

Ingénierie des matériaux artificiels électromagnétiques : **cristaux photoniques et métamatériaux**

Didier LIPPENS

IEMN Université de Lille 1

Didier.Lippens@iemn.univ-lille1.fr

Le développement des techniques de micro-structuration des matériaux diélectriques et des composés métalliques permet actuellement un contrôle sans précédent de l'interaction des ondes électromagnétiques avec les matériaux artificiels. Nous illustrons ici l'ingénierie de telles structures de synthèse, capables de contrôler finement en module et en phase les grandeurs caractérisant la propagation et le rayonnement des ondes électromagnétiques. Ces structures permettent également d'introduire de nouveaux degrés de liberté dans les processus de réfraction, diffraction, collimation ou tout simplement de courbure des rayons par le biais de deux technologies clés : les cristaux photoniques et les métamatériaux. Plusieurs exemples relatifs à ces deux technologies sont présentés avec l'optimisation des performances de composants ultra-compacts en optique intégrée déjà développés par l'industrie et la proposition de nouvelles fonctionnalités telle que la réalisation de composants d'invisibilité au stade de recherches sur l'optique de transformation.

Cristaux photoniques versus métamatériaux

Les cristaux photoniques

La différence majeure entre les technologies cristaux photoniques (CP) et celles des métamatériaux (MM) porte avant tout sur l'échelle pertinente de la structuration, de l'ordre de la longueur d'onde pour les cristaux photoniques et très inférieure à celle-ci pour les métamatériaux. Rappelons également que les cristaux photoniques sont appelés matériaux à gap de photons (PBG pour *photonic band gap*) en optique ou à gap électromagnétique pour les hyperfréquences (radio fréquences et micro-ondes) [1]. Leur propriété essentielle, utilisée dans les applications actuellement développées dans l'industrie, est donc la présence d'une bande interdite (voir *encadré*) dans le diagramme de dispersion. Celle-ci interdit la propagation des ondes électromagnétiques pour une fréquence de fonctionnement située dans la bande interdite de la même manière que les ondes

électroniques dans les semi-conducteurs ne peuvent se propager dans la bande d'énergie comprise entre les bandes de valence et de conduction. Lorsqu'une onde ne peut se propager dans un milieu supposé sans pertes, cela équivaut à une réflexion totale de l'énergie incidente. Un cristal photonique dans sa fonctionnalité première peut donc être comparé à un miroir diélectrique (analogie avec le miroir de Bragg) dans une, deux voire les trois directions de l'espace. En conséquence, l'une des applications directes dérivant du principe du miroir de Bragg concerne les cavités photoniques et notamment les cavités 2D des dispositifs de l'optique intégrée pour les systèmes WDM (*wavelength division multiplexing*). Comme pour un miroir de Bragg, il existe une condition de construction interférentielle des ondes réfléchies partiellement et ceci quelle que soit la dimensionnalité du système 2D, 1D ou 0D, selon que les réflexions totales s'opèrent suivant une, deux ou les trois dimensions de l'espace. À cette fréquence de seuil, dite de Bragg,

les ondes sont évanescentes c'est-à-dire que la vibration électromagnétique pour reprendre un terme commun aux principes physiques des ondes, ne peut osciller spatialement en raison d'une très forte atténuation.

Le contrôle des ondes électromagnétiques, par le principe d'un gap de photons, passe donc par l'ingénierie des ondes évanescentes. En particulier, il est recherché un gap complet (c'est-à-dire présent dans l'ensemble des directions cristallines), ciblé dans une bande de fréquence spécifique telle que celle autour de 1,55 μm correspondant aux systèmes de télécommunications par fibre optique. Pour des matériaux à indice effectif négatif on recherche plus particulièrement l'amplification de ces ondes évanescentes.

