

LES CRISTAUX PHOTONIQUES POUR L'OPTIQUE À GRADIENT D'INDICE

Fabian Gauffillet¹, Éric Akmansoy¹

¹ Centre de Nanosciences et Nanotechnologies - UMR 9001- université Paris-Sud - université Paris-Saclay, 91120 Palaiseau

eric.akmansoy@u-psud.fr

RÉSUMÉ

Nous avons conçus des lentilles à gradient d'indice à partir de cristaux photoniques.

MOTS-CLEFS : *Cristaux photoniques à gradient, optique à gradient d'indice, circuits photoniques*

1. INTRODUCTION

L'optique à gradient d'indice (GRIN Optics) connaît un renouveau, car elle optimise la conception optique en ouvrant de « *nouveaux degrés de liberté* » [1]. Jusqu'à récemment toutes les parties d'un système optique ont vu leur taille et leur poids réduits, exceptées les lentilles. L'optique à gradient d'indice permet d'envisager de réaliser tout profil d'indice. Celui d'une telle lentille varie avec les co-ordonnées. Néanmoins, le gradient d'indice est difficile à réaliser pratiquement. Ici, nous proposons d'obtenir ce gradient d'indice au moyen du gradient de facteur de forme de Cristaux Photoniques à Gradient (CPG). Le gradient d'indice de ces composants n'est dans ce cas pas discrétisé et les CPG peuvent être fabriqués, des micro-ondes à l'optique, par de nombreux procédés, par ex., la nano-lithographie. Ces composants sont à l'échelle de la longueur d'onde ce qui démontre leur capacité à contrôler la propagation du champ EM.

Nous avons conçus différentes lentilles à gradient d'indice : métallique ou diélectrique, lentille plate, lentille de Luneburg ou Maxwell Fish-eye [2, 3, 4, 5, 6], au moyen de Cristaux Photoniques à Gradient, car ceux-ci ont démontré leur capacité à « *courber le flux de la lumière* » via la courbure de leurs bandes photoniques [7]. La vitesse de groupe \mathbf{v}_g dans les Cristaux Photoniques (CP) est reliée au vecteur \mathbf{k} d'onde par la relation :

$$\mathbf{v}_g = \nabla_{\mathbf{k}} \omega(\mathbf{k}). \quad (1)$$

Le principe des CPG repose sur une faible variation d'un des paramètres de la maille élémentaire des Cristaux Photoniques comme le facteur de forme.

2. LENTILLE PLATE : *design* ET SIMULATION

La méthode de conception repose sur l'extraction de l'indice de réfraction effectif n_{eff} à partir des structures de bandes de CP ; pour la présenter, nous traiterons le cas de la lentille plate [2, 4], elle s'applique aux autres types de lentille. L'ingénierie des courbes iso-fréquence (IFC) — qui représentent la relation de dispersion à une fréquence donnée — permet de contrôler la direction du vecteur d'onde \mathbf{k} (cf. eq(1)). Lorsque les IFC sont circulaires, le CP peut être considéré comme un milieu Linéaire Homogène Isotrope. Nous avons alors calculé, avec notre code FDTD, les structures de bandes de CP pour différentes valeurs du facteur de remplissage η , dont l'expression est donnée, dans le cas de cylindres diélectriques, par :

$$\eta = \frac{\pi \times \phi^2}{4 \times S}, \quad (2)$$

où ϕ est le diamètre des cylindres et S est la surface de la maille élémentaire. Le schéma de principe de la lentille plate à gradient d'indice est donné à la figure 1.

De là, l'indice effectif n_{eff} peut-être déterminé à partir du rapport du rayon des IFC sur celui du *cône de lumière* (relation de dispersion du vide). D'où l'on tire la courbe de calibrage

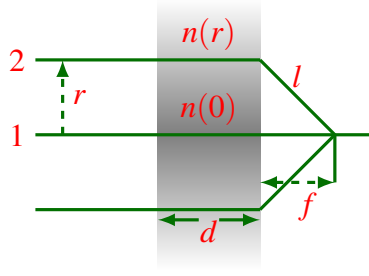


FIGURE 1 : Principe de la lentille plate à gradient d'indice : les deux chemins optiques 1 et 2 sont égaux. L'indice de réfraction vaut $n(0)$ le long de l'axe optique et $n(r)$ à la distance r .

