



Comité National Français de Radioélectricité Scientifique

Section française de l'

Union Radio Scientifique Internationale

Siège social : Académie des Sciences, Quai de Conti – Paris

JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU CNFRS

" NANOSCIENCES ET RADIOÉLECTRICITÉ "

Lentille plane à base de cristaux photoniques : conception et fabrication

Photonic crystal based flat lens : design an fabrication

Olivier Vanbésien, Nathalie Fabre, Xavier Mélique et Didier Lippens

IEMN - UMR CNRS 8520

Université des Sciences et Technologies de Lille

Avenue Poincaré - BP 60069

59652 Villeneuve d'Ascq Cedex

(Olivier.Vanbesien@iemn.univ-lille1.fr)

Résumé

Dans cette communication, nous présentons les différentes étapes de conception et de fabrication d'un prototype à base de cristaux photoniques bidimensionnels permettant la focalisation d'une source divergente ponctuelle à l'aide d'une lentille plane, effet typiquement associé au régime de réfraction négative. Ce dispositif est conçu pour être caractérisé en microscopie optique de champ proche et les règles de conception intègrent les contraintes relatives à l'injection et à la collection de l'onde optique induites par la technique de mesure.

Abstract

In this paper, we show the successive steps of design and fabrication of a two dimensional photonic crystal based prototype which allows the focusing of a point source using a flat lens. The principle of operation relies on negative refraction effect. The device is conceived to be characterized using scanning near optical microscopy (SNOM) techniques and the design includes the proper requirements induced by the experimental set-up in terms of injection and collection of the optical wave.

Mots clés : Cristaux photoniques, Réfraction négative, Lentille plane.

Key words : Photonic crystals, Negative refraction, Flat lens

Introduction

Dans les domaines en pleine expansion de la nanophotonique et de l'optique intégrée, les cristaux photoniques continuent depuis plusieurs années maintenant à susciter l'intérêt des chercheurs pour leur potentialité à concevoir de nouvelles fonctions ultra-compactes [1]. Ces structures diélectriques artificielles, bi ou tridimensionnelles, exploitent les propriétés des structures de bande photoniques créées par l'arrangement périodique des différents matériaux constituants. Contrairement au guidage et au routage d'ondes optiques qui est généralement envisagé en combinant défauts locaux et étendus dans le motif de base, il s'agit ici d'exploiter un régime de réfraction négative en bande passante[2]. En effet, il a été montré que l'inversion de la courbure d'une bande photonique au voisinage d'un point particulier de symétrie de la première zone de Brillouin pouvait induire un régime de propagation dans lequel vitesse de phase et vitesse de groupe de l'onde optique étaient de signe opposé. Sous certaines conditions liées à l'isotropie du milieu de propagation, un indice de réfraction effectif négatif peut alors être défini et la loi de Snell-Descartes généralisée[3]. Focaliser, en champ proche, une source ponctuelle par un objet plan est alors envisageable,

ouvrant la voie à de nouvelles applications originales dans le domaine de l'optique intégrée. Depuis 2004, deux travaux expérimentaux [4-5] ont démontré clairement l'existence et la pertinence de cet effet, bien que l'on soit encore relativement éloigné des performances promises (résolution largement sous-longueur d'onde) par l'exploitation de la notion de réfraction négative et d'amplification des ondes évanescentes [3]. Dans ce travail, les différentes étapes de fabrication d'un prototype de focalisation planaire à base de cristaux photoniques bidimensionnels utilisés en régime de réfraction négative sont présentées. Le but poursuivi est de mettre en évidence l'effet de focalisation d'une lentille plane sur un dispositif caractérisable par une sonde optique en champ proche [6] et les règles de conception intègrent les contraintes relatives à l'injection et à la collection de l'onde optique induites par la technique de mesure. Dans la première partie, nous illustrons le concept et les effets d'un régime de réfraction négative dans un cristal photonique. La seconde partie illustre les étapes technologiques de fabrication d'une lentille planaire (système d'injection inclus) grâce à l'utilisation de la résine négative HSQ.

