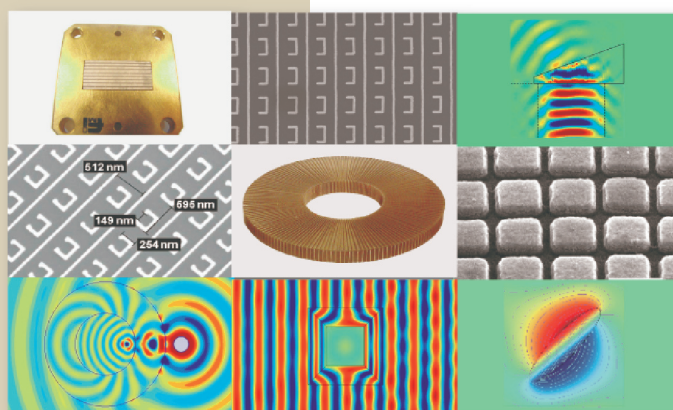


Colloque National Métamatériaux 2011



14 et 15 mars 2011

Auditorium
Pierre LEHMANN (LAL)
Campus d'Orsay
Bâtiment 200

Colloque National Métamatériaux 2011

L'Institut d'Électronique Fondamentale et le RTRA Triangle de la Physique organisent les 14 et 15 mars 2011 avec la participation du GdR Ondes, le Colloque National Métamatériaux, (CNM 2011) qui se déroulera sur le campus d'Orsay (Amphithéâtre Lehmann). Il s'agit de réunir, pour faire se rencontrer, l'ensemble des équipes, académiques, institutionnelles et industrielles, travaillant dans le domaine des métamatériaux. Il s'agira de couvrir le domaine en allant des micro-ondes à l'optique, de la théorie au dispositif. Ce colloque est le premier à réunir la communauté des «métamatérialistes» français. Les organisateurs remercient vivement le GdR Ondes, ainsi que les sponsors : le C'Nano Ile de France, l'Université Paris-Sud 11, la faculté des sciences d'Orsay et le CNRS - INSIS

Comité Scientifique :

David Cassagne (L2C - Université de Montpellier 2)

André Nicolet (Institut Fresnel - Université d'Aix-Marseille 3)

Anne-Claude Tarot (IETR - Université de Rennes 1)

Valérie Vignerat (IMS - ENSCPB - Université de Bordeaux 1)

Eric Lheurette (IEMN-Université de Lille 1)

Christian Seassal (INL - Université de Lyon 1)

Éric Akmansoy (IEF - Université Paris-Sud-11)

Stéphane Collin (CNRS/LPN - Marcoussis)

Aloyse Degiron (IEF - Université Paris-Sud-11)

Jean-Pierre Ganne (Thales - TRT)

Comité d'organisation :

Sylvie Durand (IEF - université Paris-Sud 11)

Anna Dacosta (RTRA Triangle de la physique)

Sébastien Sauvage (IEF - CNRS) pour les inscriptions

Aloyse Degiron (IEF - Université Paris-Sud-11)

Eric Akmansoy (IEF - université Paris-Sud 11)

Contact :

cnm2011.ief@u-psud.fr

Inscriptions & informations supplémentaires :

<http://cnm2011.ief.u-psud.fr/>

Lundi 14 mars 2011
Matin

09h30 - Accueil et programme des journées

10h00 - Ouverture

Session 1 - *Chairman* : David Cassagne

10h20 - [Didier LIPPENS](#), IEMN - Université Lille 1

Technologies des métamatériaux : des micro-ondes à l'optique

10h40 - [Geoffroy LEROSEY](#), Institut Langevin - UMR7587 – ESPCI

Métalentes résonnantes pour focaliser et imager en dessous de la limite de la diffraction

11h00 - [Mathieu KOCIAK](#), LPS-CNRS - Université Paris-Sud 11

Nanoplasmonique et nanophotonique avec des électrons rapides

11h20 - Pause café

Session 2 - *Chairman* : Éric Lheurette

11h40 - [Tatiana TEPERIK](#), IEF - Université Paris-Sud 11

Nano-antennes plasmoniques et métamatériaux actifs

12h00 - [Anne-Sophie BONNET-BEN DHIA](#), POEMS – ENSTA

Les problèmes mathématiques et numériques posés par la simulation des interfaces entre diélectriques et métamatériaux

12h20 - [Anne-Claude TAROT](#), IETR - Université de Rennes 1

Métamatériaux appliqués aux antennes

13h00 - Déjeuner

Après-midi

Session 3 - *Chairman* : André Nicolet

14h30 - [Didier FELBACQ](#), Laboratoire Charles Coulomb - Université Montpellier 2

Homogénéisation des métamatériaux métalliques et résonances électrostatiques

14h50 - [Tahsin AKALIN](#), IEMN, Université Lille 1

Plasmonique térahertz et métamatériaux

15h10 - [Gérard-Pascal PIAU](#), EADS Innovation Works

Intérêt des métamatériaux pour l'aéronautique civile et de défense

15h30 - Pause posters

Session 4 - *Chairman* : Jean-Pierre Ganne

16h30 - [Emmanuel CENTENO](#), LASMEA – Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand)

Les métamatériaux pour le contrôle de l'émission du second harmonique

16h50 - [Guy BOUCHITTÉ](#), IMATH – Université du Sud Toulon-Var

Homogénéisation du système de Maxwell 3D près des résonances et magnétisme artificiel

17h10 - [Fabrice BOUST](#), ONERA-DEMR

Surfaces Hautes Impédances pour le découplage d'éléments rayonnants

17h30 - Fin de la première journée

Mardi 15 mars 2011

Matin

09h00 - Accueil

Session 5 - *Chairman* : Valérie Vigneras

09h20 - Christophe SAUVAN, Institut d'Optique - Graduate School (Palaiseau)

Modes de Bloch dans les métamatériaux optiques de type « fishnet »

09h40 - Petru GHENUCHE, LPN/CNRS et ONERA

Diagrammes de dispersion à haute résolution de métamatériaux pour l'infrarouge

10h00 - Geoffroy SCHERRER, Groupe d'Optique de Champ Proche - Université de Bourgogne

Lentille plate à cristaux photoniques et ingénierie d'interface : investigation en champ proche optique

10h20 - Bruno SAUVIAC, LT2C - Université Jean Monnet, Saint-Etienne

Métamatériaux : des formes pour des applications

10h40 - Pause posters

Session 6 - *Chairman* : Christian Seassal

11h40 - Sébastien GUENNEAU, Institut Fresnel - UMR 6133 (Marseille)

Élastodynamique de transformation : invisibilité et focalisation dans des plaques structurées fines

12h00 - Alain BOSSAVIT, LGEP - CNRS - Université Paris-Sud 11

Métamatériaux, une difficulté pour la théorie de l'homogénéisation

12h20 - Kevin VYNCK, LENS

Métamatériaux à base de tiges diélectriques: comportement main-gauche et « états colliers » microscopiques

13h00 - Déjeuner

Après-midi

Session 7 - *Chairmen* : Stéphane Collin & Aloyse Degiron

14h30 - Ashod ARADIAN, Centre de Recherche Paul Pascal (CNRS - Université Bordeaux 1)

Métamatériaux dans la gamme térahertz à base de particules de TiO₂ résonnantes

14h50 - Andre BARKA, ONERA

Éléments finis haute performance pour la caractérisation électromagnétique de méta- matériaux : une alternative aux méthodes d'homogénéisation ?

15h10 - Nicolas MALLÉJAC, CEA Le Ripault

Ingénierie des matériaux magnétiques à l'aide de structures métamatériaux

15h30 - Bruno GALLAS, Institut des NanoSciences de Paris

Nanostructures 3D réalisées par dépôt en incidence rasante : une voie de synthèse pour les métamatériaux pour l'optique sur de grandes surfaces

15h50 - Guillaume DUPONT, Institut Fresnel - UMR 6133 (Marseille)

Métamatériaux pour les ondes de pression acoustique: invisibilité et lentilles

16h10 - Clôture

16h20 - Fin des journées

Exposés oraux invités

[E1](#) - **Didier LIPPENS**, IEMN - Université Lille 1, Villeneuve d'Ascq
Technologies des métamatériaux : des micro-ondes à l'optique

[E2](#) - **Geoffroy LEROSEY**, Institut Langevin - UMR7587, Paris
Métalentilles résonantes pour focaliser et imager en dessous de la limite de la diffraction

[E3](#) - **Mathieu KOCIAK**, LPS-CNRS, Orsay
Nanoplasmonique et nanophotonique avec des électrons rapides

[E4](#) - **Tatiana TEPERIK**, IEF, Orsay
Nano-antennes plasmoniques et métamatériaux actifs

[E5](#) - **Anne-Sophie BONNET-BEN DHIA**, POEMS, Paris
Les problèmes mathématiques et numériques posés par la simulation des interfaces entre diélectriques et métamatériaux.

[E6](#) - **Anne-Claude TAROT**, IETR - Université de Rennes 1, RENNES CEDEX
Métamatériaux appliqués aux antennes

[E7](#) - **Didier FELBACQ**, Laboratoire Charles Coulomb, Montpellier
Homogenization of metallic metamaterials and electrostatic resonances

[E8](#) - **Tahsin AKALIN**, IEMN, Lille 1 Univ, Lille
Plasmonique térahertz et métamatériaux

[E9](#) - **Gérard-Pascal PIAU**, EADS Innovation Works, Suresnes
Intérêt des métamatériaux pour l'Aéronautique civile et de défense

[E10](#) - **Emmanuel CENTENO**, LASMEA, Aubiere
Les métamatériaux pour le contrôle de l'émission du second harmonique

[E11](#) - **Guy BOUCHITTÉ**, IMATH, La Garde
Homogénéisation du système de Maxwell 3D près des résonances et magnétisme artificiel

[E12](#) - **Fabrice BOUST**, ONERA-DEMR, Palaiseau
Surfaces Hautes Impédances pour le découplage d'éléments rayonnants

[E13](#) - **Christophe SAUVAN**, Institut d'Optique, Palaiseau
Modes de Bloch dans les métamatériaux optiques de type "fishnet"

[E14](#) - **Petru GHENUCHE**, LPN/CNRS et ONERA, Marcoussis
Diagrammes de dispersion à haute résolution de métamatériaux pour l'infrarouge

[E15](#) - **Geoffroy SCHERRER**, Groupe d'Optique de Champ Proche - laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne - Université de Bourgogne, DIJON
Lentille plate à cristaux photoniques et ingénierie d'interface : investigation en champ proche optique

[E16](#) - **Bruno SAUVIAC**, LT2C, Saint-Etienne
Métamatériaux : des formes pour des applications

[E17](#) - **Sebastien GUENNEAU**, Institut Fresnel, Marseille
Élastodynamique de transformation : invisibilité et focalisation dans des plaques structurées fines

[E18](#) - **Alain BOSSAVIT**, LGEP, Gif-sur-Yvette
Métamatériaux: Une difficulté pour la théorie de l'homogénéisation

[E19](#) - **Kevin VYNCK**, LENS, Sesto Fiorentino
Métamatériaux à base de tiges diélectriques: comportement main-gauche et états colliers microscopiques

[E20](#) - **Ashod ARADIAN**, Centre de Recherche Paul Pascal (CNRS / U. Bordeaux), Pessac
Métamatériaux dans la gamme térahertz à base de particules de TiO_2 résonantes

[E21](#) - **André BARKA**, ONERA, Toulouse
Eléments Finis Haute Performance pour la caractérisation électromagnétique de Méta Matériaux: une alternative aux méthodes d'homogénéisation ?

[E22](#) - **Nicolas MALLÉJAC**, CEA Le Ripault, Monts
Ingénierie des matériaux magnétiques à l'aide de structures metamatériaux

[E23](#) - **Bruno GALLAS**, Institut des NanoSciences de Paris, Paris
Nanostructures 3D réalisées par dépôt en incidence rasante : une voie de synthèse pour les métamatériaux pour l'optique sur de grandes surfaces

[E24](#) - **Guillaume DUPONT**, Institut Fresnel, Marseille
Métamatériaux pour les ondes de pression acoustiques : invisibilité et lentilles.

Posters du Lundi

P1 - Metamateriaux à indice négative par hybridation de modes piégés

présenté par Redha Abdeddaim, Abdelwaheb Ourir, Julien de Rosny, Institut Langevin, UMR 7587 CNRS, ESPCI ParisTech, Paris

P2 - Etude théorique et expérimentale des structures nanométriques pour la conception de capteurs bio-plasmoniques

présenté par Ophélie Saison, Sabine Szunerits, Abdellatif Akjouj, Yan Pennec, Bahram Djafari-Rouhani¹, et Rabah Boukherroub, IEMN, Université de Lille 1, VILLENEUVE D'ASCQ

P3 - Fabrication de métamatériaux par évaporation contrôlée en microfluidique

présenté par Julie Angly, Jean-Baptiste Salmon, Jacques Leng, LOF, pessac

P4 - Méthode modale B-spline pour le calcul de structures sub-longueur d'onde

présenté par Patrick Bouchon, Fabrice Pardo, Riad Haïdar, Jean-Luc Pelouard, Laboratoire de Photonique et Nanostructures, Marcoussis

P5 - Quelques aspects théoriques du problème d'électromagnétisme en régime harmonique dans un milieu hétérogène diélectrique/métamatériau

présenté par Anne-Sophie Bonnet-Ben Dhia, Lucas Chesnel, Patrick Ciarlet, Ensta, POEMS, Paris

P6 - Réalisation de métamatériaux acoustiques par homogénéisation non périodique et développements asymptotiques raccordés

présenté par Abderrahmane BENDALI, Pierre-Henri COCQUET, Sébastien TORDEUX, Mathématiques pour l'Industrie et la Physique (MIP), Toulouse

P7 - Métamatériau à bande interdite électromagnétique reconfigurable par capillaires à plasma

présenté par Stefan Varault, Benjamin Gabard, Thomas Crépin, Jérôme Sokoloff, Sylvain Bolioli, ONERA, Toulouse

P8 - Apport de la bianisotropie dans l'apparition du comportement main gauche

présenté par Zine Eddine Djeflal, L2E, Paris

P9 - Cristaux photoniques en régime d'homogénéisation

présenté par Khanh-Van DO, Eric CASSAN, Xavier Le Roux, Charles CAER, Delphine MARRIS-MORINI, Laurent VIVIEN, CMO- Institut d'Electronique Fondamentale, Orsay cedex

P10 - Light and Matter Waves in the Presence of Negative Refraction Media: Unusual Properties and Applications

présenté par Vasily Klimov, Jacques Baudon, Martial Ducloy, Laboratoire de Physique des Lasers, Villetaneuse

P11 - Coupleur à métamatériaux obtenu par transformation d'espace

présenté par R.Ghasemi, P.-H. Tichit, A. Degiron, A. de Lustrac et A. Lupu, IEF, Orsay

P12 - Caractérisation électromagnétique des métamatériaux

présenté par Sandra Gómez, Patrick Quéffelec, Alexis Chevalier, Lab-STICC, Brest

P13 - Absorption quasi totale de la lumière et génération de la chaleur par des métamatériaux plasmoniques

présenté par Jiaming Hao, Min Qiu, Lei Zhou, Chengwei Qiu, and Said Zouhdi, LGEP, Gif-sur-Yvette

P14 - Réfraction négative des ondes longitudinales dans un cristal phononique élastique

présenté par Anne-Christine Hladky-Hennion, Charles Croëne, Jérôme Vasseur, Bertrand Dubus, Bruno Morvan, IEMN, Lille

P15 - Courbement des ondes électromagnétiques par gradient d'indice des métamatériaux à 1.55 μm

présenté par Maxence Hofman, Xavier Mélique, Olivier Vanbésien and Didier Lippens, IEMN, Villeneuve D'ascq

P16 - Les résonateurs de forte permittivité, des briques pour les métamatériaux diélectriques

présenté par Thomas Lepetit, Eric Akmansoy, Jean-Pierre Ganne, CEA Le Ripault, Monts

P17 - Design and Measurement of High Impedance Surfaces

présenté par Fabrice Linot, Richard Cousin, Xavier Begaud, Michel Soiron, Christian Renard, Telecom ParisTech, Paris

P18 - Evaluation by ultrasonic method of the effect of tempering treatment on mechanical properties of hardened steel

présenté par A. Markou¹, H. Nounah¹, M. Ezzaidi¹ and I. Aboudaoud¹, laboratoire de metrologie et de traitement de l'information, Agadir

