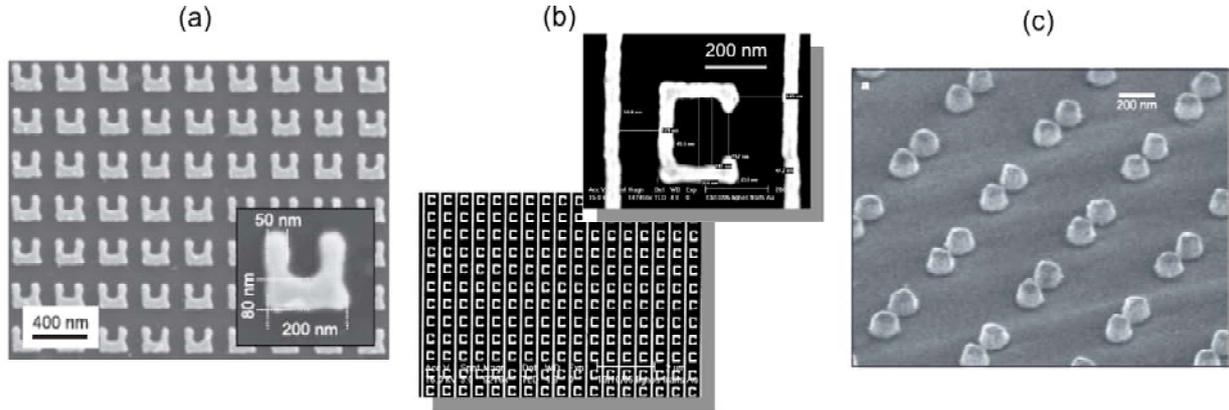


Fig.3 : Différentes structures de métamatériaux réalisées aux longueurs d'onde optiques: (a) réseaux d'anneaux métalliques [15], (b) réseaux d'anneaux et fils métalliques [16], (c) réseaux de paires de plots métalliques [17].

4. Conclusion

L'ensemble de résultats présentés précédemment de manière brève montre que le domaine des cristaux photoniques et des métamatériaux est en pleine effervescence. De nombreux champs exploratoires sont aujourd'hui ouverts. Le contrôle de l'indice de réfraction dans les cristaux photoniques à pas variable doit permettre de "courber" la lumière et créer des mirages optiques sur de très faibles distances [18]. Le contrôle simultané du "epsilon" et du "mu" permet d'imaginer des métamatériaux capables de rendre les objets invisibles [19]. L'utilisation de structures à base de matériaux magnétiques (la magnéto-photonique) ouvre la voie à de nouveaux effets d'optique non-réciproques. Enfin, l'utilisation de structures métalliques participe à un véritable renouveau de la plasmonique avec la perspective de composants optiques "très sub-longueurs d'onde", que l'on pourra peut-être intégrer un jour au niveau des transistors.

Références bibliographiques

- [1] E. Yablonovitch et al., Phys. Rev. Lett. (PRL) 67, 2295, 1991.
- [2] J-M. Lourtioz et al., Photonic Crystals, Ed. Springer, 2005.
- [3] T. Asano et al., Opt. Express, p.1996, 2006.
- [4] E. Dulkeith et al., Phys. Rev. B 72, p.115102, 2005.
- [5] S. Assefa et al., Opt. Lett. 31, p.746, 2006.
- [6] H-G. Park et al., Science 305, p.1444, 2004.
- [7] T.D. Happ et al., APL 82, p.4, 2003.
- [8] Y.A. Vlasov et al., Nature 438, p.65, 2005.
- [9] H. Kosaka et al., APL 74, p.1370, 1999.
- [10] H. Kosaka et al., APL 74, p.1212, 1999.
- [11] M. Notomi, Phys. Rev. B 62, p.10696, 2000.
- [12] J. Pendry et al., PRL 85, p.3966, 2000.
- [13] V.G. Veselago, Soviet Physics Uspekhi 10, 1968.
- [14] D.R. Smith et al., PRL 85, p. 2933, 2000.
- [15] C. Enkrich et al., PRL 95, p. 203901, 2005.
- [16] F. Gadot et al., J. Opt. Quant., à paraître, 2007.
- [17] A.N. Grigorenko et al., Nature 438, p.335, 2005.
- [18] E. Centeno et al., Phys Rev. B 73, p. 235119, 2006.
- [19] J. Pendry et al., Science 312, p. 1781, 2006.