1. Réfraction négative dans les cristaux photoniques

En tirant parti de l'expérience acquise sur les cristaux photoniques, il s'agira d'inscrire un réseau bidimensionnel de trous d'air (diamètre de l'ordre de quelques centaines de nanomètres) dans une hétérostructure semiconductrice confinant la quasi totalité du champ électromagnétique et présentant potentiellement un indice de réfraction équivalent négatif à une longueur d'onde voisine de 1.5 μm . La première étape consiste donc à calculer la structure de bande du cristal (figure 1(a)), tracer les courbes iso-fréquence dans la première zone de Brillouin et d'isoler les points de fonctionnement présentant le maximum d'isotropie associés à un renversement de la concavité de la branche de dispersion, signature d'un régime pour lequel l'indice de réfraction est négatif (figure 1(b)). L'excitation d'un point situé sous le cône de lumière s'avère aussi déterminant. On pourra dans le cas des réseaux de type triangulaire, les trouver principalement en seconde bande autour de Γ . En première bande, mais pour un réseau incliné autour du point K, on peut aussi mettre en évidence de la réfraction négative. Le régime de fonctionnement plus complexe et ne fait plus intervenir d'indice de réfraction négatif pour se focaliser sur les directions des vitesses de groupe et de phase.

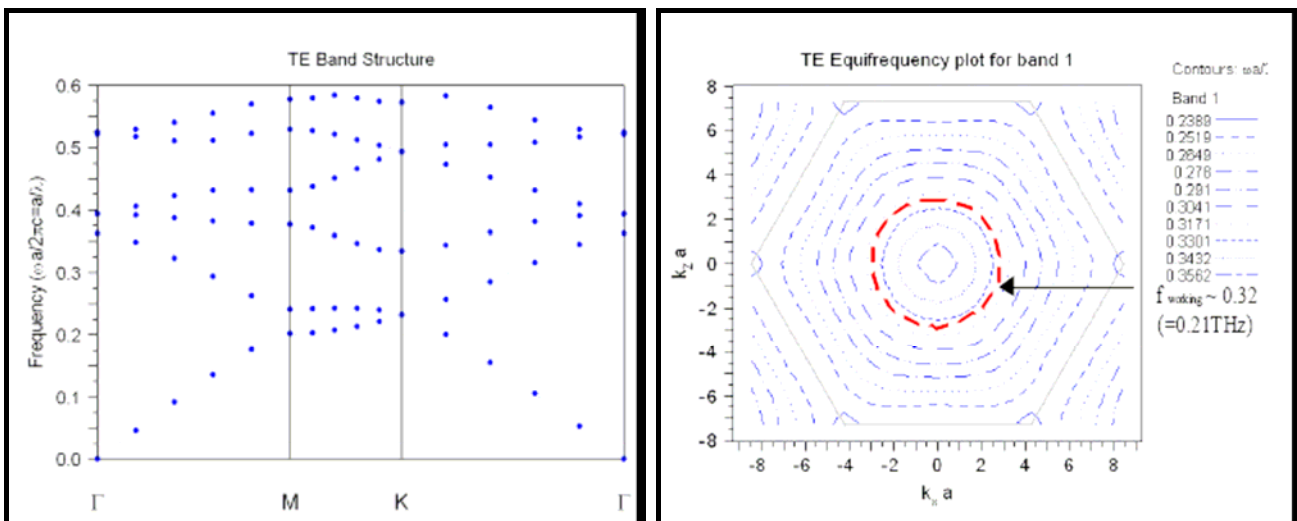


Figure 1. (a) Structure de bande d'un réseau triangulaire de trous d'air en polarisation TE (période $\sim 450 \text{ nm}$, coefficient de remplissage 45 %). Figure 1. (b) Contours iso-fréquences en seconde bande.

Pour la mise en évidence de la focalisation par une lame d'un tel matériau il faut créer une source d'énergie quasi-ponctuelle au voisinage de la surface de la lentille. La solution retenue ici consiste en un guide ruban gravé créé dans le même matériau que celui du cristal photonique. Le guide est terminé par un trou diffractant à optimiser permettant de créer le front d'onde circulaire propice à l'observation de l'effet de focalisation. Ce dernier est illustré sur la Figure 2. Sachant qu'il n'y a pas ici stricte égalité entre les indices respectifs du milieu incident et du cristal photonique, on peut observer des effets de réflexion à chacune des interfaces. Néanmoins, par une vision de type "chemins optiques" avant établissement du régime permanent, un rapport d'indice n_2/n_1 (lentille /air) de l'ordre de 1.5 peut être déduit. Des étapes d'optimisation supplémentaires pour minimiser les réflexions sont en cours. Le choix d'une taille "optimale" pour la source d'excitation sera déterminant pour mettre en évidence les potentialités d'imagerie sous la limite de diffraction de ce type de lentille.