P19 - Un Micro Résonateur à Métamatériaux Spirale

présenté par S. Nemer, B. Sauviac, B. Bayard, LT2C, St-Etienne

P20 - Métamatériaux entièrement diélectriques pour applications submillimétriques

présenté par Riad Yahiaoui, Valérie Vignéras, U-Chan Chung, Mario Maglione, Catherine Elissalde, Sylvain Lannebère, Ashod Aradian et Patrick Mounaix, LOMA et IMS, Talence

Posters du Mardi

[P21](#) - Techniques d'Hybridation pour la Réalisation de Méta-matériaux Isotropes et la Super-résolution

présenté par Abdelwaheb Ourir, Redha Abdeddaim, Julien de Rosny , Institut Langevin, UMR 7587 CNRS, ESPCI ParisTech, Paris

[P22](#) - Cristaux phononiques à résonances locales

présenté par Y. Pennec, H. Larabi, B. Djafari-Rouhani, A. Akjouj, G. Lévêque, IEMN Lille 1, villeneuve d ascq

[P23](#) - Auto-collimation et focalisation de la lumière dans des métamatériaux d'indice moyen nul.

présenté par Rémi Pollès, Emmanuel Centeno, Julien Arlandis, Antoine Moreau, LASMEA, Clermont-Ferrand

[P24](#) - L'auto-assemblage comme outil de fabrication : particules plasmoniques organisées dans des matrices polymère nanostructurées

présenté par Clémence Tallet, Julien Vieaud, Olivier Merchiers, Anitha Kumar, Frédéric Nallet, Ashod Aradian and Virginie Ponsinet, Centre de Recherche Paul Pascal, Pessac-Bordeaux

[P25](#) - Transmission exaltée par la résonance magnétique de cubes ferroélectriques à travers l'ouverture d'un plan métallique sous la coupure

présenté par Véronique Sadaune, Lei Kang, Éric Lheurette, Didier Lippens , IEMN, Villeneuve d'Ascq cedex

[P26](#) - Cavités sub-longueur d'ondes à métamatériaux pour des applications de compatibilité électromagnétique (CEM)

présenté par Divitha Seetharamdoo, Isacco Coccato, Marion Berbineau, IFSTTAR, LEOST, Villeneuve d'Ascq

[P27](#) - Effet d'une surface haute impédance sur l'impédance et le rayonnement d'une antenne dipôle sur silicium à 60 GHz

présenté par Romain Siragusa, Laurent Dussopt, Marc Ledieu, Roch Espiau de Lamaestre, CEA Leti, Grenoble

[P28](#) - Antenne RFID inspirée des métamatériaux pour amélioration de la distance de lecture

présenté par Maciej Smierzchalski, Kouroch Mahdjoubi, Sylvain Collardey, IETR, Rennes

[P29](#) - Calcul approximatif des coefficients de transmission et réflexion aux interfaces entre milieux périodiques

présenté par Wojciech Smigaj, Philippe Lalanne, Jianji Yang, Thomas Paul, Carsten Rockstuhl, Falk Lederer, Institut d'Optique, Palaiseau

[P30](#) - Augmentation de la sensibilité de détection par métamatériaux térahertz
présenté par Nadia Soltani, Éric Lheurette, Shengxiang Wang, Frédéric Garet, Karine Blary, Jean-Louis Coutaz et Didier Lippens , IEMN, Villeneuve D'ascq

[P31](#) - Métamatériaux basés sur des nano-éléments ferromagnétiques : du milieu efficace au comportement magnonique
présenté par A.A.Stachkevitch, LSPM, Villetaneuse

[P32](#) - Métamatériau à bande interdite photonique ajustable à base de réseau métal-diélectrique
présenté par Thierry Taliercio, Vilianne N'Tsame Guilengui, Jérôme Léon, IES-UM2-CNRS Montpellier, Montpellier

[P33](#) - Antennes large bande à onde de fuite à base de lignes de transmission composites main droite/ main gauche
présenté par Aïta Thior, Anne Claire Lepage, Xavier Begaud, Olivier Maas, Institut TELECOM - TELECOM ParisTech - LTCI CNRS (UMR 5141), Paris

[P34](#) - Ingénierie par transformation d'espace
présenté par Paul-Henri Tichit, Shah Nawaz Burokur, André de Lustrac, Institut d'Electronique Fondamentale, Orsay

[P35](#) - Compensation active des pertes résonantes de nanoparticules plasmoniques
présenté par Alessandro Veltri, Ashod Aradian, CRPP, Pessac

[P36](#) - Développement de filtres multi-spectraux dans l'infrarouge à base de structures plasmoniques
présenté par Benjamin Vial, André Nicolet, Frédéric Zolla, Mireille Commandré, Stéphane Tisserand, Institut Fresnel, Marseille

[P37](#) - Lentille métamatériau à gradient d'indice aux longueurs d'ondes des télécommunications
présenté par Shengxiang Wang, Lei Kang, Loudovic Burgnies and Didier Lippens, IEMN, Villeneuve d'Ascq cedex

[P38](#) - Métamatériaux compatibles avec les techniques de fabrication de masse pour applications en bande millimétrique
présenté par Riad Yahiaoui, Valérie Vignéras et Patrick Mounaix, LOMA et IMS, Talence

[P39](#) - Métamatériaux fishnet et ouvertures sub-longueurs d'ondes
présenté par Riad Yahiaoui, Hynek Nĕmec, Filip Kadlec, Christelle Kadlec, Petr Kužel et Patrick Mounaix, LOMA et IMS, Talence

[P40](#) - Modélisation directe 3D de métamatériaux et analyse effective
présenté par L. Le Cunff, L. Arnaud, S. Blaize, A. Vial, G. Léronel, S. Collin+, A. Lupu*, UTT ICD/LNIO, Troyes

Technologies des métamatériaux : des micro-ondes à l'optique

D.Lippens

Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologies, UMR CNRS 8520
Université des Sciences et Technologies de Lille, Avenue Poincaré, BP 60069
59652 Villeneuve d'Ascq , Cedex
Didier.lippens@iemn.univ-lille1.fr

Nous considérons ici les développements récents des technologies métamatériaux sur la base des travaux actuellement effectués dans le groupe Dispositifs Opto et Micro-Electronique quantiques (DOME) à l'IEMN. Ces études couvrent un large spectre allant des fréquences centimétriques et millimétriques à l'infrarouge et le visible. En micro-ondes, les travaux portent (i) sur les filtres métamatériaux ultra sélectifs (IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., 9 (2010) 256-259) (ii) les structures fishnet accordables par la biréfringence de composés cristaux liquides infiltrés (Appl. Phys. Lett., 97, 13 (2010) 134103) et (iii) sur le magnétisme artificiel par résonance de Mie dans des réseaux de cubes ferroélectriques (Phys. Rev. B, Condens. Matter, 80, 19 (2009) 195119-1-6). Les applications aux fréquences térahertz sont considérées par le biais (i) de réseaux de trous sous longueur d'onde, gauchers par couplage (Research highlight J. Appl. Phys., 107, 7 (2010) 074510) (ii) la réfraction négative pour des dispositifs prisme (Appl. Phys. Lett., 97, 18 (2010) 181902). Ces travaux sont effectués en collaboration avec le laboratoire IMEP/LHAC. Par ailleurs des structures chirales à très fort pouvoir rotatoire sont en cours de caractérisation expérimentale. Pour l'infra rouge et le visible, sont étudiées (i) les structures entièrement diélectriques dérivées des cristaux photoniques en collaboration avec l'Institut Fresnel et l'Université de Bourgogne (Appl. Phys. Lett., 97, 7 (2010) 071119) et (ii) les réseaux de piliers hybrides (nano-structures plasmoniques/diélectriques) basés sur les résonances de Mie. Les applications visées concernent la focalisation à haute résolution par lentille à gradient d'indice et l'imagerie par tomographie pour les cristaux photoniques (Appl. Opt., 49, 30 (2010) 5806).

Métalentilles résonantes pour focaliser et imager en dessous de la limite de la diffraction

Geoffroy Lerosey, Fabrice Lemoult and Mathias Fink

Institut Langevin, CNRS – ESPCI ParisTech, 10 rue Vauquelin, 75005, Paris, France

Ces dernières années, de nouveaux types de matériaux composites ont fait leur apparition dont les propriétés électromagnétiques diffèrent de leurs homologues naturels. Ceux-ci, dont la structure est périodique, peuvent être de type métamatériaux, c'est à dire qu'ils présentent une cellule élémentaire dont la taille est petite devant la longueur d'onde, ou de type cristaux photoniques auquel cas la taille caractéristique de la maille du réseau est de l'ordre de la demi longueur d'onde.

Les cristaux photoniques sont habituellement étudiés à l'aide de diagrammes de bandes, qui permettent d'en extraire leurs principaux traits : des domaines du spectre dans lesquels certaines (stop band) voir toutes (band gap) les ondes électromagnétiques ne peuvent se propager. De nombreuses utilisations peuvent être faites de ces bandes, telles que des filtres, des guides d'ondes, des cavités, ou encore de la réfraction négative.

Les métamatériaux, constitués de petits éléments résonants, sont quant à eux généralement interprétés en terme de milieux effectifs, c'est à dire qu'on en moyenne les propriétés locales pour obtenir des permittivité et perméabilité macroscopiques. Ils offrent également de nombreuses possibilités, dont les plus spectaculaires sont les milieux à indices de réfraction négatif ou encore les « capes d'invisibilité ».

A l'Institut Langevin, nous avons récemment montré dans le domaine du Gigahertz qu'un matériau constitué de fils conducteurs parallèles peut se comporter à certaines fréquences comme une « lentille à micro-ondes » qui permet de battre la limite de la diffraction [1,2]. Cela nous a permis de développer une approche originale hybride entre le domaine des métamatériaux et des cristaux photoniques, dont la clef de voûte est la cellule élémentaire qui constitue le matériau composite, et plus précisément son caractère résonant.

Durant notre exposé, nous expliquerons le mécanisme physique de ce nouveau type de lentille. Nous montrerons l'intérêt de ce type de systèmes en termes d'imagerie et de focalisation sub-longueur d'onde depuis le champ lointain. Nous montrerons que ce concept est très général au travers de quelques exemples étudiés au laboratoire, et tenterons de souligner les différences entre notre approche et celle des milieux effectifs couramment employée dans le domaine des métamatériaux.

1. Lerosey G., de Rosny J., Tourin A., and M. Fink. "Focusing beyond the diffraction limit with far-field time reversal", 2007. *Science*, **315**, 1120 (2007).
2. Lemoult, F., Lerosey, G., de Rosny, J. and Fink, M. "Resonant Metalenses for Breaking the Diffraction Barrier". *Physical Review Letters*, **104**, 203901, (2010).

Nanoplasmonique et nanophotonique avec des électrons rapides

M. Kociak*, G. Boudarham, L. F. Zagonel et O. Stéphan

Laboratoire de Physique des Solides (UMR CNRS 8502), Bâtiment 510, Université Paris-Sud, 91405, Orsay, France

*Correspondance: kociak@lps.u-psud.fr

La façon dont la lumière se comporte et interagit avec la matière à l'échelle nanométrique est un sujet passionnant. En effet, à l'échelle nanométrique, à la fois le champ électromagnétique ou les fonctions d'onde des électrons peuvent être confinés. C'est pourquoi les propriétés optiques des nano-objets en général dépendent fortement de leur forme, leur taille et de l'environnement local. C'est le cas pour les plasmons de surface dans les nanoparticules métalliques, qui peuvent être considérés comme des ondes stationnaires électromagnétiques classiques, et pour les excitons dans des émetteurs quantiques, pour lesquels le confinement concerne cette fois la fonction d'onde électronique. Obtenir des informations spectroscopiques à l'échelle d'une nanoparticule, ou au sein même de nanoparticules n'est pas simple parce que la résolution spatiale requise peut être un ou deux ordres de grandeur plus petite que la longueur d'onde équivalente de la lumière dans le vide. Cette information est toutefois cruciale dans de nombreuses applications (par exemple les biocapteurs pour les plasmons de surface ou les photodétecteurs pour les excitons). Les techniques utilisant uniquement des photons pour sonder les propriétés optiques des nanoparticules ont donc tendance à être très difficiles à utiliser. Une alternative consiste à utiliser des électrons rapides, en profitant du fait que la spectroscopie de perte d'énergie électronique (EELS) et la cathodoluminescence (CL) peuvent être considérées comme l'analogue nanométrique de l'absorption optique et de la photoluminescence, respectivement.

Dans cet exposé, je passerai en revue quelques résultats obtenus dans un microscope électronique en transmission à balayage (STEM) sur les propriétés optiques à l'échelle nanométrique de nanostructures métalliques et d'émetteurs quantiques. Dans une première partie, je vais décrire comment l'EELS dans un STEM peut être utilisée pour obtenir des images spectrales dans le domaine du visible avec des résolutions spatiales nanométriques sur des nano-objets métalliques [1]. Je ferai le lien entre le signal EELS et la quantité optique d'intérêt dans les expériences en champ proche optique, à savoir la densité d'états locale électromagnétique [2]. J'illustrerai l'intérêt de la technique sur des atomes photoniques de type "Split Rings Resonators" (SRR, voir figure) [3].

Dans une deuxième partie, je présenterai un système nouveau de CL que nous avons mis récemment au point. Je montrerais comment il peut être utilisé pour sonder les propriétés optiques d'émetteurs quantiques aux échelles pertinentes pour le confinement quantique - généralement quelques nanomètres. Ce sera illustré par des résultats récents sur des nanofils nanostructurés de GaN/AlN [4].

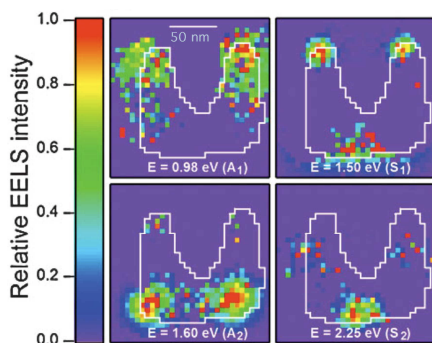


Figure 1 : Cartographie des intensités EELS d'un SRR d'argent pour les quatre premiers modes propres électromagnétiques

Travaux menés en étroite collaboration avec J. Garcia de Abajo (CSIC, Madrid), N. Feth et M. Wegener (KIT, Karlsruhe), M. Tchernycheva, L. Rigutti, F. Julien (IEF, Orsay) et R. Songmuang (Institut Néel, Grenoble)

- [1] J. Nelayah et al., Nature Physics, 3, 348 (2007)
- [2] J. Garcia de Abajo and M. Kociak, Phys. Rev. Lett., 100, 106804 (2008)
- [3] Boudarham et al. Phys. Rev. Lett., 105, 255501 (2010)
- [4] L. Zagonel et al. Nano Letters asap 10.1021/nl103549t (2010)

Nano-antennes plasmoniques et métamatériaux actifs

T.V. Teperik et A. Degiron

Institut d'Electronique Fondamentale, Université Paris-Sud 11, UMR 8622 CNRS, Orsay F-91405, France

Les métamatériaux sont des structures artificielles qui permettent de réaliser des propriétés électromagnétiques entièrement nouvelles. Après une décennie très fructueuse consacrée au développement de structures passives (milieux à indice de réfraction négatif, capes d'invisibilité...) la recherche actuelle s'oriente de plus en plus sur l'étude de métamatériaux actifs. Dans cet exposé, nous présenterons nos résultats théoriques sur le contrôle de l'émission spontanée de sources ponctuelles de type boîtes quantiques par un métamatériau métallique planaire. Nous montrerons notamment que les cellules élémentaires des métamatériaux métalliques peuvent s'assimiler à des nano-antennes optiques qui influent sur les propriétés des émetteurs. Nous discuterons en particulier le cas d'anneaux d'or de taille fortement sub-longueur d'onde et montrerons qu'ils permettent d'exalter la luminescence d'émetteurs dipolaires émettant dans le proche infrarouge et de modifier leur diagramme de rayonnement. Nous verrons que ce phénomène repose sur l'excitation d'un mode plasmonique à la surface de l'anneau qui permet d'extraire plus de puissance de l'émetteur par effet Purcell. De plus, cette exaltation peut être rendue spectralement indépendante de l'orientation et de l'emplacement précis de l'émetteur dipolaire par rapport à l'anneau, ce qui présente un grand avantage pratique puisque ces paramètres sont habituellement très difficiles à contrôler expérimentalement. Ces résultats suggèrent qu'il est possible de réaliser des sources de lumière infrarouge ultra-compactes en hybridant un métamatériau métallique avec une couche de boîtes quantiques semi-conductrices.