$n_{eff} = n_{eff}(\eta)$, qui permet d'extrapoler le rayon des tiges constitutives du GPC correspondant au profil d'indice $n(r)$ de la lentille plate. D'après la figure 1, il est donné par :

$$n(r) = n(0) - \frac{\sqrt{r^2 + f^2} - f}{d}, \quad (3)$$

Puis, le GPC ainsi conçu est simulé grâce au code FDTD (fig. 2). L'épaisseur de la lentille est alors $d = 1.4\lambda$. Illuminée par une source ponctuelle située dans le plan focal objet, la lentille plate délivre une onde plane. Il focalise aussi une onde plane et la distance focale est d'environ 5λ . Dans le plan focal, la largeur à mi-hauteur du profil de la tache est $FWHM \simeq 0,7\lambda$ [4]. Puisque le gradient d'indice varie radialement, la lentille subit des aberrations sphériques et la tache focale n'est pas un point.

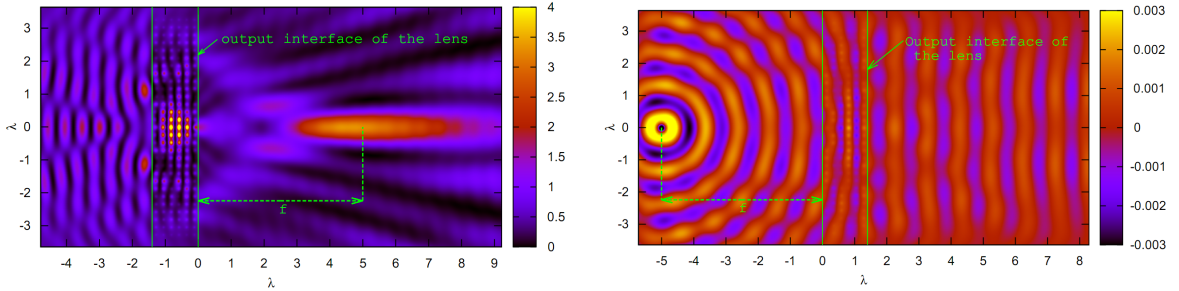


FIGURE 2 : Cartographie du champ EM à la fréquence normalisé $\omega = 0,233$; à gauche, focalisation (E_z^2) ; à droite, collimation (E_z). L'épaisseur de la lentille est $d = 1.4\lambda$ et la focale $f \simeq 5\lambda$ [4].

3. MAXWELL FISH-EYE

Le Maxwell Fish-Eye (MFE) est un dispositif optique dont l'indice varie radialement. Il a la propriété remarquable de former des images *parfaites* au sens de l'optique géométrique : tous les rayons lumineux issus d'un même point source situé à la surface du MFE convergent vers le même point image, situé sur la surface à l'opposé. Leur chemin optique est suivant des arcs de cercle et les fronts d'onde sont ainsi symétriques. Le profil d'indice du MFE varie, du centre vers le bord, suivant la relation :

$$n(r) = \frac{2}{1 + (r/R)^2}, \quad 1 \quad (4)$$

Nous avons conçu un MFE par la méthode précédente, puis simulé au moyen de notre code FDTD (cf. fig. 3(a)) [6]. Si la source se trouve à la surface du MFE, alors elle est imagée sur la surface à l'opposé, i.e. que ces deux points conjugués sont bien sur la surface. Le demi-Maxwell Fish-Eye tire parti de ces propriétés de symétrie et permet une émission directive ou de focaliser une onde plane incidente (cf. [6]). La lentille subit des aberrations sphériques et la tache

1. où r/R est le rayon normalisé.