2. Fabrication d'un prototype bidimensionnel de focalisation

Le prototype est fabriqué à partir d'un substrat d'InP dans lequel sera gravé un réseau de trous d'air. Pour obtenir le confinement optique dans la direction verticale, une hétérostructure constitue l'espace de confinement pour les photons. Il s'agit d'une couche guidante d'InGaAsP de 500 nm d'épaisseur, d'une couche d'InP au dessus de 200 nm réalisées sur substrat InP par épitaxie par jets moléculaires. Plusieurs techniques de gravure de semiconducteurs ont été développées pour la fabrication de composants électroniques. La gravure réactive ionique est parfaitement adaptée à la gravure des trous. Elle offre une bonne résolution latérale mais présente des vitesses de gravure relativement faibles qui limitent la profondeur de gravure à quelques microns. Ceci représente une difficulté technologique pour les structures en cristal photonique 2D (CP2D). A l'aide des études déjà menées au sein de notre équipe sur la réalisation de CP2D, la technique du transfert de masque sur nitrure s'est révélée être une bonne solution pour allier de bonnes propriétés d'anisotropie et des profondeurs gravées suffisantes. On dépose donc au préalable sur notre échantillon épitaxié 350 nm de nitrure. Lors de la gravure, cette technique permettra de maîtriser au mieux la taille et la forme des motifs. On dessine alors un réseau triangulaire de paramètre $a = 496$ nm constitué de cylindres de rayon $r = 356$ nm et un guide de $100 \mu\text{m}$ de long, $0,7 \mu\text{m}$ de large percé d'un trou de rayon 100 nm. Notre masque est réalisé par lithographie électronique sur de la résine négative : la HSQ (Hydrogen SilsesQuioxane). Cette résine a fait l'objet d'études, notamment sur les limites de résolutions obtenues sur des composants nanophotoniques tels que les guides optiques [7]. Cette résine présente plusieurs avantages qui sont : (i) sa haute résolution, (ii) un degré de viscosité qui nous permet d'obtenir des épaisseurs de résines adaptées à la gravure profonde, (iii) une simplification du procédé technologique grâce à un seul masque pour l'ensemble du prototype, guide ruban et réseau de trous

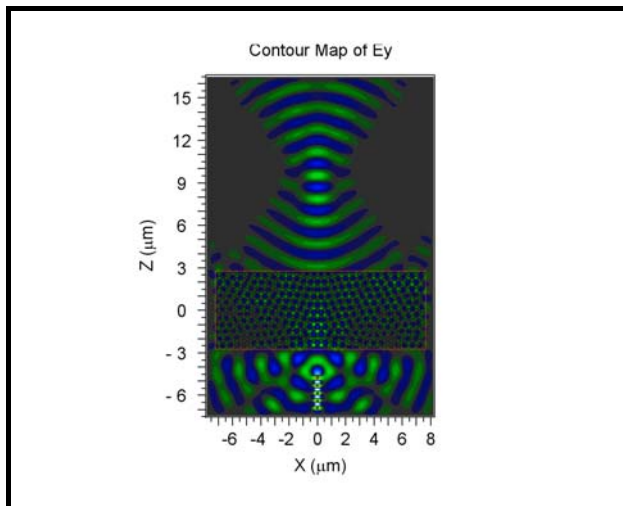


Figure 2. Effet de focalisation par une lentille planaire. (représentation des cartes de champ en fonction du temps pour illustrer la construction progressive des images de la source au sein de la lentille et à l'extérieur)

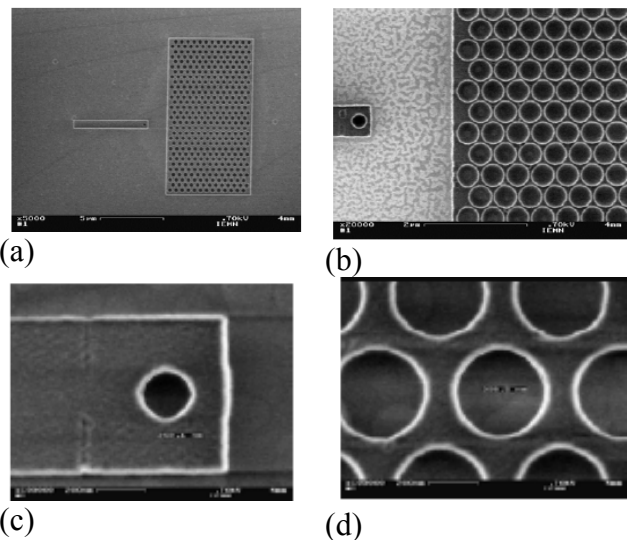


Figure 3. (a) Vues générales du prototype envisagé au MEB après lithographie électronique et révélation. (b) et (c - d) Vues rapprochées du guide incident et du réseau triangulaire après transfert de masque