Les problèmes mathématiques et numériques posés par la simulation des interfaces entre diélectriques et métamatériaux.

*Anne-Sophie Bonnet-Ben Dhia, Lucas Chesnel, Patrick Ciarlet
POEMS (UMR CNRS-INRIA-ENSTA), Paris*

Nous nous intéressons à la résolution d'un problème d'électromagnétisme en régime fréquentiel, lorsque le milieu de propagation réunit des matériaux classiques, à permittivité diélectrique et perméabilité magnétique réelles positives, et des métamatériaux modélisés par des permittivité diélectrique et perméabilité magnétique réelles négatives. Ce changement de signe des deux constantes qui caractérisent le milieu fait que les théorèmes mathématiques classiques ne s'appliquent plus, de même que les résultats prouvant la convergence des méthodes numériques usuelles.

Notre travail consiste à essayer d'étendre les résultats classiques à la situation présente, pour montrer que le problème posé admet une solution, dans les espaces généralisant les espaces usuels, formés des champs électromagnétiques d'énergie finie. Plus précisément, on montre que le problème relève de l'alternative de Fredholm. Dans le cas contraire, il s'agit de comprendre pourquoi le problème est mal posé et, si possible, de proposer un nouveau cadre dans lequel il deviendrait bien posé.

Les résultats dépendent de deux données : la régularité de l'interface entre le matériau positif et le matériau négatif, et les valeurs des contrastes des permittivités diélectriques et des perméabilités magnétiques sur cette frontière (autrement dit les ratios des quantités prises de part et d'autre de la frontière).

Ainsi par exemple, on montre que si la frontière est régulière (c'est-à-dire qu'elle ne présente pas de points anguleux) et si les contrastes sont différents de -1, tout se passe comme pour des matériaux classiques. Le cas de contrastes égaux à -1, cas idéal pour les applications type lentille parfaite par exemple, pose des questions encore non résolues.

Si la frontière possède des singularités (point conique ou arête par exemple), on ne retrouve le cadre classique que si les contrastes sont à l'extérieur d'un intervalle dit critique. A l'intérieur de l'intervalle critique, nous avons montré dans une configuration bidimensionnelle que l'on pouvait mettre en évidence un phénomène de trou noir, au sens où il existe une onde qui se propage vers le point singulier et qui met un temps infini à atteindre ce point. Il faut alors compléter le problème par une condition de rayonnement au voisinage de ce point pour obtenir un problème bien posé. Sur le plan numérique, on peut utiliser, au voisinage de ce point, des PML (Perfectly Matched Layers) habituellement utilisées pour les domaines non bornés.

Métamatériaux appliqués aux antennes

A-C.TAROT

IEETR, UMR CNRS 6164, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu

35 042 Rennes Cedex.

e-mail : tarot@univ-rennes1.fr

Les métamatériaux développés à l'IEETR sont réalisés au moyen d'inclusions métalliques dans des matrices diélectriques. Nous présenterons dans un premier temps une méthode de caractérisation de ces métamatériaux [1]. Cette dernière permet d'accéder aux paramètres effectifs (ϵ_{eff} et μ_{eff}) du milieu homogène équivalent. Un exemple de métasolénoïde, réalisé en technologie 3D (figure 1) sera ensuite décrit. Le comportement magnéto-diélectrique de la structure proposée est mis à profit pour miniaturiser une antenne imprimée [2], grâce à la perméabilité artificielle créée par les anneaux résonants. Nous montrerons que l'utilisation de métasolénoïdes permet de réduire la fréquence de résonance d'un facteur deux environ.

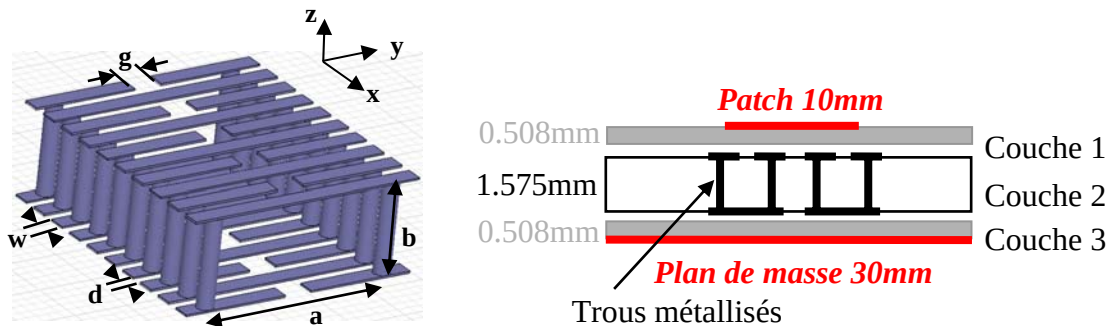


Figure 1 : Géométrie du métasolénoïde 3-D

D'autres exemples de métamatériaux et de matériaux BIE (Bande Interdite Electromagnétique) seront présentés, notamment pour les applications antennaires suivantes :

- Augmentation de la directivité et de la bande passante des antennes [3],[4],
- Amélioration des performances des antennes RFID,
- Commutation de faisceau,
- Sources rayonnantes compactes pour les applications spatiales [4],[5],
- Réduction du DAS [6] dans le cadre du Projet ANR METAVEST (METAmatériaux pour VESTements intelligents).

[1] D.Seetharamdoo, R. Sauleau, A.C. Tarot, K. Mahdjoubi, "Effective parameters of resonant negative refractive index metamaterials: Interpretation and validity", Journal of Applied Physics, Sept. 2005, vol. 98, no. 5, 063505 (1-4).

[2] W. Abdouni, A.-C. Tarot, A. Sharaiha, "Theoretical and experimental effective parameters of metamaterial substrates", EUCAP 2009 (European Conference on Antennas and Propagation), 23-27 Mars 2009, Berlin, Allemagne.

[3] T-H. Vu, A.C. Tarot, K. Mahdjoubi, S. Collardey, "Bandwidth Enlargement of EBG Antennas by a Combined PRS", Metamaterials'08, NATO Conferences, 7-10 mai 2008, Marrakech, Maroc.

[4] S. Muhammad, R. Sauleau, H. Legay, G. Caille, "Elément rayonnant compact à cavités résonantes", Brevet Université de Rennes 1 - Thales Alenia Space, 29 avril 2010.

[5] O. Roncière, R. Sauleau, K. Mahdjoubi, H. Legay, "Quasi-TEM Fabry-Perot cavities with high aperture efficiency", 29th ESA Antenna Workshop on Multiple Beams and Reconfigurable Antennas: innovations and challenges, 18 - 20 Avril 2007, ESA/ESTEC, Noordwijk, Hollande.

[6] N. Chahat, M Zhadobov, R Sauleau, K. Mahdjoubi, "Improvement of the on-body performance of a dual-band textile antenna using an EBG structure", Loughborough Antennas & Propagation Conference, LAPC 2010, 8-9 Nov. 2010, Loughborough, Angleterre.

Homogenization of metallic metamaterials and electrostatic resonances

D. Felbacq^{1,2}, B. Guizal², and F. Zolla³

¹Institut Universitaire de France

²Université Montpellier 2

Laboratoire Charles Coulomb UMR-CNRS 5221

34095 Montpellier Cedex 05, France

³Institut Fresnel

13397 Marseille Cedex 20, France

Abstract- It has been noted that the usual approaches for homogenization (e.g. Bruggeman) could lead to singularities when considering composites comprising materials with positive and negative permittivities. This situation is specifically encountered in the field of metamaterials, in particular in the visible range. The question then arises to understand if these resonances are just artifacts or possess, on the contrary, a clear physical meaning.

In this work, we study the homogeneous properties of a bidimensional structure that is made of a periodic set of metallic wires embedded in a dielectric host medium. The structure is considered in a region of wavelengths that are much larger than the period of the structure. The work comprises a theoretical part where we develop a two-scale approach to the homogenization of the structure. As it is the case for the common physical approach, it leads to an effective permittivity with strong (electrostatic) resonances as well. The theoretical results, and the presence of resonances, are confirmed by numerical computations based on a rigorous modal approach. In the numerical results we consider specifically the case of silver and gold nanowires, described by a dispersive negative permittivity. We show that the main parameters for the onset of resonances is the optical filling ratio of the structure. Keeping in mind the possibility of performing experiments, it is far easier to keep the geometrical filling ratio constant and to consider strongly dispersive materials in the range of wavelengths considered. Here, besides the crucial fact that they are widely used in nanotechnology, silver and gold nanowires comply with our needs in the visible region of the spectrum.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was done under the financial support of the Institut Universitaire de France.

THz Plasmonics and Metamaterials

Tahsin Akalin¹, Willie Padilla², Wen-Chen Chen², Ibrahim Türier¹, Guillaume Ducournau¹, Jean-François Lampin¹, Jack Mock³ and David Smith³

¹ IEMN, Lille 1 University, FRANCE

² Boston College, USA

³ Duke University, USA

Tahsin.Akalin@iemn.univ-lille1.fr

The talk will be dedicated to THz Plasmonics and Metamaterials. It is divided in three parts. In the first part, a brief review of the main contributions to this field will be presented. The second part concerns the study of a compact Planar Goubau Sommerfeld Line (PGSL) coupled to metamaterials and which enable the control of surface electromagnetic waves from GHz to THz frequencies. High quality factor resonances and modulation depths up to 80 percent are achieved. In the last part, these PGSL are also used in an original topology for THz microscopy. We will present an approach with a single PGSL and a second one with two PGSL placed very close to each other. The contact and non-contact mode are studied on a dielectric-metal sample. With this approach, we show a subwavelength resolution of $\lambda/1000$.

Intérêt des métamatériaux pour l'aéronautique civile et de défense

Gérard Pascal PIAU
EADS Innovations works, 12 Rue Pasteur 92152 Suresnes
gerard-pascal.piau @eads.net

Le développement de nouveaux services à bord des aéronefs nécessite l'implantation de nouveaux systèmes antennaires. Ces nouvelles implantations doivent coexister avec les systèmes classiques de navigation et de sécurité. De même, la saturation de certaines bandes de fréquence et la quantité d'informations à transmettre ou à recevoir nécessite l'utilisation de fréquences plus élevées. C'est ainsi que plusieurs dizaines d'antennes sont actuellement installées sur les plateformes et fonctionnent dans un domaine fréquentiel compris entre la bande VHF (120 MHz) jusqu'à la bande Ku, voire K. Devant ce nombre important d'éléments rayonnants, l'un des objectifs que nous recherchons actuellement est d'associer les antennes, de diminuer leurs tailles et d'améliorer le découpage. Les métamatériaux apparaissent comme l'une des voies possibles à conditions de maintenir les performances actuelles et les coûts d'acquisitions. Le second objectif concerne la conformité de ces antennes, et leur intégrations aux structures composites. Ces activités s'inscrivent également dans le cadre de recherches duales intégrant développements civils et militaires.

Les métamatériaux pour le contrôle de l'émission du second harmonique

Emmanuel Centeno¹, Cristian Ciraci²

¹ Université Clermont-Ferrand II, LASMEA, Aubière, France

² Duke University, Center for Metamaterials and Integrated Plasmonics, Durham, USA.

Les métamatériaux sont connus pour leurs propriétés linéaires permettant un contrôle inédit de la propagation de la lumière grâce à l'ingénierie de l'indice optique effectif. Les propriétés dites « main-gauches » associées aux métamatériaux d'indice optique négatif ont notamment permis de réaliser des lentilles plates au pouvoir de résolution sub-longueur d'onde [1]. Cet exposé abordera le thème des propriétés non linéaires des métamatériaux pour le contrôle de l'émission du second harmonique. Nous démontrerons en particulier des effets de génération contra directionnelle ou de localisation du second harmonique [2-3]. Ces propriétés seront appliquées à la conception d'une lentille plate non linéaire capable d'imager dans le domaine optique des objets émettant dans l'infra-rouge [4].

Références :

- [1] J.B. Pendry, « Negative refraction makes a perfect lens » *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3966 (2000).
- [2] E. Centeno, *et al.* « All-Angle Phase Matching Condition and Backward Second-Harmonic Localization in Nonlinear Photonic Crystals », *Phys. Rev. Lett.* **98**, 263903 (2007).
- [3] E. Centeno and C. Ciraci, « Theory of backward second-harmonic localization in nonlinear left-handed media », *Phys. Rev. B* **78**, 8 (2008).
- [4] C. Ciraci and E. Centeno, « Focusing of Second-Harmonic Signals with Nonlinear Metamaterial Lenses: A Biphotonic Microscopy Approach », *Phys. Rev. Lett.* **103**, 063901 (2009).

HOMOGENÉISATION DU SYSTÈME DE MAXWELL 3D PRÈS DES RÉSONANCES ET MAGNÉTISME ARTIFICIEL.

GUY BOUCHITTE ET CHRISTOPHE BOUREL

Institut de Mathématiques, Université du Sud-Toulon-Var

DIDIER FELBACQ

GES, Université de Montpellier 2, 34095 Montpellier , France

Une théorie a été développée récemment dans [1, 2, 3] pour mieux comprendre les phénomènes de magnétisme artificiel dans les cristaux photoniques en dimension 2. Il s'agit d'une approche par homogénéisation. Ici [4, 5], nous proposons une extension de ces résultats en dimension 3: la diffraction d'une onde monochromatique par un cristal 3D fini constitué d'inclusions diélectriques disconnectées est analysée asymptotiquement quand la distance entre les inclusions est infinitésimale. La principale nouveauté réside dans le problème spectral 3D résultant de l'analyse multi-échelles et permettant de décrire le champ magnétique microscopique. Contrairement au cas 2D, les oscillations du champ magnétique sont non seulement présentes dans les inclusions diélectriques mais aussi dans la matrice. Par ailleurs le processus d'homogénéisation fait intervenir une moyennisation particulière du champ oscillant qui diffère de sa moyenne volumique. La loi de perméabilité effective obtenue dans le composite est un tenseur dépendant de la fréquence et dont les valeurs propres peuvent avoir une grande partie réelle négative. Ceci suggère une alternative la structure en anneaux métalliques coupés proposés par Pendry [6][7].

References

- [1] D.Felbacq, G. Bouchitté: *Homogenization of wire mesh photonic crystals embedded in a medium with a negative permeability*, Phys. Rev. Lett. **94**, 183902 (2005)
- [2] D.Felbacq, G. Bouchitté: *Negative refraction in periodic and random photonic crystals*, New J. Phys, 7(159, 10.1088), 2005.
- [3] R.V. Kohn and S. Shipman: *Magnetism and homogenization of microresonators*. Multiscale Model. Simul. **7** (2008), no. 1, 62-92.
- [4] G. Bouchitté , C.Bourel, D. Felbacq, Homogenization of the 3D Maxwell system near resonances and artificial magnetism. C. R. Math. Acad. Sci. Paris, Volume 347, Issues 9-10, May 2009, Pages 571-576
- [5] C.Bourel: Thèse Université de Toulon, décembre 2010.
- [6] S. O. Brien and J.B. Pendry: *Magnetic activity at infrared frequencies in structured metallic photonic crystals*. J. Phys. Condens. Mat., **14**: 6383-6394, 2002.
- [7] G. Bouchitté, B. Schweizer: *Homogenization of Maxwell's Equations in a Split Ring Geometry* , Multiscale Model. Simul. 8 (2010), no. 3, 717750

Surfaces Hautes Impédances pour le découplage d'éléments rayonnants

Cédric Martel¹, Nicolas Capet¹, Olivier Pascal², Jérôme Sokoloff², Fabrice Boust³

¹ ONERA, 2 Av. Edouard Belin, 31055 Toulouse

² UPS/LAPLACE/GRE, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse

³ ONERA, Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau

L'Onera poursuit différents travaux comportant des métamatériaux dans les domaines optiques, micro-ondes et acoustiques. Après avoir brièvement présenté ces activités, nous illustrerons sur un cas particulier – les surfaces hautes impédances pour le découplage d'éléments rayonnants – notre démarche qui vise en priorité à estimer les progrès apportés par les métamatériaux pour nos applications.