Les métamatériaux

S'il existe une bande de fréquences pour laquelle les ondes sont évanescentes, cela signifie qu'en dehors de cette bande, il y a une transition vers un

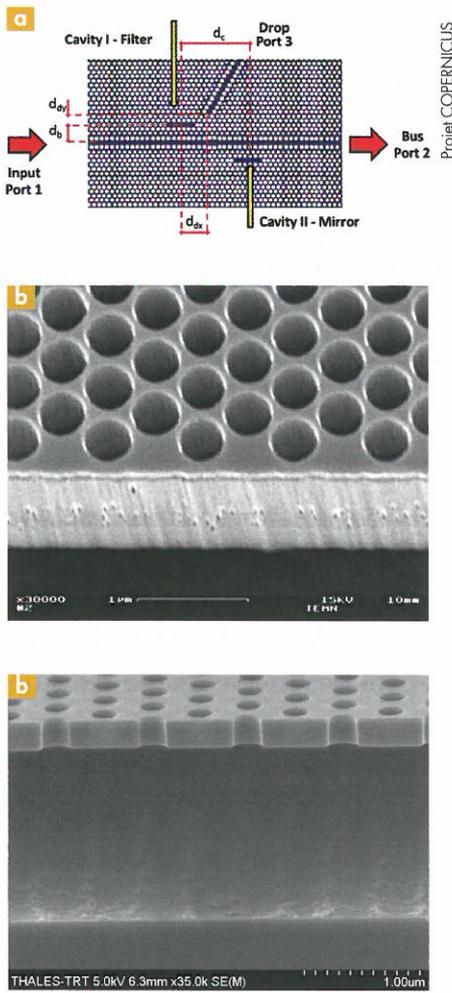


Figure 1. (a) Schéma d'implantation d'un dispositif de type *drop*, réalisé au sein du projet COPERNICUS. (b) Photographie au microscope électronique à balayage d'une structure à gap de photons bidimensionnelle sur substrat épais et sur membrane. (c) Illustration de la fonction d'extraction d'une longueur d'onde par filtrage ultra sélectif.

système dispersif. Ainsi le contrôle des fréquences de coupure à la propagation permet également l'ingénierie de la dispersion. C'est le cas notamment en seconde bande de la zone de Brillouin pour laquelle on peut définir une vitesse de groupe ($\partial\omega/\partial k$) de signe opposé à la vitesse de phase (ω/k). Les vitesses de phase et de groupe étant de signes opposés, il y a rétro-propagation des ondes et l'indice effectif est de valeur négative. Les métamatériaux [2] visent à privilégier ces effets singuliers par référence à la propagation conventionnelle des ondes pour lesquelles les vitesses de phase et de groupe sont de même signe.

Dans ce but, leur conception est essentiellement basée sur des effets de résonance des dipôles électriques et magnétiques induits par l'interaction

avec la lumière incidente. En effet, il faut se rappeler que dans tout phénomène de résonance, il y a un changement de phase de π impliquant une opposition de phase entre l'excitation et la réponse du matériau artificiel. C'est le principe physique de base des métamatériaux qui doivent satisfaire par ailleurs le critère de dimensions très inférieures à la longueur d'onde, énoncé plus haut. Pour cette raison, ils sont généralement fabriqués à l'aide de structures métallo-diélectriques assurant ainsi la convergence avec un autre domaine de l'optique : la plasmonique. Nous illustrons dans ce qui suit les deux volets introduits dans ce paragraphe avec l'ingénierie de bande interdite par les PC et de dispersion par le MM. Nous combinerons ces deux approches pour la réalisation d'un composant d'invisibilité.

Ingénierie de la bande interdite par les cristaux photoniques

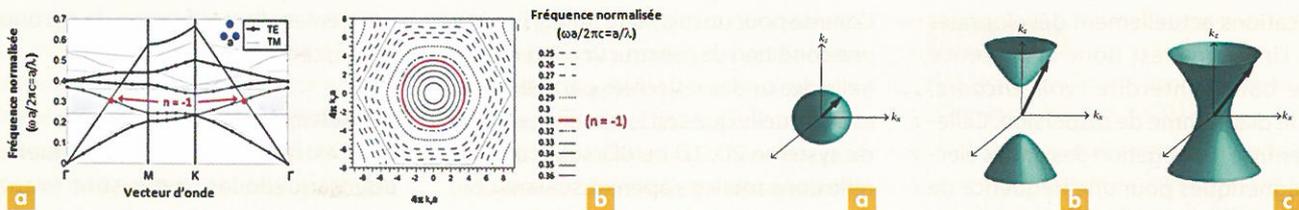
La figure 1 illustre un composant de multiplexage en longueur d'onde (*optical add drop multiplexer*) fabriqué en technologie cristaux photoniques. Ce composant est réalisé en assurant d'une part la localisation bidimensionnelle de l'énergie électromagnétique sur la base du principe de confinement par l'indice. La couche guidante, d'indice plus élevé,

Propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux structurés

Les différents modes de propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux structurés sont caractérisés par le diagramme de dispersion qui relie la partie réelle du vecteur d'onde ($k = 2\pi/\lambda$ avec λ la longueur d'onde) à la pulsation ($\omega = 2\pi/T$ avec T la période de l'onde incidente). La représentation ω en fonction de k permet de définir la vitesse de phase

$v_p = \omega/k$ et la vitesse de groupe $v_g = \partial\omega/\partial k$. L'indice effectif de réfraction (n_{eff}) est négatif lorsque les vecteurs v_p et v_g sont antiparallèles ($v_p \cdot v_g < 0$). La propagation dans l'air, caractérisée par la relation $\omega = ck$ définit le cône de lumière avec $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ correspondant à $n = 1$. Lorsque le vecteur k est purement imaginaire les ondes sont évanescentes. La

dispersion dans les matériaux artificiels complexes est par ailleurs caractérisée par le tracé des iso-fréquences dans l'espace des vecteurs d'onde. Les contours sont de forme sphérique pour les matériaux isotropes, ellipsoïdale dans le cas de matériaux anisotropes ou forment une hyperboloïde dans le cas des métamatériaux hyperboliques.



Ingénierie des matériaux artificiels : dispersion.

est obtenue soit grâce au dépôt d'hétéro-structures de semi-conducteurs telles que la double hétérojonction InP/InGaAsP/InP, soit à l'aide d'un support de type membrane (GalnP). La *figure 1b* montre les photographies prises au microscope électronique à balayage d'une structure sur substrat épais fabriquée à l'Institut d'électronique et de microélectronique et de nanotechnologies (IEMN) et sur membrane réalisée à Thales Research and Technology (TRT). Le confinement latéral est basé sur l'obtention d'une bande interdite dans les directions transverses par structuration (voir encadré). Cette structuration consiste à percer, par gravure ionique réactive, un réseau de trous dont les caractéristiques géométriques et l'indice effectif de la structure semi-conductrice composite, vont fixer la bande interdite. En l'occurrence ici vers $1,55 \mu\text{m}$ correspondant aux télécommunications optiques. Le guidage des ondes dans les directions transverses est effectué à l'aide de défauts linéiques. Le couplage sélectif en longueur d'onde des deux guides de lumière infrarouge, permettant soit d'ajouter (fonction *add*) soit d'extraire (fonction *drop*) une longueur d'onde donnée, est obtenu par une cavité photonique à très fort coefficient de qualité. L'exemple présenté à la *figure 1a* est issu du projet européen COPERNICUS coordonné par Thales Research and Technology [3]. La *figure 1c* montre les spectres en longueur d'onde des coefficients (S_{ij}) de la matrice de répartition du multi-pôle fabriqué pour la fonction *drop*. Rappelons que les paramètres S reflètent les coefficients de transmission et de réflexion entre les différents ports d'entrée et de sortie.

La transmission du port 1 vers le port 3 est maximale à la longueur d'onde de l'ordre de $1,56 \mu\text{m}$. Elle présente une grande sélectivité permettant d'éviter un recouvrement entre les différents canaux du système WDM.