Après lithographie électronique et révélation de l'échantillon dans le solvant, le masque correspond bien au motif désiré (figure 3(a)). A partir de ces images, on observe que : (i) le taux de remplissage en air de 46% est respecté, (ii) les trous sont bien circulaires et de diamètre homogène sur l'ensemble de la structure. Après le transfert de masque sur nitrure, l'examen des images des figures 3 (b) et (c-d) révèle que l'attaque du nitrure a bien eu lieu mais que les trous sont plus grands que ce qu'ils étaient censés être, 411nm de diamètre au lieu de 356 nm. Ce dernier paramètre devra être pris en compte dans l'élaboration d'un futur prototype pour être certain de conserver le fonctionnement prévu à $1.55 \mu\text{m}$, car pour le motif présent un glissement de la longueur de travail risque d'être obtenu. La gravure profonde des trous et la définition du guide ont été réalisées par gravure ICP (Inductively Coupled Plasma). Les résultats sont extrêmement encourageants (Figure 4) en termes de sélectivité, d'anisotropie et d'états de surface. Un facteur d'aspect de l'ordre de 8 a été obtenu.

Conclusion

La conception et les étapes de réalisation d'une structure en cristal photonique bidimensionnel (CP2D) exploitant la propriété d'indice de réfraction négative en bord de seconde bande permise ont été présentées. Les simulations FDTD ont clairement mis en évidence l'effet recherché à la longueur d'onde $1,55 \mu\text{m}$. Un

process utilisant la résine négative HSQ, permettant de limiter le nombre d'étapes technologiques, a été mis au point. Il devrait être possible de concevoir des prototypes exhibant un indice de réfraction négatif en fonction de la direction et de la fréquence de la lumière incidente en adaptant la géométrie et les paramètres caractéristiques du réseau de trous de la lentille. De toutes premières mesures SNOM de la topographie des structures ont été réalisées avec succès par Loïc Lalouat, du groupe de recherche de Frédérique de Fornel à l'Université de Bourgogne. L'étape ultérieure concernera la mise en évidence expérimentale de l'effet de focalisation. Au-delà de l'application de la " superlentille ", une grande partie des phénomènes physiques mis en jeu dans le concept de réfraction négative reste à analyser de manière plus approfondie permettant l'optimisation future du prototype : position de la source, taille de la lentille, problème à l'interface air/cristal photonique 2D...

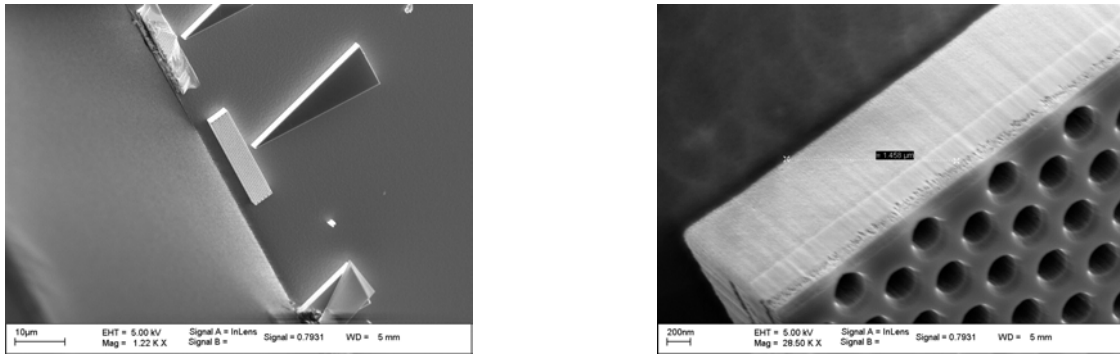


Figure 4 : Vues du prototype après les étapes de gravure ICP (sur la figure de gauche : on peut observer une nouvelle configuration triangulaire du guide destiné à injecter l'onde optique)

Références bibliographiques

- [1] Pour une présentation exhaustive des métamatériaux, Réseau d'excellence METAMORPHOSE, <http://www.metamorphose-eu.org/>
- [2] M.Perrin et al, *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics*, 7 S3-S11, 2005
- [3] J.B. Pendry, *Physical Review Letters*, 85(18) 3966 – 2000
- [4] A. Berrier et al, *Physical Review Letters*, 93(7) 073902, 2004
- [5] T. Matsumoto et al, *Optics Letters*, 31(18) 2786, 2006
- [6] B. Cluzel et al, *Applied Physics Letters* 85, 14, 2682-4, 2004
- [7] D. Lauvernier et al, *Microelectronics Engineering*, 75, 2004