Les surfaces hautes impédances (HIS) sont des structures (généralement) périodiques constituées de motifs conducteurs, placés à proximité d'un plan métallique, dont l'impédance équivalente présente des résonances. En outre, une bande interdite pour les ondes de surface apparaît quand les motifs conducteurs sont connectés au plan de masse. Ces deux propriétés font que très tôt, les HIS ont été proposées pour réduire le couplage entre éléments rayonnants.

L'étude engagée à l'Onera concerne l'introduction de HIS pour améliorer la résistance aux brouilleurs d'antennes GPS ou Galileo. L'antenne visée est un petit réseau de 7 patches qui, s'ils étaient parfaitement découplés, permettraient l'élimination de 6 brouilleurs. Dans cet exposé, nous montrons comment nous avons été amenés à introduire des HIS ne comportant qu'un nombre de motifs réduit et à n'exploiter que le phénomène de résonance d'impédance. Nous présentons ensuite un ensemble de mesures réalisé sur des maquettes comportant 2 patches, avec et sans HIS, montrant les différents impacts de ces dernières.

Modes de Bloch dans les métamatériaux optiques de type “fishnet”

Jianji Yang¹, Christophe Sauvan¹, Haitao Liu² and Philippe Lalanne¹

¹Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, CNRS, Univ. Paris-Sud, RD 128, 91127 Palaiseau, France

²Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China
christophe.sauvan@institutoptique.fr

Résumé. Nous avons développé une théorie microscopique du phénomène de réfraction négative dans les métamatériaux de type “fishnet” formés d’un réseau de trous percés dans un empilement périodique métal/diélectrique/métal. La théorie, basée sur le calcul des coefficients de diffraction des modes guidés plasmoniques se propageant à l’intérieur de la structure, nous permet d’obtenir une expression analytique de l’indice effectif du métamatériau. Nous discutons des mécanismes physiques responsables de l’apparition d’un indice de réfraction négatif avec peu de pertes dans le proche infrarouge.

Aujourd’hui, la compréhension des métamatériaux à indice négatif est uniquement basée sur des calculs électromagnétiques vectoriels rigoureux. Toutes les approches théoriques développées jusqu’à maintenant (champ moyen, développement multipolaire, calcul des modes de Bloch, inversion des coefficients de diffraction) prédisent de façon précise la propagation de la lumière mais elles sont peu intuitives. Elles rendent donc difficile l’étape de conception nécessaire à la réalisation de nouveaux composants optiques utilisant des métamatériaux. Pour proposer une expression analytique de l’indice de réfraction des métamatériaux optiques de type « fishnet », nous avons abandonné les approches d’homogénéisation classiques pour adopter un point de vue « microscopique » qui nous permet de suivre la propagation et la diffraction de la lumière dans la structure, à la façon d’un fluide s’écoulant dans un circuit multi-canaux. Notre description fait intervenir un canal longitudinal, formé de trous rectangulaires sub-longueur d’onde, et un canal transversal, formé de guides d’onde plasmoniques métal/diélectrique/métal.

Grâce à des équations de modes couplés qui décrivent comment les deux canaux se couplent et échangent de l’énergie, nous avons obtenu une expression analytique de l’indice effectif n_{eff} du mode de Bloch fondamental. Ce traitement analytique du problème nous permet de mettre en évidence comment des valeurs négatives de l’indice peuvent apparaître sur une large plage spectrale. Les résultats sont obtenus pour les paramètres géométriques utilisés par Valentine *et al.* [1]. Le modèle développé fournit un cadre complet pour analyser en détail et quantitativement l’origine physique de l’apparition d’indices négatifs dans les métamatériaux de type « fishnet ». Le modèle nous permet également de réaliser une analyse simple des mécanismes de compensation des pertes avec des milieux à gain, une question cruciale pour les métamatériaux fonctionnant dans le visible et le proche infrarouge.

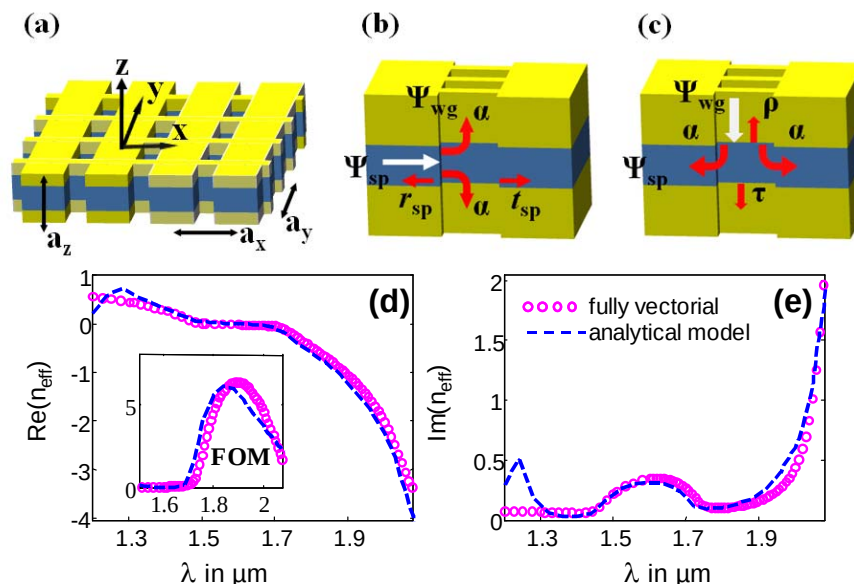


Fig. 1. (a) Schéma d’une période du fishnet dans la direction z . (b) Diffraction du mode plasmonique guidé dans l’empilement transversal métal/diélectrique/métal. (c) Diffraction du mode du guide rectangulaire longitudinal. Dans (b) et (c), les flèches blanches (resp. rouges) représentent les modes incidents (resp. diffractés). Parties réelle (d) et imaginaire (e) de l’indice effectif du mode de Bloch fondamental du fishnet.

Diagrammes de dispersion à haute résolution de métamatériaux pour l'infrarouge

Petru Ghenuche,^{1,2} Stephane Collin,¹ Gregory Vincent,² Marine Laroche,³ Nathalie Bardou,¹
 Riad Haidar,² and Jean-Luc Pelouard¹

1. Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (LPN-CNRS),
 Route de Nozay, 91460, Marcoussis, France ,

2. ONERA, The French Aerospace Lab,

Chemin de la Hunière, F-91761 Palaiseau Cedex, France ,

3. Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique, CNRS, Université Paris-Sud,
 Campus Polytechnique, RD 128, 91127 Palaiseau cedex, France

Les tendances actuelles en nano-et micro-optique infrarouge nécessite la fabrication de métamatériaux structurés à une échelle nanométrique sur de grandes surface (plusieurs mm²), et la caractérisation précise de leur réponse optique angulaire et spectrale.

Dans ce travail, nous présentons une caractérisation complète de métamatériaux dans le régime proche infrarouge (1 à 5 μm) : transmission, réflexion et absorption ont été mesurés en fonction de la longueur d'onde, de l'angle d'incidence et de la polarisation.

Tout d'abord, nous avons développé une technique de fabrication de nanostructures de taille inférieure à 50 nm, sur de grandes surface (8-9 mm²). Une précision de 5 nm a été obtenue de manière reproductible. Les spectres de transmission et de réflexion ont été mesurés avec un banc optique dédié qui permet un contrôle indépendant des angles d'excitation et de détection (résolution angulaire $\pm 0,5^\circ$ de 0° à 80° , domaine spectral de 0.5 à 16 μm).

Grâce à ces outils, les diagrammes de dispersion de différents métamatériaux sont étudiés. Le comportement angulaire des résonances dipolaires et quadripolaires de métamatériaux de type SRR sont présentés (figure (a)). Des membranes suspendues nanostructurées, constituées d'un réseau de nano-barreaux diélectriques, ont également été fabriquées et étudiées (figure (b)). Nous mettons en évidence une résonance étroite qui conduit à l'extinction totale de la lumière à la résonance, dans une structure quasiment transparente hors résonance.

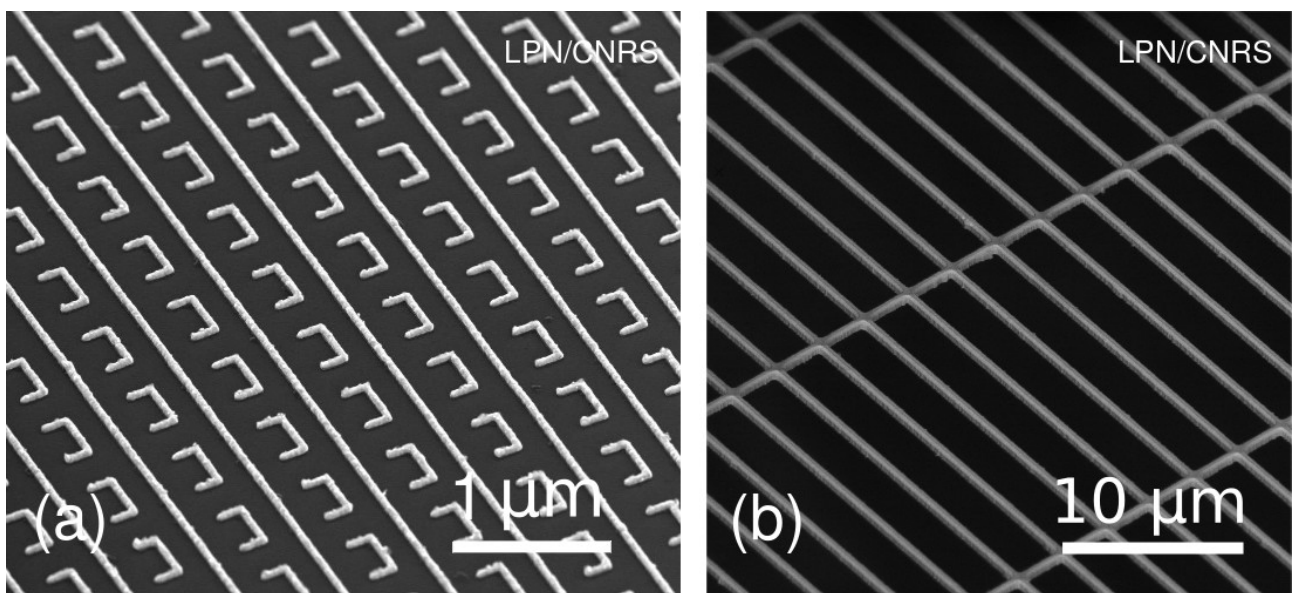


Figure. Exemple de métamatériaux. (a) Métamatériaux en or de type SRR (b) Réseau de nano-barreaux diélectriques suspendus.

Lentille plate à cristaux photoniques et ingénierie d'interface : investigation en champ proche optique

Geoffroy Scherrer¹, Maxence Hofman², Wojciech Smigaj³, Boris Gralak³, Xavier Mélique²,
Olivier Vanbésien², Didier Lippens², Colette Dumas¹, Benoit Cluzel¹, et Frédérique de Fornel¹

¹Groupe d'optique de champ proche – Université de Bourgogne.

²IEMN – Université des Sciences et Technologies de Lille.

³Institut Fresnel – Université Aix - Marseille III.

Geoffroy.Scherrer@u-bourgogne.fr

La superlentille ou le phénomène de focalisation par un matériau à indice de réfraction négatif a été théoriquement étudié pour la première fois par les travaux de Veselago [1] et Pendry [2].

La réalisation expérimentale d'une telle lentille aux fréquences optiques nécessite la structuration périodique d'un matériau à l'échelle sub-longueur d'onde.

Nous avons choisi une approche tout diélectrique avec un cristal photonique deux dimensions air /semi-conducteur, présentant un indice de réfraction effectif $n=-1$ à la longueur d'onde $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

Nos précédents travaux [3] ont clairement mis en évidence, par une mesure en champ proche optique, le phénomène attendu de focalisation aux fréquences optiques.

Pour obtenir un meilleur niveau de transmission du signal lumineux au travers de la lentille, une optimisation est réalisée, consistant principalement en une ingénierie des interfaces [4] entrée et sortie de la lentille.

L'exposé portera sur les dernières avancées obtenues sur ce point précis [5] et mettra en avant les mesures en champ proche optique réalisées au sein du Groupe d'Optique de Champ Proche de Dijon.

L'ensemble de ce travail, réalisé dans le cadre de l'ANR FANI avec les laboratoires de l'IEMN et de l'Institut Fresnel, comporte les aspects suivants : simulation numériques et design de la structure, fabrication de la structure et mesures en champ proche optique.

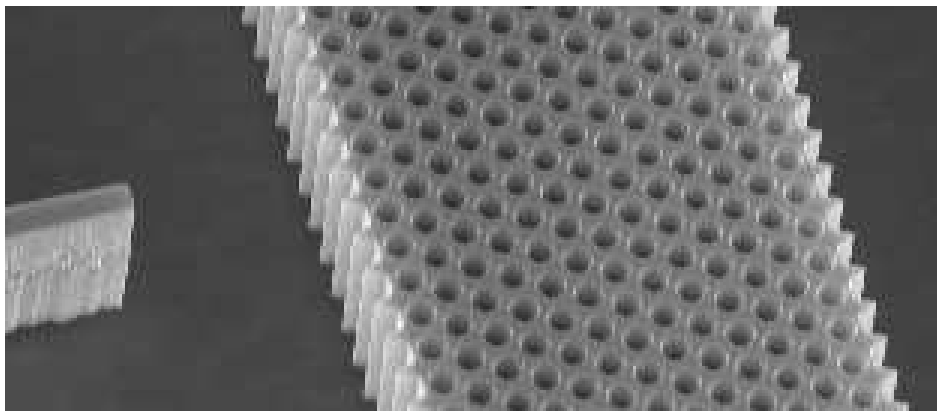


Image MEB d'une lentille plate avec ingénierie d'interface

Références :

- [1] V. G. Veselago, Sov. Phys. Usp. **10**, 509 (1968).
- [2] J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett. **85**, 3966 (2000).
- [3] N. Fabre, L. Lalouat, B. Cluzel, X. Mélique, D. Lippens, F. de Fornel, et O. Vanbésien, Phys. Rev. Lett. **101** 73901 (2008).
- [4] W. Śmigaj, B. Gralak, R. Pierre, et G. Tayeb, Opt. Lett. **34**, 3532 (2009).
- [5] G. Scherrer, M. Hofman, W. Śmigaj, B. Gralak, X. Mélique, O. Vanbésien, D. Lippens, C. Dumas, B. Cluzel et F. de Fornel, Appl. Phys. Lett. **97**, 071119 (2010).

Métamatériaux : des formes pour des applications

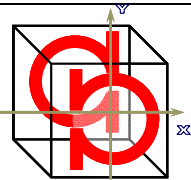
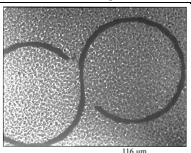
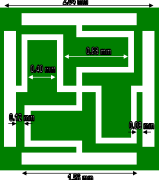
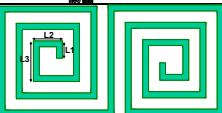
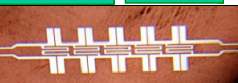
Auteur : Bruno SAUVIAC & al.

Laboratoire Télécom Claude Chappe (LT2C ex. DIOM) - Télécom Saint-Etienne, école associée de l'Institut Télécom, Université de Saint-Etienne, F-42000, Université de Lyon, France

Les métamatériaux peuvent se décrire de façon générale comme des structures métallo-diélectriques organisées régulièrement ou non. La taille des motifs créant la structure étant faible devant la longueur d'onde, on pourra alors considérer, d'un point de vue électromagnétique, l'architecture réalisée comme un matériau effectif. L'intérêt de cette approche est double : les structures réalisées peuvent créer des effets électromagnétiques macroscopiques inédits (comme les milieux à indice négatif, bien connu aujourd'hui) et les effets créés sont « prévisibles » ce qui permet dans une sorte d'ingénierie des propriétés électromagnétiques.

En se basant sur des travaux réalisés au laboratoire Télécom Claude Chappe (LT2C ex. DIOM) depuis une dizaine d'année, la présentation s'articulera autour de l'ingénierie des motifs métalliques pour la création de fonction métamatériau et des applications de ces motifs dans des dispositifs hyperfréquences.