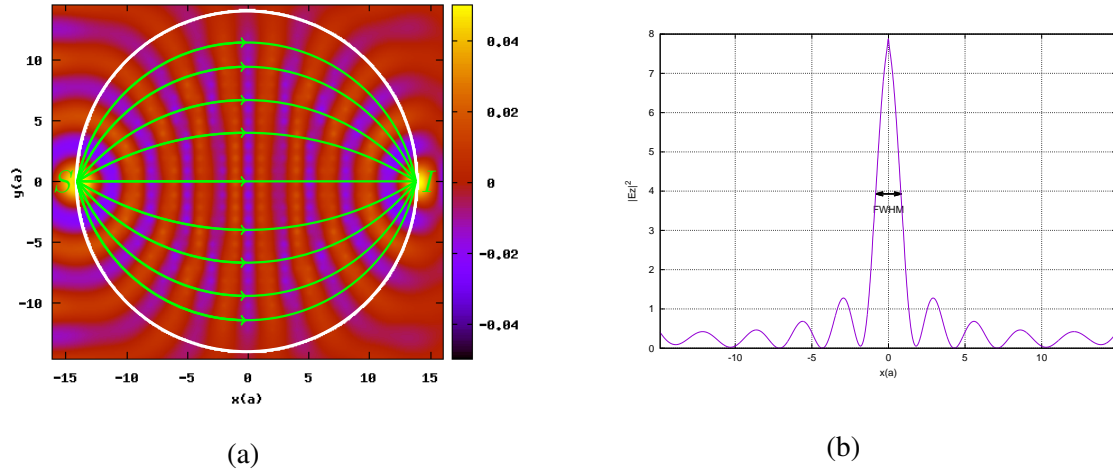


FIGURE 3 : (a) Maxwell Fish-Eye : cartographie du champ E_z à la fréquence normalisée $\omega = 0.21$. La source se trouve à la surface du MFE (à gauche). Elle est imagée sur la surface et à l'opposé (à droite). Les fronts d'onde sont symétriques. Le rayon du MFE est $R = 3\lambda$. Le chemin des rayons optiques est tracé en vert. (b) Half-Maxwell Fish-Eye : profil du champ électrique ($\overline{E_z^2}$) dans le plan focal du HMFE éclairé par une onde plane incidente à la fréquence normalisée $\omega = 0.21$ [6]

focale n'est pas un point [8]. Son profil a l'allure d'un sinus cardinal et sa largeur à mi-hauteur vaut $\text{FWHM} \simeq 0.35\lambda$, ce qui est moins que la longueur d'onde (cf. fig. 3(b)) [9].

4. CONCLUSION

Nous avons conçu et simulé des CPG dont le gradient de facteur de forme réalise le profil d'indice de différents composants optique à gradient d'indice. Ce gradient a été obtenu par une ingénierie des courbes iso-fréquences de cristaux photoniques. ce qui trouve application en télécommunications optiques ou microondes. Ces résultats montre la capacité d'un CPG à contrôler la propagation du champ EM sur quelques longueurs d'onde. Ces dispositifs sont à l'échelle de la longueur d'onde et applicables à la photonique intégrée, au « laboratoire sur puce », aux télécommunications sans fil, aux systèmes antennaires, etc.

RÉFÉRENCES

- [1] P. Milojkovic, S. Tompkins, and R. Athale, "Special section guest editorial : Gradient index optics," *Optical Engineering*, vol. 52, no. 11, pp. 112 101–112 101, 2013.
- [2] F. Gaufillet and É. Akmansoy, "Graded photonic crystals for graded index lens," *Optics Communications*, vol. 285, no. 10-11, pp. 2638–2641, MAY 15 2012.
- [3] —, "Design and experimental evidence of a flat graded-index photonic crystal lens," *Journal of Applied Physics*, vol. 114, no. 8, p. 083105, 2013.
- [4] —, "Design of flat graded index lenses using dielectric Graded Photonic Crystals," *Optical Materials*, vol. 47, pp. 555–560, SEP 2015.
- [5] —, "Graded Photonic Crystals for Luneburg Lens," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 1, FEB 2016.
- [6] —, "Maxwell fish-eye and half-maxwell fish-eye based on graded photonic crystals," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 1–10, June 2018.
- [7] É. Akmansoy, E. Centeno, K. Vynck, D. Cassagne, and J.-M. Lourtioz, "Graded photonic crystals curve the flow of light : An experimental demonstration by the mirage effect," *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 13, p. 133501, MAR 31 2008.
- [8] W. Jagger, "The optics of the spherical fish lens," *Vision Research*, vol. 32, no. 7, pp. 1271 – 1284, 1992.
- [9] C. Luo, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, and J. B. Pendry, "Subwavelength imaging in photonic crystals," *Phys. Rev. B*, vol. 68, p. 045115, Jul 2003.