Ingénierie de la dispersion par métamatériaux hyperboliques

La dispersion des matériaux artificiels peut également être caractérisée par les

iso-fréquences dans l'espace des vecteurs d'ondes (voir encadré). Les contours, avec pour paramètre la pulsation, en fonction des composantes k_x , k_y et k_z du vecteur k , exprimés en coordonnées cartésiennes, sont sphériques ou de forme ellipsoïdale pour un matériau diélectrique conventionnel isotrope ou anisotrope. Dans ce cas les termes du tenseur de permittivité sont positifs. En revanche, les contours iso-fréquences peuvent être décrits mathématiquement par une hyperboloïde de type I encore appelée *transverse positive hyperbolic meta-materials* (TN-HMMs) ou de type II dénommée *transverse negative* (TN-HMMs) suivant qu'une ou deux des composantes de ce tenseur prennent des valeurs négatives. Pour comprendre les conditions d'obtention de métamatériaux hyperboliques [4], rappelons que la dispersion des métaux suit une loi de type Drude $\epsilon_{\text{reff}} = 1 - (\omega_p/\omega)^2$ où ϵ_{reff} désigne la partie réelle de la permittivité effective, ω_p désigne la pulsation plasma du métal et ω la fréquence de fonctionnement. Pour les métaux utilisés en optique, notamment l'argent ou l'or, la fréquence plasma se situe dans l'ultraviolet. Ainsi pour un fonctionnement dans le visible ou en infrarouge proche (notamment à $1,55 \mu\text{m}$ correspondant à une fréquence d'environ 200 THz), on constate que les valeurs de permittivité sont négatives à la fréquence de travail par application de la relation donnée ci-dessus. À titre d'ordre de grandeur, la valeur réelle de la permittivité pour l'or est de l'ordre de 100 pour un fonctionnement en proche infrarouge. La réalisation de structures artificielles qui présente une dispersion hyperbolique passe donc par l'intégration de couches métalliques intercalées entre des couches diélectriques. L'épaisseur de ces différentes couches est très faible devant la longueur d'onde de fonctionnement satisfaisant le critère des métamatériaux, à savoir l'échelle pertinente très inférieure à la longueur d'onde. Dans ces conditions, la détermination de la permittivité du milieu stratifié, alternant couches métalliques et diélectriques, peut être effectuée en appliquant le formalisme du milieu effectif connu sous l'acronyme EMA (*effective medium approximation*). À titre



La Nouvelle famille IDRaman de Ocean Optics

Pour de l'Analyse Raman portable et à poste fixe



IDRaman mini



IDRaman micro



IDRaman reader

Contactez nos ingénieurs maintenant.

Tel: 02 96 05 40 20
info@idil.fr
www.idil.fr

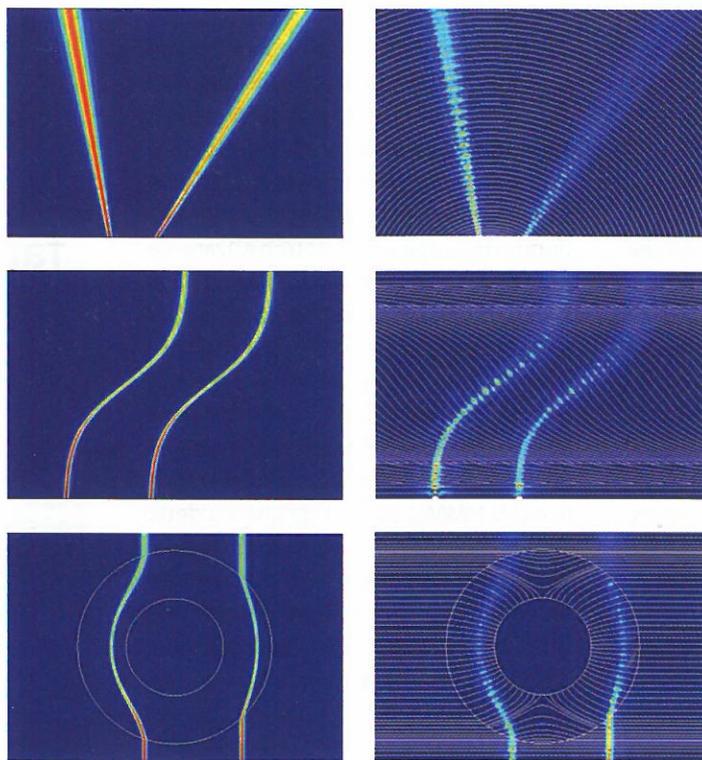


Figure 2. Illustration des effets de channeling, de routing et de cloaking.

d'illustrations tirées de la thèse de Charles Croëne soutenue à l'Université de Lille, la figure 2 montre les effets de channeling, de routing et de cloaking, les effets de canalisation par les métamatériaux hyperboliques correspondant à la partie a de la figure. De l'hyperbolicité des iso-fréquences, il résulte la possibilité d'obtenir des valeurs très grandes du vecteur k et donc des valeurs très petites de la longueur d'onde équivalente. Cette propriété est à la base de la recherche des systèmes d'imagerie à très haute résolution utilisant une hyper-lentille fabriquée par l'alternance de couches métalliques et diélectriques. À notre connaissance, la première publication montrant une résolution bien inférieure à la limite de diffraction, basée sur ce principe, a été publiée dans Science en 2007 [5].