Le tableau suivant tente d'illustrer les différents exemples proposés.

Motifs	Figure	Propriétés effectives	Applications
Oméga		Milieu semi isotrope à indice négatif	Lentille plane convergente
S-particle		Milieu anisotrope à forte permittivité	Substrat de ligne coplanaire
Croix		Mur magnétique	Modification faisceau d'antenne Isolateur sur substrat magnétique
Spirales & S-Spirales		Perméabilité et permittivité	Résonateurs pour lignes planaires
Stub et CID		Méta-lignes	Résonateur sur ferrite Propagation main gauche contrôlée

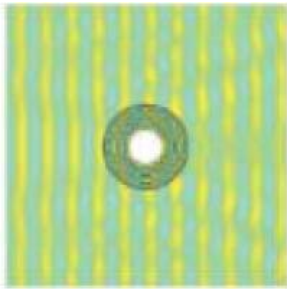
Elastodynamique transformationnelle : invisibilité et lentilles

M. Farhat(1), S. Guenneau(1), S. Enoch(1), A.B. Movchan(2)

(1) Institut Fresnel, UMR CNRS 6133/ Aix-Marseille Université

(2) Department of Mathematical Sciences, Liverpool University

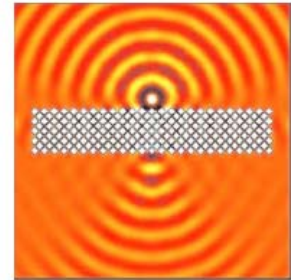
Nous nous intéressons au contrôle des ondes de flexion dans les plaques minces. La propagation de ces ondes est régie par une équation différentielle d'ordre quatre qui présente certaines similarités avec l'équation de Helmholtz. Ces similarités sont exploitées pour jeter des ponts entre des modèles d'ondes électromagnétiques transverses pour des métamatériaux en optique et leurs pendants en acoustique. On illustrera notre propos avec une application de type cape d'invisibilité concentrique qui détourne les ondes de flexion autour d'un obstacle (figures A et B, référence 1) ainsi qu'une plaque perforée qui focalise les ondes de flexion par réfraction négative (figure C, référence 2).



A : simulation numérique vue de dessus



b : vue d'artiste 3D



c : simulation numérique vue de dessus

Références :

[1] Farhat, Guenneau, Enoch, "Cloaking bending waves propagating in thin elastic plates", Physical Review Letters, 2009 79 033102

[2] Farhat, Guenneau, Enoch, Movchan, Pertursson, "focussing bending waves in thin-perforated plates", Applied Physics Letters 2010 96 081909

Métamatériaux: Une difficulté pour la théorie de l'homogénéisation

Alain Bossavit

LGEP, Gif-sur-Yvette

Comment le mélange de matériaux à perméabilités positives peut-il se comporter, dans une certaine gamme de fréquences, comme un matériau homogène à perméabilité négative? La théorie classique de l'homogénéisation, qui est une analyse asymptotique par rapport au petit paramètre que constitue la taille de la cellule génératrice, ne peut pas l'expliquer, dans la mesure où le "problème cellulaire" auquel elle conduit, qui donne le μ effectif, ne dépend pas de la fréquence. Sur l'exemple des assemblages périodiques de Résonateurs à Anneau Scié, on montre comment l'introduction d'un deuxième petit paramètre, en compétition avec le premier en quelque sorte, donne le résultat attendu d'un μ effectif à partie réelle négative dans une certaine gamme de fréquences. Ce second paramètre est l'épaisseur de la fente, que l'on fait varier comme le cube de la taille de la cellule dans l'analyse asymptotique, de manière à fixer la fréquence de résonance du circuit LC que constitue le résonateur.

Métamatériaux à base de tiges diélectriques: comportement main-gauche et états colliers microscopiques

Kevin Vynck, Didier Felbacq, Emmanuel Centeno, David Cassagne

L'étude des propriétés optiques des métamatériaux a connu depuis quelques années un engouement croissant dû à leur unique capacité à manipuler la lumière. Une attention particulière est actuellement portée aux métamatériaux "tout-diélectrique" puisque ceux-ci permettent de surpasser les problèmes connus des métamatériaux métalliques aux fréquences optiques. Il a notamment été démontré expérimentalement qu'un assemblage de tiges diélectriques à très forte permittivité pouvait imiter un milieu dit "main-gauche" (permittivité et perméabilité toutes deux négatives) indépendamment de la périodicité de la structure [1].

Dans une première partie, nous donnerons une explication théorique à l'origine des permittivité et perméabilité effectives des réseaux périodiques de tiges diélectriques [2] en dérivant des expressions pour les polarisabilités dipolaires électrique et magnétique de tiges isolées dans la limite des grandes longueurs d'onde. L'apparition de bandes interdites photoniques et de courbes de dispersion main-gauche sera justifiée par un modèle de dipôles en interaction. Nous montrerons que ces effets sont étroitement liés aux résonances de Mie des tiges et qu'ils peuvent donc être reproduits à différentes fréquences très simplement.

Dans une seconde partie, nous étudierons l'effet du désordre structurel sur les caractéristiques optiques des réseaux de tiges, toujours sur la base de dipôles couplés. Nous expliquerons pourquoi certaines bandes interdites photoniques sont relativement insensibles au désordre et présenterons un nouveau régime de transport se basant sur la création de chaînes de résonances assimilables à des états colliers microscopiques bi-dimensionnels [3].

[1] L. Peng et al., Phys. Rev. Lett. 98, 157403 (2007).

[2] K. Vynck et al., Phys. Rev. Lett. 102, 133901 (2009).

[3] K. Vynck, PhD thesis (Université Montpellier II, 2008).
<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00344208/en/>

Métamatériaux dans la gamme térahertz à base de particules de TiO_2 résonantes

Sylvain Lannebère^{(1),(2)}, Valérie Vigneras⁽²⁾, Ashod Aradian^{(1),*}

⁽¹⁾ Centre de Recherche Paul Pascal, CNRS / Université Bordeaux 1, 115 av. Schweitzer, 33600 Pessac, France

⁽²⁾ Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS), CNRS / Université Bordeaux 1, 16 avenue Pey-Berland, 33607 Pessac Cedex, France

* aradian@crpp-bordeaux.cnrs.fr

Dans cet exposé, nous présenterons nos travaux théoriques sur l'obtention de métamatériaux dans la gamme térahertz qui puissent être fabriqués par voie de synthèse et d'assemblage chimique (approche « bottom-up »). En nous inspirant de schémas existants pour la gamme centimétrique, nous étudions des structures de billes micrométriques résonantes constituées de matériaux diélectriques adéquatement choisis pour la gamme térahertz, parmi lesquels nous montrerons que l'oxyde de titane (TiO_2) fait figure de meilleur candidat. Nous décrirons comment des matériaux magnétiques artificiels peuvent être obtenus à partir d'assemblages de billes de taille calibrée, puis présenterons les effets d'une polydispersité autour de cette taille nominale sur les performances attendues. Enfin, nous nous attarderons sur des assemblages de billes bidisperses et montrerons que les effets de couplage dans ces structures de forte densité entraînent des phénomènes de propagation complexes.

André BARKA (ONERA/DEMR), François-Xavier Roux (ONERA/DTIM)

Eléments Finis Haute Performance pour la caractérisation électromagnétique de Méta Matériaux: une alternative aux méthodes d'homogénéisation ?

Concevoir puis réaliser un matériau artificiel ou une maquette d'élément rayonnant utilisant des matériaux à hautes impédances (HIS) ou à bandes interdites (EBG) nécessite bien entendu une bonne compréhension physique des principes de propagation dans ces structures. On peut alors penser que l'invention et l'imagination de ces métamatériaux relève avant tout du domaine de la Physique et de l'Expérimentation en laboratoire. Si nous regardons de plus près les méthodes de travail privilégiées, nous faisons le constat que des outils extrêmement séduisants sont mis en œuvre systématiquement comme les diagrammes de bande ou de dispersion, les techniques d'homogénéisation ainsi que les bancs de mesures de coefficients de réflexion et de transmission. Les méthodes de conception semblent bien maîtrisées bien que bien entendu les outils d'homogénéisation ont un domaine de validité limité aux structures périodiques dont les motifs sont très petits devant la longueur d'onde ($\lambda/100$), et que les méthodes de calcul de diagrammes de bande sont souvent analytiques, basées sur des structures infinies et particularisées à des formes canoniques (tubes, sphères, etc.). Pour remédier aux limitations précédentes, l'utilisation de simulateurs commerciaux comme HFSS ou CST devient systématique dans les laboratoires de recherche. Cependant, force est de constater que de nombreuses hypothèses simplificatrices nécessaires à la réalisation des simulations sont incontournables. Ainsi les hypothèses de réseaux infinis (Bloch-Floquet), de conditions limites non physiques de type conducteurs magnétiques parfaits (PMC), de paramètres epsilon mu homogénéisés en dehors du domaine de validité, conduisent souvent à une modélisation d'échantillons virtuels qui peuvent s'éloigner des prototypes réels et donc des performances attendues. Un exemple assez démonstratif d'une conception basée sur une homogénéisation « $\lambda/20$ » d'une super lentille à indice de réfraction négatif [1] et pouvant conduire à une réalisation s'éloignant des performances de focalisation attendues a été présentée récemment [2]. Dans ce contexte, il est légitime de penser que l'invention et l'imagination de métamatériaux puissent également relever du domaine des Mathématiques et de la Modélisation.

Nos travaux sur la modélisation de structures périodiques finies de grande taille par méthodes d'éléments finis volumiques s'inscrivent alors dans ce contexte, les sorties attendues étant une meilleure maîtrise en phase de conception de la propagation dans les structures EBG ou HIS, ainsi qu'une extraction de diagrammes de bandes généralisée à des motifs élémentaires quelconques. Une méthode de décomposition de domaine utilisant des techniques FETI (Finite Element Tearing and Interconnecting) initialement mise en œuvre pour des applications acoustiques, est ici étendue à l'électromagnétisme. Elle présente la particularité d'être "scalable" c'est-à-dire de présenter un taux de convergence indépendant de la fréquence et la taille du problème à résoudre. Elle est donc particulièrement attractive pour les structures périodiques de grandes tailles. L'efficacité de la méthode développée sera analysée pour des applications de type matériaux à bande interdite électromagnétique mettant en œuvre des réseaux de tiges diélectriques à base d'alumine.

- [1] C.G Parazzolo, R.B Greer, J.A Nielsen, M.A Thompson, K. Li, A.M Vetter, M.H Taniellian, "**Performance of a negative index of refraction lens**", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, no. 17, pp. 3232-3234, Apr. 2004
- [2] K. Zhao, V. Rawat, S-C Lee, J-F Lee, " **A Domain Decomposition Method With Non Conformal Meshes for Finite Periodic and Semi-Periodic Structures**", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 55, No 9, September 2007, pp. 2559,2570.

Ingénierie des matériaux magnétiques à l'aide de structures metamatériaux

N. Malléjac

CEA, Le Ripault, BP 16, 37260 Monts, France

e-mail : nicolas.mallejac@cea.fr

Depuis l'avènement des metamatériaux, un grand nombre d'inclusions artificielles ont été proposées visant à réaliser des matériaux artificiels à indice de réfraction négatif [1-3]. L'ingénierie de la réponse en fréquence des matériaux magnétiques peut tirer profit de ces concepts afin de permettre un pilotage en fréquence de la réponse magnétique [4]. Nous illustrerons cette idée au travers de différentes géométries de matériaux artificiels mixant architectures classiques de metamatériaux (SRR, structures de Sievenpiper [5]) et matériaux magnétiques [6-8]. L'utilisation des paramètres effectifs pour décrire ces structures nous a conduit à définir une nouvelle méthode de calcul des permittivité et perméabilité à partir d'une intégration des champs [9]. Celle-ci s'avère très intéressante pour donner des limites à la validité des propriétés homogénéisées mais également pour affiner la compréhension physique du fonctionnement des inclusions résonantes constitutives des metamatériaux [10]. On obtient également ainsi des critères d'homogénéisabilité [11] et de validité des paramètres effectifs. Un autre aspect de l'ingénierie de ces matériaux, lié à l'extension en fréquence des lois de dimensionnement utilisées pour ces matériaux, a été étudié en prenant comme exemple une structure type Sievenpiper [12].

[1] D.Schurig & als, Science, 314, 5801, pp 977-980, (2006)

[2] D.R.Smith & als, Science, 305, 5685, pp 788-792 (2004)

[3] R. Marques & als, IEEE Trans on antennas & propagation, 51, 10, pp 2572-2581, (2003)

[4] O.Acher, In Advances in electromagnetics of complex media and matamaterials (Kluwer Academic Publisher, 2003), pp 39-59

[5] Sievenpiper & als. IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 47:300, (1999).

[6] O.Reynet & als, PRB 66,094412 (2002)

[7] A.L.Adenot & als, JMMM 300,33-37 (2006)

[8] O.Acher & als, IEEE Trans.in Magnetism, 39,5 (2003)

[9] O.Acher & als, PRB 62,20 (2000)

[10] O.Acher & als, Optics Express 15,3 (2007)

[11] J.M.Lerat & als, JAP 100,084909 (2006)

[12] N.Malléjac & S.Enoch, Proceedings METAMATERIALS 2010

Nanostructures 3D réalisées par dépôt en incidence rasante : une voie de synthèse pour les métamatériaux pour l'optique sur de grandes surfaces

B. Gallas¹, N. Guth¹, J. Rivory¹, J. Yang², K. Robbie², G. Guida³, A. Priou³

¹ INSP, CNRS-UPMC, 4 place Jussieu, case 840, 75252 Paris cedex 05

² Department of Physics - Queen's University Kingston, Canada K7L 3N6

³ LEME (EA4416-OMS), Université Paris Ouest, 50 rue de Sèvres, 92410 Ville d'Avray, France

Le dépôt en incidence rasante (GLAD pour GLancing Angle Deposition) est une technique de dépôt de couches minces qui permet de réaliser des films nanostructurés sur de grandes surfaces. Cette technique de dépôt peut être utilisée dans n'importe quel bâti utilisant une technique de dépôt par voie physique où l'angle des atomes évaporés par rapport à la surface est rasant (typiquement quelques degrés). Ceci conduit à la croissance de colonnes de diamètre nanométrique. L'ajout d'une rotation polaire en cours de croissance permet de réaliser des films contenant des nanostructures 3D complexes. La plupart des études réalisées jusqu'à présent sur les films obtenus par dépôt GLAD ont concerné des films de diélectriques, de semiconducteurs ou de métaux de transition. Cependant, l'utilisation de métaux nobles devrait permettre de réaliser des métamatériaux pour le visible, grâce à l'ingénierie de plasmons de surface.

Des calculs par méthodes numériques par éléments finis ont montré que la réponse optique de nanospirales carrées à trois bras (Fig 1b) présentait de fortes analogies avec celle des résonateurs en U utilisés dans certains métamatériaux pour le visible ¹. Dans ces nanospirales, des modes résonants *magnétiques* supplémentaires sont observés pour une illumination en incidence normale (Fig. 1d). Une étude paramétrique a été faite afin d'étudier l'influence du désordre pouvant être induit par la croissance par dépôt en incidence rasante.

Nous avons déposé sur substrat de silicium des films minces par GLAD contenant des nanospirales d'argent carrées à trois bras. Pour obtenir ces films nous avons effectué le dépôt en incidence rasante pour obtenir une première série de colonnes, puis le substrat a été tourné de 90° autour de sa normale pour faire croître une seconde série de colonnes. L'opération a été répétée une fois pour obtenir le troisième bras des hélices carrées (Fig. 1a). Les propriétés optiques ont été mesurées par ellipsométrie spectroscopique généralisée, dans la gamme spectrale 400 nm – 1700 nm. Ces mesures sont en bon accord avec les calculs par éléments finis (Fig. 1c) montrant que les modes résonants prédits par le calcul sont excités dans les films contenant ces nanospirales.

