
Sujet de thèse

Laboratoire : Institut Fresnel

Directeurs de thèse : Boris Gralak et Maxence Cassier

Email : boris.gralak@fresnel.fr

Adresse : Institut Fresnel, Domaine Universitaire de Saint Jérôme, 13397 Marseille

Tel : 06 82 93 52 74

Titre : Etude théorique et numérique des cristaux photoniques modulés en temps

Description :

Les métamatériaux sont des matériaux architecturés avec une structure bien choisie permettant des comportements macroscopiques inaccessibles avec des matériaux standards. Ces métamatériaux ont ouvert la voie à la physique de la réfraction négative et ont conduit à la construction de lentilles "parfaites" super-focalisantes [1], de capes d'invisibilité permettant de soustraire un objet à une onde électromagnétique [2, 3]

Cependant, dans les métamatériaux classiques, les propriétés accessibles pour le contrôle des ondes sont limitées par les principes de passivité, causalité et réciprocité [4]. La considération de matériaux en temps permet d'aller plus loin en dépassant les limites imposées par la passivité.

Les cristaux photoniques modulés en temps constituent une nouvelle classe de métamatériau. Une première étude, réalisée par John Pendry et ses collègues [5], a permis de montrer qu'un cristal modulé en espace et en temps de façon identique pour la permittivité et la perméabilité conduit à un système avec une non-réciprocité induite par la flèche du temps analogue à la traînée de Fresnel [5]. Cette étude s'appuie sur un modèle homogénéisé bianisotrope analogue à des travaux menés à l'Institut Fresnel [6]. Le plus souvent, cette variation temporelle est associée à une variation spatiale de la structure considérée (par exemple grâce à une métasurface) : on parlera alors de modulation spatio-temporelle [7], mais on peut imaginer de ne moduler qu'en temps, auquel cas un simple morceau de verre passerait de la transparence à l'opacité en créant des bandes interdites temporelles !

La notion mathématique de cristaux photoniques modulés en temps permet d'imaginer de nouvelles propriétés électromagnétiques et de contrôler les ondes de manière novatrice : propagation des ondes à sens unique, bandes interdites directionnelles, ou conversion de mode directionnelle. Ces matériaux très peu étudiés en optique en France constituent une thématique émergente et dynamique sur la scène internationale.

Les cristaux photoniques modulés en temps nécessitent un traitement théorique et numérique qui leur est dédié, donc la thèse consistera dans un premier temps à faire un état de l'art sur ces métamatériaux d'un nouveau genre et à analyser la nouvelle classe de relations

constitutives correspondante. Dans ce cadre , on traitera dans un second temps le cas d'un système monodimensionnel. Il s'agira ensuite de développer des modèles théoriques (asymptotiques et spectraux) et numériques (méthode des matrices de transfert [6]) adaptés à l'étude de cristaux photoniques en deux et trois dimensions. L'utilisation d'un logiciel d'éléments finis pourra aussi être envisagée pour des modulations plus complexes que celles de [5, 6] en années 2 et 3 de la thèse.

- [1] Pendry, J. B. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters* 85, 18 2000, 3966–3969.
- [2] Pendry, J. B. Controlling electromagnetic fields. *Science* 312, 5781, 1780–1782, 2006
- [3] Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., and Smith, D. R. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science* 314, 5801, 977–980, 2006
- [4] Cassier, M., Milton G. W., Bounds on Herglotz functions and fundamental limits of broadband passive quasistatic cloaking, *J. Math. Phys.* 58, 071504, 2017
- [5] P.A. Huidobro, E. Galiffi, S. Guenneau, R.V. Craster et J.B. Pendry, Fresnel drag in space-time modulated metamaterials, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 24943-24948, 2019
- [6] Y Liu, S Guenneau, B Gralak, Artificial dispersion via high-order homogenization: magnetoelectric coupling and magnetism from dielectric layers, *Proceedings of Royal Society of London A* 69, 20130240, 2013
- [7] C. Caloz et Z.-L. Deck-Léger, « Spacetime Metamaterials – Part I: General Concepts & Part II: Theory and Applications », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, 2020.