Vers un composant d'invisibilité

Nous terminerons ce rapide panorama des possibilités nouvelles apportées par la structuration des matériaux artificiels en nous intéressant à un composant d'invisibilité. Par ce terme, on désigne un revêtement électromagnétique qui rend invisible un objet qui aurait été détecté sans la présence de cette cape d'invisibilité, pour reprendre un terme maintenant largement médiatisé. La figure 3 illustre un tel dispositif, qui fonctionne



en réflexion et non en transmission, développé dans le cadre d'une collaboration entre l'IEMN, l'université de Dijon et l'Institut Fresnel. Ce dispositif est connu dans

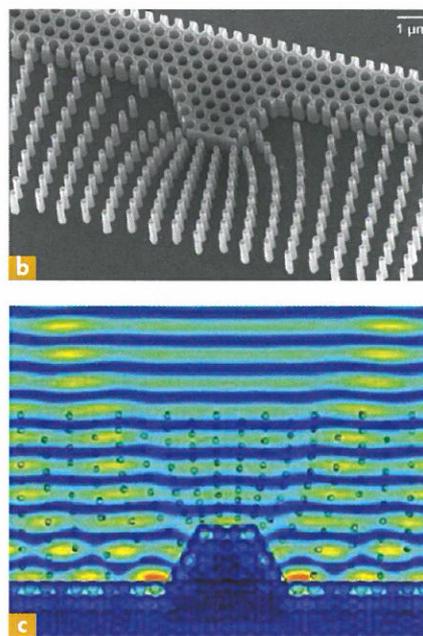


Figure 3. (a) Schéma de principe illustrant les technologies cristaux photoniques et métamatériaux utilisées pour la fabrication d'un dispositif d'invisibilité de type carpet Cloak [7]. (b) Photographie au microscope à balayage du dispositif correspondant et (c) vérification numérique de l'effet de cloaking.

la littérature anglo-saxonne sous le terme de *carpet cloak* en référence à l'article original de John Pendry [6] qui a été l'un des pionniers dans ce domaine (voir également les chapitres traitant de ce sujet dans la référence [2]). Il s'agit ici d'apporter l'illusion d'un réflecteur virtuellement plan, constitué par la structure en réseau de trous fonctionnant en bande interdite de la figure 3a, grâce à un réseau de piliers de diamètres très petits qui correspondent au revêtement de furtivité. À noter que le réflecteur considéré comme exemple (figure 3a) comporte une protubérance de forme trapézoïdale. Celle-ci entraînerait la diffusion des ondes incidentes réfléchies révélant

la présence de cet objet en l'absence du réseau de piliers. Une photo du dispositif fabriqué à l'IEMN en technologie InP sur substrat épais est donnée à la figure 3b. Les simulations numériques du dispositif basé sur l'optique de transformation [3] confirment le bien-fondé des règles de conception avec des plans de phase peu perturbés par la présence du centre diffuseur trapézoïdal. Ces résultats ont été confirmés expérimentalement par ailleurs par des études expérimentales par SNOM (*scanning near field optical microscopy*) [7].

Références

- [1] Photonics crystals (seconde édition), Jean-Michel Lourtioz (Springer, 2008)
- [2] Metamaterials and wave control waves series, Édité par E. Lheurette (Wiley, 2013)
- [3] <http://www.copernicusproject.eu/>
- [4] Hyperbolic metamaterials in five minutes, <http://www.youtube.com/watch?v=XnVVyTD7CzM>
- [5] Z. Liu *et al.*, *Science* **315**, 1686 (2007)
- [6] L. Li and J.B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 203901 (2008)
- [7] G. Scherrer *et al.*, *Phys Rev B* **88**, 115110 (2013)