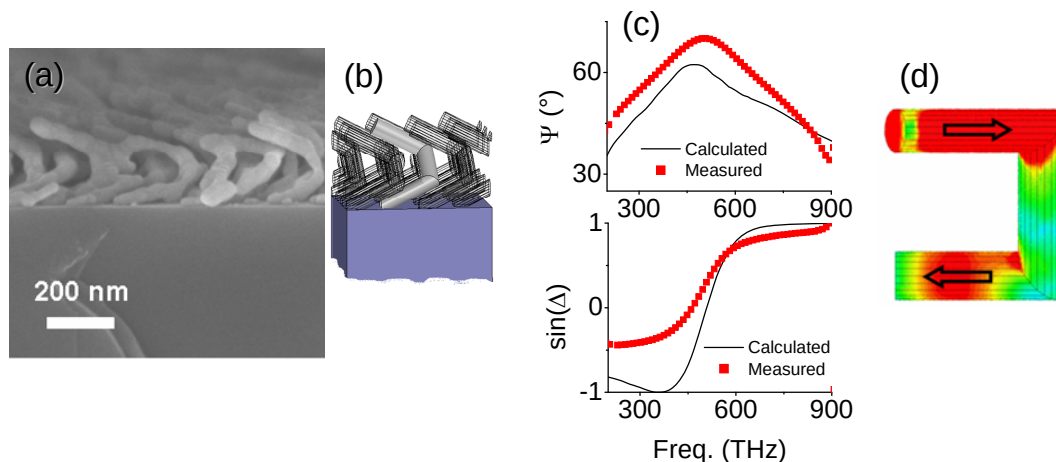


Fig. 1: (a) Image par la tranche en microscopie électronique à balayage d'un film contenant des nanospirales d'argent; (b) modèle pour les calculs par éléments finis; (c) mesures ellipsométriques (points) et calculs (trait); (d) carte de la distribution de courant dans une nanospirale (vue de dessus) à la résonance magnétique vers 600 nm.

[1] "Silver square nanospirals mimic optical properties of U-shaped resonators", B. Gallas, K. Robbie, R. Abdeddaïm, G. Guida, J. Yang, J. Rivory, A. Priou, Opt. Express **18**, 16335 (2010)

Métamatériaux pour les ondes de pression acoustiques: invisibilité et lentilles

Guillaume Dupont,^a Sébastien Guenneau,^a Stefan Enoch^a

^a*Institut Fresnel, CNRS, Aix-Marseille Université, Campus Universitaire de Saint-Jerome, 13013 Marseille, France*

Résumé

Dans cette présentation, je présenterai des travaux sur la modélisation numérique 3D de métamatériaux pour les ondes de pression acoustiques. Il sera alors question des métamatériaux obtenus par transformation géométrique, comprenant les capes et tapis d'invisibilité, et de ceux obtenus par l'étude de structures périodiques comprenant notamment les lentilles à refraction négative.

Une première partie portera sur les métamatériaux obtenus par transformations géométriques. Nous verrons comment ces transformations agissent sur les paramètres de l'acoustique que sont la densité et le module de compressibilité, puis le chemin à suivre vers des structures réalistes et réalisables.

La seconde partie sera consacrée à l'étude des structures périodiques. Nous verrons comment à partir de l'étude des modes de Bloch sur diverses structures il est possible d'obtenir des lentilles à refraction négative, mais aussi des matériaux à gap basse fréquence.

Email address: `guillaume.dupont@fresnel.fr` (Guillaume Dupont,).

Metamateriaux à indice négative par hybridation de modes piégés

Redha Abdeddaim, Abdelwaheb Ourir, Julien de Rosny

*Institut Langevin, ESPCI ParisTech, UMR 7587, CNRS, Laboratoire Ondes et Acoustique (LOA),
10 rue Vauquelin 75231 PARIS Cedex 05 France*

Il a été démontré récemment qu'il était possible d'obtenir une perméabilité négative sans l'application d'un champ magnétique extérieur normal aux résonateurs. Cela peut se faire en couplant deux résonateurs électriques dans la direction de propagation [1]. La réalisation de milieux à indice négatif à partir de cette méthode consiste à introduire une dissymétrie entre les deux résonateurs couplés.

Nous avons proposé une méthode **originale** pour réaliser un milieu à indice négatif par hybridation de mode. **Contrairement à la méthode de dissymétrisation** du plan de couplage entre deux résonateurs, **notre méthode consiste** en la dissymétrisation du résonateur lui-même. La différence de sensibilité de la variation fréquentielle des modes piégés et des modes résonants non piégés en fonction de la dissymétrie de la structure va créer une plage de fréquence dans laquelle un mode électrique va croiser un mode magnétique **pour** donner un indice négatif.

Références

- [1] E. Prodan, C. Radloff, N. J. Halas, and P. Nordlander, Science 302, 419, 2003.
- [2] R. Abdeddaim, A. Ourir, and J. de Rosny, PRB, 83, 033101, 2011.

Etude théorique et expérimentale des structures nanométriques pour la conception de capteurs bio-plasmoniques

O. Saison¹, S. Szunerits², A. Akjouj¹, Y. Pennec¹, B. Djafari-Rouhani¹, et R. Boukherroub²

¹IEMN, UMR-CNRS 8520, Université de Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq.

²Institut de Recherche Interdisciplinaire (IRI, USR-3078) Parc de la Haute Borne, 50 avenue de Halley, 59658 Villeneuve d'Ascq

Les nanostructures métalliques suscitent actuellement un intérêt considérable en raison de leurs présentes et futures applications potentielles dans divers champs, tels que la science des matériaux, la catalyse chimique, et la spectroscopie Raman exaltée de surface. On peut citer plus particulièrement les bio-détecteurs basés sur la résonance de plasmon de surface de nanoparticules de métaux nobles, déposées sur des surfaces fonctionnalisées. En particulier, les nanoparticules d'or et d'argent absorbent fortement des bandes de fréquences étroites, qui peuvent être accordées en ajustant la forme, la taille, et la distance inter-particules. En plus, leurs propriétés optiques dépendent nettement de la chimie de surface sur laquelle elles sont déposées, et sur l'indice de réfraction de l'environnement diélectrique entourant ces nanostructures. Ceci rend ces interfaces appropriées pour des applications de bio-détection.

Dans ce travail nous présenterons l'étude théorique et expérimentale de l'influence des paramètres régissant la position du pic de résonance du plasmon de surface localisé (LSPR, *Localized Surface Plasmon Resonance*) dans des structures nanométriques. Ces nanostructures sont constituées d'une couche de verre sur laquelle sont déposés des nano-plots d'or. L'interface verre/nano-plots d'or est ensuite recouverte d'une couche de diamant (NCD).

Un calcul théorique du spectre de transmission de cette structure nous a permis de montrer que la position du pic LSPR dépendait de l'épaisseur du diélectrique (NCD), de la géométrie et de la période des nano-plots d'or. Concernant l'étude de l'influence de l'épaisseur du diélectrique, les données expérimentales ont imposé une géométrie pour l'interface Verre/nano-plots d'or, et le modèle théorique a été ajusté en conséquence. Nous avons alors pu comparer les courbes expérimentale et théorique représentant l'évolution de la longueur d'onde au minimum de transmission en fonction de l'épaisseur de diamant.

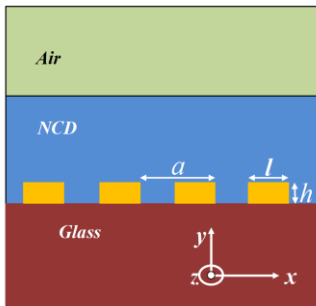


Figure 1: Schéma de la structure typique modélisée, à savoir des rubans d'or espacés de a et caractérisés par la longueur l et la hauteur h . La structure est déposée sur un substrat de verre ($n=1.51$), et recouverte d'une couche de diamant (NCD) et puis d'un milieu de détection, soit l'air ici.

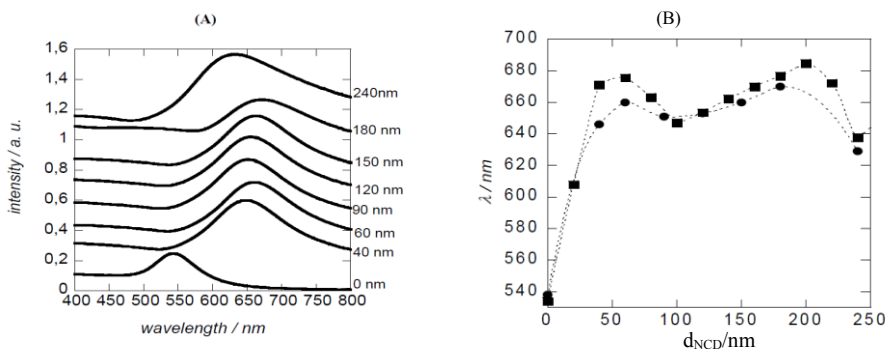


Figure 2: (A) Spectres d'absorption théoriques des plots métalliques, dans le cas où $l=25\text{nm}$, $a=70\text{nm}$ et $h=15\text{nm}$, et ce pour différentes valeurs de l'épaisseur de couche de NCD (B) Evolution de λ_{max} en fonction de l'épaisseur de NCD ; Comparaison entre les courbes expérimentale (cercles) et théorique (carrés).

Fabrication de métamatériaux par évaporation contrôlée en microfluidique

Julie ANGLY^{1,*}, Jean-Baptiste SALMON¹ et Jacques LENG¹

¹LOF, unité mixte CNRS/Rhodia/Bordeaux-I, 178 avenue du Dr Schweitzer, F-33608 Pessac Cedex France

*e-mail : julie.angly-exterieur@eu.rhodia.com

Nous étudions la formation de super-réseaux de nanoparticules d'or (NPs) par une technique microfluidique originale : la micro-évaporation [1]. Notre but est de créer des super-réseaux ainsi que de comprendre les mécanismes de leur formation en se basant sur les interactions entre NPs et la théorie de nucléation dans le but de générer des métamatériaux dans le visible pour l'optique.

L'outil que nous utilisons est basé sur la micro-évaporation. Cette technique permet, à partir de solutions diluées, de concentrer des états denses dans un dispositif microfluidique. Le dispositif est constitué d'un microcanal (quelques nanolitres de volume) moulé dans un élastomère (PDMS). Ce canal est en contact avec une membrane fine (10 μm d'épaisseur) qui est perméable à l'eau mais retient les solutés. Le solvant s'évapore pendant que les solutés se concentrent jusqu'à dépasser leur solubilité et peut-être cristalliser pour former des super-réseaux de NPs [2].

Ici, nous visons à créer des super-réseaux de NPs d'or à partir de solutions diluées de NPs d'or. Des NPs stables dans un solvant volatil sont requises. Nous les synthétisons dans de l'eau avec un ligand thiol-polyéthylène glycol comme agent de stabilisation stérique [3]. Ces NPs sont sphériques et font environ 15 ± 2 nm de diamètre.

Dans le microévaporateur, l'évolution de la concentration des NPs est suivie en temps et en espace par colorimétrie (figure 1) et par diffraction des rayons X (figure 2).

Au début, le canal est homogène et apparaît rose très clair (typique du plasmon des NPs d'or), puis les NPs se concentrent au bout du canal et la couleur rouge se fait plus intense jusqu'à devenir noire. A partir d'un certain temps (environ 100 min), une phase dense noire croît le long du canal microfluidique. La vitesse de croissance ainsi que la conservation de la masse permet d'estimer la fraction volumique de cette phase dense à environ 40% en NPs.

Pour caractériser cet état dense, des expériences de rayon X aux petits angles ont été réalisées durant une expérience de microévaporation (expériences réalisées à l'*European Synchrotron Radiation Facility*, Grenoble, ligne ID13). Une figure de diffraction est présentée sur la figure 2. Des taches de diffraction laissent penser qu'une structure ordonnée serait présente dans les états denses.

Alors que nous sommes toujours en train d'analyser ces résultats, ils semblent une voie promettante dans la création de super-réseaux en 3D.



Figure 1 : Suivi au cours du temps de la couleur de la solution dans le canal de microévaporation. Le réservoir est à gauche, le bout du canal à droite.

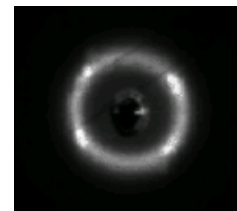


Figure 2 : Figure de diffraction observée par SAXS lors de la concentration de NPs d'or.

[1] J. LENG et al., *Phys. Rev. Lett.* **2006**, 96, 084503

[2] J.B. SALMON et al., *J. Appl. Phys.* **2010**, 107, 084905

[3] C. FERNANDEZ-LOPEZ et al., *Langmuir* **2009**, 25 (24), 13894-13899

Méthode modale B-spline pour le calcul de structures sub-longueur d'onde

Patrick Bouchon, Fabrice Pardo, Jean-Luc Pelouard
Laboratoire de Photonique et Nanostructures (LPN/CNRS),
Route de Nozay, 91460 Marcoussis, France
patrick.bouchon@lpn.cnrs.fr

Riad Haïdar
ONERA, the French Aerospace Lab
Chemin de la Huniere, 91761 Palaiseau Cedex, France

La conception de fonctions optiques à base de structures sub-longueur d'onde nécessite des outils de modélisation permettant de prévoir leurs propriétés électromagnétiques. Parmi les plus généraux, on peut citer la méthode des éléments finis ou les méthodes FDTD. Les méthodes modales sont plus adaptées pour des structures assimilables à des empilements de couches structurées suivant 1 ou 2 dimensions. La plus populaire est certainement la méthode de Fourier (RCWA), mais elle présente l'inconvénient de construire des matrices pleines.

Le but de la méthode modale B-spline (BMM) est d'accélérer les calculs grâce aux matrices creuses tout en conservant un niveau de précision équivalent à celui de RCWA. Dans chaque couche, le champ est décomposé en une expansion modale, et les équations de Maxwell sont résolues en interpolant le champ électromagnétique à l'aide de B-splines, conduisant in fine à la résolution d'une équation aux valeurs propres. Les B-splines sont une base de fonctions définies par des polynômes par morceaux sur un espace compact. Ils possèdent plusieurs qualités qui vont être mises à profit dans BMM. En premier lieu, ils peuvent être définis sur un maillage non-uniforme, qui peut ainsi être raffiné dans les zones où le champ varie fortement. Par ailleurs, les matrices creuses sont utilisées pour accélérer le calcul. Pour conclure la simulation électromagnétique de la structure, le calcul de l'empilement de couches est fait grâce à un formalisme de matrices de diffraction (matrices S). La convergence de BMM a été démontrée sur des exemples classiques [1,2].

Le calcul d'élément d'interface de matrice S fait en principe intervenir la totalité des vecteurs propres dans chacune des 2 couches. Nous avons démontré qu'on pouvait avec une bonne approximation ne prendre en compte qu'un nombre réduit de vecteurs propres dans ce calcul [3]. La mise en oeuvre d'algorithme efficace (ARPACK) pour calculer un nombre réduit de valeurs propres des matrices creuses permet un gain de calcul encore plus important.

[1] P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar, J.-L. Pelouard, Fast modal method for subwavelength gratings based on B-spline formulation, J. Opt. Soc. Am. A, **27**, 696, 2010

[2] P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar, J.-L. Pelouard, Simulations of nano-optics devices with a fast B-spline modal method, Proc. of SPIE **7717**, 771703, 2010

[3] P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar, G. Vincent, J.-L. Pelouard, Reduced scattering-matrix algorithm for high density plasmonic structures, Opt. Lett. **35**, 3222, 2010

Quelques aspects théoriques du problème d'électromagnétisme en régime harmonique dans un milieu hétérogène diélectrique/métamatériau

A.S. Bonnet-Ben Dhia, L. Chesnel, P. Ciarlet Jr.
POEMS, UMR 7231 CNRS/ENSTA/INRIA, ENSTA ParisTech, Paris, France
chesnel@ensta-paristech.fr

Nous nous intéressons au problème d'électromagnétisme en régime harmonique posé dans un milieu composé d'un diélectrique classique et d'un matériau à permittivité et perméabilité réelles négatives. En pratique, il est bien sûr illusoire de considérer un tel modèle de métamatériau à cause de la dissipation. Néanmoins, pour les applications, il conviendrait de limiter au maximum l'absorption du milieu. C'est pourquoi, nous avons d'abord étudié le cas d'un milieu hétérogène avec une faible dissipation. Nous avons prouvé que le comportement de la solution de ce problème, lorsque la dissipation tend vers zéro, dépend de la nature du problème non dissipatif. Il est donc crucial de bien comprendre le problème idéal qui, en raison du changement de signe des paramètres physiques, n'est pas couvert par la théorie classique.

Dans ce poster, nous nous concentrons sur l'étude du cas scalaire. Nous présentons la méthode de la T-coercivité qui permet de retrouver une certaine positivité en testant non pas directement contre le champ physique, mais contre une transformation géométrique simple de ce champ. Dans cette étude, deux paramètres jouent un rôle majeur : d'une part, le rapport des constantes physiques (contraste) entre le diélectrique et le métamatériau et d'autre part, la géométrie de l'interface.

Lorsque l'interface entre le diélectrique et le métamatériau est régulière et lorsque le contraste est différent de -1, on démontre que le problème de transmission est classiquement bien posé et que les méthodes numériques usuelles de type éléments finis convergent. Lorsque l'interface présente un coin, ceci n'est vrai qu'en dehors d'un intervalle critique de valeurs du contraste contenant -1. Dans cet intervalle, le problème n'est pas bien posé dans le cadre des champs d'énergie finie à cause de l'apparition d'une très forte singularité au niveau du coin. En ajoutant à l'espace des champs d'énergie finie cette singularité et en imposant une condition de radiation au niveau du coin, nous montrons comment on peut recouvrer un problème bien posé.

Réalisation de métamatériaux acoustiques par homogénéisation non périodique et développements asymptotiques raccordés

Abderrahmane BENDALI, Pierre-Henri COCQUET, Sébastien TORDEUX
IMT, Université Toulouse-3, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex

Nous étudions la diffraction d'ondes acoustiques par N hétérogénéités $\mathcal{B}_k$ de taille caractéristique δ implantées dans un domaine borné $\Omega \subset \mathbb{R}^3$, lorsque δ tend vers zéro en utilisant une méthode de développements asymptotiques raccordés [1]. Les hétérogénéités sont des boules de centre c_k et de rayon δ caractérisées par leurs impédances acoustiques notées $\alpha_k(\delta)$. Nous allons de plus supposer une certaine répartition sur les $\mathcal{B}_k$ [2]. Ainsi, pour tout cube $\Theta \subset \Omega$, nous imposons que le nombre d'inhomogénéités incluses dans Θ est donné par une certaine fonction de répartition $R \in \mathcal{C}(\overline{\Omega}, \mathbb{R}^+)$ telle que:

$$\mathcal{N}(\Theta) = \text{Card} \{k \in \{1, \dots, N\} / \mathcal{B}_k \subset \Theta\} = \left(\frac{1}{\delta} \int_{\Theta} R(y) dy \right) (1 + o_{\delta \rightarrow 0}(1)). \quad (1)$$

Les hétérogénéités peuvent donc ne pas être réparties périodiquement et on peut passer d'une zone avec à une zone sans hétérogénéités. Le but de cette étude est de montrer que l'onde diffractée par les hétérogénéités peut être obtenue de façon approchée à l'aide d'un indice caractérisant un métamatériau.

La technique des développements asymptotiques raccordés permet une description plus commode du comportement du champ interne aux couches limites à proximité des hétérogénéités et de son effet sur le champ externe aux couches limites diffracté par les hétérogénéités. La construction des développements asymptotiques s'appuie d'une façon fondamentale sur une caractérisation que nous donnons des solutions sortantes de l'équation d'Helmholtz sur tout l'espace privé des centres des hétérogénéités. Ainsi, en tenant compte de (1), on obtient que le champ externe u_δ vérifie:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} u_\delta(x) = u_0(x) = u_{inc}(x) + \frac{\kappa}{i} \int_{\Omega} u_{inc}(y) \frac{\nu(y) R(y)}{1 + \nu(y)} h_0^{(1)}(\kappa|x - y|) dy, \quad (2)$$

où $u_{inc}(x) = e^{i\kappa \langle x, d \rangle}$ est une onde plane, $h_0^{(1)}(z) = \frac{e^{iz}}{iz}$ et ν est une fonction vérifiant $\nu(c_k) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \alpha_k(\delta) \delta$. En comparant alors (2) avec une approximation de Born de la solution d'un problème de diffraction par un milieu d'indice de réfraction donné, il suit que l'indice du matériau homogénéisé est donné par:

$$n_{hom}(x)^2 = 1 - \frac{4\pi}{\kappa^2} \frac{R(x)\nu(x)}{1 + \nu(x)}.$$

Nous retrouvons ainsi le même résultat que [2] permettant en particulier de réaliser des métamatériaux acoustiques par homogénéisation non périodique.

Une extension aux équations de Maxwell de cette méthode d'homogénéisation non périodique est en cours d'investigation.

References

- [1] Joly, P. and Tordeux, S., Matching of asymptotic expansions for wave propagation in media with thin slots I: The asymptotic expansion, Multiscale Modeling and Simulation, vol. 5, 2007.
- [2] Ramm A.G., A recipe for making materials with negative refraction in acoustics, Physics Letters A, 2007.

Métamatériau à bande interdite électromagnétique reconfigurable par capillaires à plasma

Stefan Varault^{1,2}, Benjamin Gabard^{1,3}, Thomas Crépin¹, Jérôme Sokoloff²,
Sylvain Bolioli¹

¹ONERA/DEMR : 2, Avenue Edouard Belin, BP4025, 31055 Toulouse

²Université de Toulouse, UPS / LAPLACE / GRE : 118, Route de Narbonne, 31062 Toulouse

³FCS RTRA STAE : 23 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse

L'accroissement significatif des systèmes et des sources de rayonnement sur les plateformes induit une augmentation des contraintes imposées aux antennes. La variété de phénomènes accessibles grâce aux métamatériaux permet de répondre à certaines problématiques telles que la compacité, le couplage entre éléments, ou l'amélioration du diagramme de rayonnement.

L'introduction d'éléments accordables au sein des matériaux artificiels permet de développer des fonctions reconfigurables. De nombreuses solutions permettent de développer ces dispositifs (diode, Varicap, MEMS, ferroélectrique...) mais peu d'entre-elles permettent d'atteindre des propriétés continûment variables. Nous proposons d'utiliser les propriétés diélectriques des plasmas, décrites par le modèle de Drude, pour atteindre cet objectif.

Des défauts incorporant des capillaires à plasmas sont introduits dans des BIE développés en bande X, constitués de tiges d'alumine. En agissant sur le courant dans les capillaires, nous contrôlons les propriétés de ces défauts ponctuels ou linéiques pour développer des dispositifs tels que les coupleurs accordables ou des antennes reconfigurables. Des comparaisons entre simulations et expériences sont exposées. Enfin, nous proposons des évolutions de ces dispositifs.

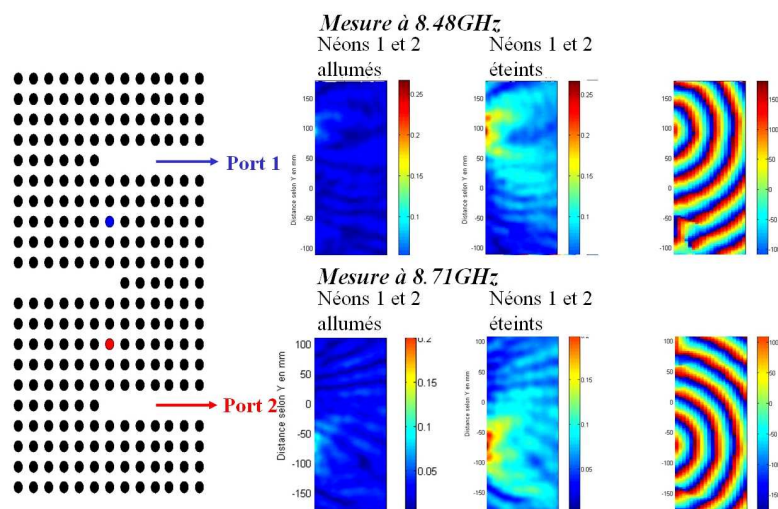


Figure : Cartographie de champ en sortie d'un démultiplexeur (amplitude et phase), les mesures sont réalisées aux fréquences de résonance propres aux capillaires, en comparant l'état éteint avec l'état ionisé

APPORT DE LA BIANISOTROPIE DANS L'APPARITION DU COMPOTEMENT MAIN GAUCHE

Zineddine.djeffal@upmc.fr
UPMC Univ Paris 06, UR 2,L2E,
4 place Jussieu , F-75005, Paris, France

Et si le phénomène de rétropropagation dans les structures métamatériaux était principalement dû à la bianisotropie ? Afin de répondre à cette question il faut revenir aux premiers travaux de John Pendry et David Smith sur les structures dites métamatériaux. En effet l'équipe de D. Smith, se basant sur les travaux de J. Pendry[1], proposa une structure présentant une réfraction négative composée d'un réseau de tiges présentant une permittivité négative et un réseau d'anneau fondus (plus communément appelé SRR pour Split Ring Resonator) présentant une perméabilité négative [2]. Ce réseau de SRR a été conçu en double anneaux afin d'éviter le phénomène de bianisotropie or d'après les travaux de Marqués [3], cette structure n'élimine pas vraiment ce phénomène. Afin de vérifier cela, nous avons effectué une simulation électromagnétique d'un réseau de SRR soumis à une onde plane. Cette simulation montre un phénomène de gyrotropie et un couplage magnétoélectrique. Ceci vient appuyer les travaux de Marqués sur le fait que la structure SRR est une structure bianisotrope. De plus, un phénomène de rétropropagation est apparue à l'intérieur du réseau ce qui prouve que même en utilisant des SRR seuls un comportement main gauche est observé. Afin de confirmer cette simulation, une mesure de l'angle de réfraction d'un prisme composé de SRR a été effectuée. L'angle mesuré montre bien une réfraction négative à la fréquence attendue. Une simulation de la propagation de l'onde à l'intérieur du prisme montre un phénomène de rétropropagation et une réfraction négative. Finalement et au vu de ces résultats, on peut soupçonner que l'origine du phénomène de rétropropagation à l'intérieur des structures métamatériaux à base de SRR peut être due au phénomène de bianisotropie.

Références :

- [1] J. Pendry, A. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 47, 2075 (1999).
- [2] D. Smith, W. Padilla, D. Vier, S. Nemat-Nasser, and S. Schultz, Phys. Rev. Lett. 84, 4184 (2000).
- [3] R. Marqués, F. Medina and R. Rafii-El-Idrissi. Phys. Rev. B 65 144440 (2002)

Cristaux photoniques en régime d'homogénéisation

Khanh-Van DO, Eric CASSAN*, Xavier Le Roux, Charles CAER, Delphine MARRIS-MORINI, Laurent VIVIEN
 Institut d'Electronique Fondamentale (UMR CNRS 8622)
 Université Paris-Sud, 91405 Orsay
eric.cassan@u-psud.fr

Résumé :

La conception et la fabrication de métamatériaux dans le domaine des fréquences optiques ont fait, dans la période récente, des progrès importants. L'enjeu des pertes optiques demeure néanmoins une préoccupation et un facteur limitant [1]. Afin de contourner cette difficulté et notamment de s'affranchir des pertes induites par l'utilisation des métaux, des travaux récents (2008-2010) ont proposé l'utilisation de métamatériaux tout-diélectriques. Il a été montré que les méthodes de transformations optiques pouvaient, dans une certaine mesure, s'appliquer à des structures tout-diélectriques, pour lesquelles seule une carte d'indice de réfraction était utilisée. Cette approche a été notamment appliquée à des problématiques d'invisibilité [2].

Du point de vue de la fabrication, les structures sont réalisées par modulation du facteur de remplissage en trous d'une membrane semiconductrice (silicium sur isolant : SOI), ce qui limite d'ailleurs assez sévèrement la plage de permittivité diélectrique disponible pour la mise en forme du champ électromagnétique. En ce sens, ces structures tout-diélectriques sont très analogues à des cristaux photoniques SOI, la différence principale tenant au fait que les ces « méta-matériaux tout-diélectriques » fonctionnent en régime d'homogénéisation, caractérisé par un rapport « méta-atome »/longueur d'onde très faible devant 1.

Nous proposons dans cette communication une approche complémentaire de l'optique transformationnelle pour l'étude de la propagation de la lumière dans de tel milieu. L'approche semi-classique adoptée repose sur l'optique hamiltonnienne [3]. Nous montrons que cette méthode permet, de manière assez générale, de prédire le profil bi-dimensionnel $r/a(x,y)$ des motifs à graver pour imposer aux faisceaux optiques une trajectoire prédéfinie. La méthode est appliquée au cas d'un virage à 90° (fig. 1), et le suivi de la trajectoire prévue est vérifié par simulation FDTD.

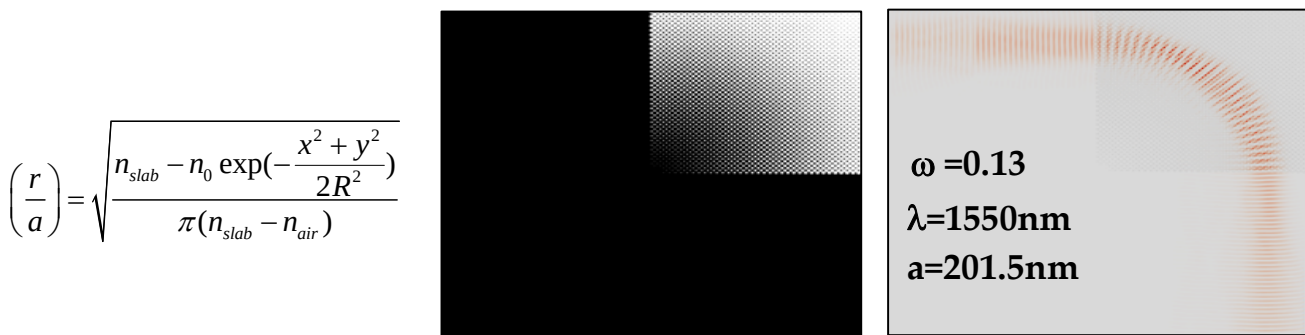


Figure 1: Propagation de la lumière dans un virage à 90° : a) Profil de remplissage prédit analytiquement pour imposer à la lumière une trajectoire circulaire, b) Profil de permittivité, c) Résultat de simulation FDTD.

Références :

- [1] "Fabrication of optical negative-index metamaterials : Recent advances and outlook", A. Boltasseva, V. M. Shalae, *Metamaterials*, vol. 2, pp. 1-17, 2009.
- [2] "Silicon nanostructure cloak operating at optical frequencies", L. H. Gabrielli, J. Cardenas, C. B. Poitras, M. Lipson, *Nature Photonics (Letters)*, pp. 1-3, 2009.
- [3] "Hamiltonian approach of non-uniform photonic crystals", Journal of Lightwave Technology, vol. 17 (11), pp. 1982-1988, 1999.

Light and Matter Waves in the Presence of Negative Refraction Media: Unusual Properties and Applications

Vasily Klimov (vklim@sci.lebedev.ru)

Lebedev Physical Institute, 53, Leninskij prospekt, Moscow, 119991, Russia

Jacques Baudon and Martial Ducloy

Laboratoire de Physique des Lasers, Université Paris 13 and CNRS, 93430 Villetaneuse

Despite the huge interest in negative refraction media (or negative index media - NIM), where phase and group velocities have opposite directions of propagation, no clear analytical solution of this problem was found until now for Maxwell or for Dirac fields. The absence of exact solutions results in many unproved and incorrect statements and application proposals. We present exact analytical solutions both for matter and light wave outgoing from a point source and suffering negative refraction in the half-space region or in a slab with negative refraction. It is a unique feature that for a lossless negative refraction material with $n=-1$ the theory of images can be applied allowing one to find an exact solution in spatial domain as a combination of real and imaginary sources (sinks) and free propagating surface plasmon waves. In Fig.1 energy flows for light (left panel) and massless electrons (right panel) found within our analytical solutions, are shown.

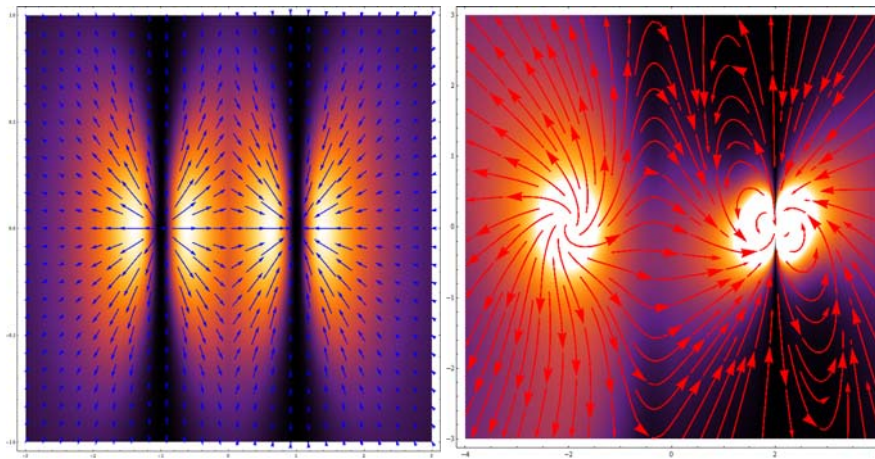


Fig.1. Energy flows in focusing of light (left panel) and matter (right panel) waves by a negative refraction half-space without losses. The yellow box indicates the negative refraction half-space. Sources and sinks are labeled by red and blue stars correspondingly [1]

From these figures, one can see that the behavior of energy flows differs for photons and electrons. While for the light we have straight flow lines with a sharp bend at the interface of the negative refraction half-space, for the electrons we have more complicated curves. Moreover, negative refraction for electrons, in fact, begins slightly in front of region of the negative refraction half-space. Other important feature of our solutions is the necessity to introduce singularity (sink) in the negative refraction half-space. This sink together with a source of field forms a pair that is analogous to particle-antiparticle pair explaining the Klein paradox. So, our results are another manifestation of the Klein paradox. The effects predicted can be verified more easily in the case of massless electrons in graphene. In the case of arbitrary small losses, there are also other solutions, where the singular sink of energy is replaced by distributed sink of energy, *i.e.* by surface plasmon waves. This branch of solution corresponds to a so-called superlens where image appears as surface plasmons at the interface. It is very important that our approach allows tracing appearance of both solution with point singularities and surface plasmon waves as a result of bifurcation of unique solution valid for a source placed far enough from a negative index material slab. As a result of this bifurcation, creation of a pair of source-sink or a pair of surface plasmons propagating in opposite directions takes place. For some other geometry (sphere, cylinder, wedge, cone etc) we have found analogous solutions. Possible applications of our solutions (preparation of entangled pairs of atoms, effective excitation of atom or molecules) will be also discussed. The authors would like to express their gratitude to the Russian Foundation for Basic Research (grants # 09-02-13560), University Paris Nord, and Centre National de la Recherche Scientifique (GDRE) for financial support of the present work.

[1] V. Klimov, J. Baudon, M. Ducloy, *Comparative focusing of Maxwell and Dirac fields by negative refraction half-space*, submitted for publication.

Coupleur à métamatériaux obtenu par transformation d'espace

R. Ghasemi¹, P.-H. Tichit¹, A. Degiron^{1,2}, A. de Lustrac¹, et A. Lupu^{1,2}

¹*Univ. Paris-Sud, Institut d'Electronique Fondamentale, UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France*

²*CNRS, Orsay, F-91405*

Les métamatériaux sont des structures artificielles permettant de réaliser des propriétés électromagnétiques entièrement nouvelles. Dans cette étude, nous étudions le potentiel de ces structures pour réaliser des composants d'optique intégrée. Nous considérons ici à titre d'exemple un adaptateur de modes permettant d'assurer la transition de la lumière entre deux guides d'onde SOI de largeur différente à 1.55 μ m.

Cet adaptateur consiste en une mince couche anisotrope à gradient d'indice directement déposée sur le guide large. Cette couche a été conçue à l'aide de la technique de transformation d'espace et nos simulations indiquent qu'elle permet de contrôler le signal se propageant dans le guide de façon efficace. La géométrie proposée est compatible avec les moyens de fabrication actuels.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ANR METAPHOTONIQUE.

CARACTERISATION ELECTROMAGNETIQUE DES METAMATERIAUX

Sandra Gómez¹, Patrick Quéffelec¹, Alexis Chevalier¹

¹ Lab-STICC, UMR CNRS 3192, UEB, Université de Bretagne Occidentale - 6 av. Le Gorgeu, CS 93837, 29238 Brest Cedex 3

Sandra.Gomez@univ-brest.fr : correspondant principal

Les propriétés particulières des métamatériaux (hétérogénéité, dispersion et anisotropie) imposent certaines conditions qui doivent être prises en compte pour la conception de nouvelles méthodes de caractérisation électromagnétique. La dispersion de leurs propriétés requiert des études large bande, leur anisotropie implique qu'il existe une dépendance de leur permittivité et perméabilité effectives vis-à-vis de la direction de l'excitation et le caractère fortement hétérogène du métamatériau complique l'utilisation des techniques habituelles d'homogénéisation.

Dans le cas particulier des métamatériaux à base d'inclusions métalliques, la direction du champ électromagnétique appliqué est imposée par l'orientation des inclusions, car le comportement recherché n'est obtenu que pour une orientation particulière des champs électrique et magnétique vis-à-vis des inclusions. Il est également nécessaire que l'amplitude des champs « vus » par les inclusions soit constante dans tout le volume du matériau.

Nous proposons ici de montrer l'application aux métamatériaux d'une méthode de caractérisation en ligne de transmission développée au laboratoire initialement pour la mesure des matériaux magnétiques [1]. En effet la configuration des champs électromagnétiques de cette cellule large bande est bien adaptée à la caractérisation des métamatériaux. La cellule de mesure utilisée est de type triplaque asymétrique (Fig. 1.). Dans l'approximation quasi-statique, la distribution des champs électromagnétiques est celle du mode quasi-TEM et la plus grande partie de l'énergie est concentrée entre le ruban et le plan de masse inférieur. L'échantillon de métamatériau placé sous le ruban interagit alors avec un champ électrique constant parallèle aux inclusions et un champ magnétique perpendiculaire.

Après une présentation de la cellule et de son intérêt pour la mesure de la perméabilité et de la permittivité effectives des métamatériaux, nous montrerons des résultats expérimentaux obtenus sur des métasolénoïdes.

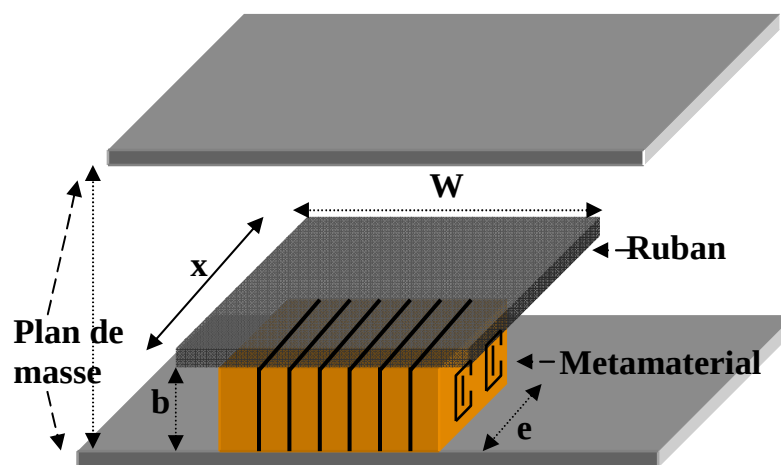


Figure 1. Ligne triplaque

- [1] E. Salahun, P. Quéffelec, M. L. Floc'h, and P. Gelin, «A broadband permeameter for “in situ” measurements of rectangular samples», IEEE Trans. Mag., vol. 37, pp. 2743–2745, 2001.

Absorption quasi totale de la lumière et génération de la chaleur par des métamatériaux plasmoniques

Jiaming Hao^{1,§}, Min Qiu², Lei Zhou³, Cheng-Wei Qiu⁴, and Said Zouhdi^{1,*}

1. LGEP, Supélec, Plateau de Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette, France

2. Laboratory of Photonic and Microwave Engineering, School of Information and Communication
Technology, Royal Institute of Technology, Electrum 229, 16440 Kista, Sweden

3. State Key Laboratory of Surface Physics, Physics Department, Fudan University, Shanghai 200433, China

4. Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore

Il y a un siècle, l'étude du rayonnement du corps noir a mené à l'émergence de la mécanique quantique [1]. Un corps noir absorbe tout le rayonnement électromagnétique qui l'éclaire. Il ne réfléchit et en laisse passer aucun rayonnement. Les “corps” avec un fort coefficient d'absorption sont d'une grande importance, présents dans de nombreux domaines de la science et de la technologie. Par exemple, les absorbeurs parfaits peuvent être utilisés comme photo-détecteurs, micro-bolomètres, images thermiques et absorbeurs et émetteurs pour la conversion d'énergie solaire thermo-photovoltaïque [2-6].

Nous calculons théoriquement et numériquement l'effet d'absorption et de génération de la chaleur dans les métamatériaux plasmoniques à leur résonance plasmonique. Sont étudiées trois différents types de structures disposant toutes de hautes performances d'absorption des lumières visibles. L'objectif principal de ce travail est de présenter une compréhension intuitive et originale des effets de haute performance d'absorption. Du point de vue électromagnétique macroscopique, l'approche du milieu effectif est utilisée pour décrire les effets d'absorption des métamatériaux plasmoniques. D'autre part, les distributions du champ et les effets de génération de chaleur dans ces nanostructures plasmoniques sont étudiées, ce qui fournit également une description qualitative satisfaisante du comportement d'absorption d'un point de vue microscopique.

[§] Email: jiaming.hao@supelec.fr, ^{*} Email: said.zouhdi@supelec.fr.

Références:

- [1] M. Planck, Ann. D. Phys. **4**, 553-559 (1901).
- [2] Y. Ahn, J. Dunning, and J. Park, Nano Lett. **5**, 1367-1370 (2005).
- [3] X. L. Liu, T. Starr, A. F. Starr, and W. J. Padilla, Phys. Rev. Lett. **104**, 207403 (2010).
- [4] T. J. Coutts, Renewable and Sustainable Energy Reviews. **3**, 77 (1999).
- [5] M. Law, L. E. Greene, J. C. Johnson, R. Saykally, and P. D. Yang, Nature Mater. **4**, 455 (2005).
- [6] J. M. Hao, J. Wang, X. L. Liu, W. J. Padilla, L. Zhou, and M. Qiu, Appl. Phys. Lett. **96**, 251104 (2010).

Réfraction négative des ondes longitudinales dans un cristal phononique élastique

Anne-Christine Hladky-Hennion¹, Charles Croëne¹, Jérôme Vasseur¹, Bertrand Dubus¹,
Bruno Morvan²

¹ : Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie, UMR CNRS 8520, Département ISEN,
41 Boulevard Vauban, 59046 Lille

² : Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, FRE-3102 CNRS, Place Robert Schuman, 76610 Le Havre, France

A l'image de la réfraction négative des ondes électromagnétiques dans les cristaux photoniques, les travaux présentés portent sur la réfraction négative des ondes acoustiques et élastiques à l'aide de cristaux phononiques. Ils bénéficient d'un soutien de l'ANR (projet blanc SUPREME ANR-08-BLAN-0101-01).

Les cristaux phononiques (CP) sont habituellement définis comme des matériaux artificiels faits d'une distribution périodique de diffuseurs dans une matrice. En faisant varier la géométrie du réseau d'inclusions et la nature des matériaux constitutifs, la structure de bande du CP peut présenter des courbes de dispersion avec une pente négative, c'est-à-dire que le vecteur d'onde et la vitesse de groupe, associés à une onde acoustique, sont de direction opposée. Cette propriété est typique d'un matériau main gauche et implique un indice de réfraction négatif dans la loi de Snell Descartes. Le phénomène de réfraction négatif autorise la réalisation de superlentilles plates capables de focaliser les ondes élastiques sous la limite de diffraction. De telles lentilles ont des applications potentielles dans le domaine de l'imagerie médicale ou de la thérapie.

Sur ce poster, la réfraction négative d'ondes longitudinales est mise en évidence, aussi bien numériquement qu'expérimentalement, pour un CP bi-dimensionnel à matrice solide, les études précédentes portant sur des CP à matrice fluide. Le CP est composé d'un arrangement triangulaire de tiges d'acier dans une matrice époxy. Les courbes de dispersion présentent bien une branche négative, qui correspond à un mode à comportement longitudinal prédominant. La possibilité d'utiliser le CP dans un environnement fluide est vérifiée numériquement par l'intermédiaire de la simulation d'une lentille plate. La démonstration de la réfraction négative des ondes élastiques rend possible la réalisation de superlentilles acoustiques solides et, à terme, le développement de dispositifs d'imagerie acoustique reconstituant une image réelle.

Courbement des ondes électromagnétiques par gradient d'indice des métamatériaux à 1.55 μm

M. Hofman, X. Mélique, O. Vanbésien and D. Lippens .

Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, CNRS 8520, Université des Sciences et technologies de Lille, 59652 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

m.hofman@ed.univ-lille1.fr

Résumé : nous reportons ici les premiers résultats de simulation numérique de la courbure des ondes électromagnétiques issues d'une source quasi ponctuelle à l'aide de métamatériaux entièrement diélectriques, à gradient d'indice. Le contrôle du diagramme de dispersion des ondes par des effets de taille et donc de la vitesse de la vitesse de propagation est ici obtenu à l'aide de résonance de MIE dans un réseau de pilier semi-conducteurs structuré *localement* modifiant les valeurs de permittivité et perméabilité effectives. La focalisation d'une source en champ lointain est démontrée par la transformation de l'onde plane incidente en un point focal d'extension sous longueur d'onde. Outre la possibilité d'effectuer la transformation onde plane/onde cylindrique, ces dispositifs devraient présenter une meilleure résolution par rapport aux lentilles planes à indice négatif dans le cas d'un fonctionnement en régime de grande longueur d'onde.

La structuration artificielle, à une échelle très petite devant la longueur d'onde (métamatériau), des composés métalliques (plasmoniques) ou entièrement diélectriques ouvre la voie vers de nouvelles fonctionnalités notamment aux fréquences des télécommunications telles que la super- et l'hyper-focalisation ou la furtivité par les composants d'invisibilité. Au plan de la réalisation et des performances, outre les défis de la structuration aux très faibles dimensions, la principale difficulté de l'approche plasmonique concerne les pertes particulièrement importantes aux fréquences optiques. Pour palier cet inconvénient majeur pour l'utilisation pratique des métamatériaux, des structures entièrement diélectriques telles que les réseaux de trous dans une matrice semi-conductrice ont été étudiées [1-4]. Assimilables à des cristaux photoniques à deux dimensions, ces réseaux présentent des effets de dispersion singuliers tels que l'obtention d'un indice de réfraction négatif en seconde bande qui peuvent être mis à profit par exemple pour la focalisation par lentille plane et son extension à la tomographie en réflexion [4]. La résolution de ces dispositifs est nécessairement limitée par la condition de Bragg, remplie pour des fréquences correspondant au gap de photon. Par ailleurs, seules des sources ponctuelles peuvent être focalisées. Dans cette communication, nous cherchons comment augmenter la fonctionnalité de ces dispositifs et leur résolution, par un réseau de piliers [5] utilisant les résonances de Mie. Les dimensions des ces piliers sont sous longueur d'ondes

et variables dans l'espace afin d'introduire un gradient d'indice effectif transverse. Cette solution s'apparente donc aux lentilles à gradient d'indice, l'originalité venant de l'utilisation des technologies métamatériaux. Les simulations ont été faites sur la base d'un réseau de

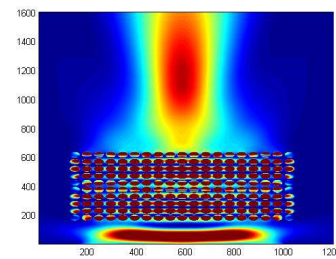


Fig. 1 : Cartographie du champ $|E|^2$ pour une onde incidente plane

piliers semi-conducteurs de diamètre $d=100\text{nm}$ dont l'indice effectif est de 3.26 (Fig. 1), compte tenu de la présence au sein du pilier d'une couche de confinement quaternaire (InGaAsP) encadrée par des couches InP de dimensions finies. La maille du réseau est rectangulaire. Pour l'essai de fabrication, le diamètre des piliers de 300nm a été pris constant pour faciliter la gravure profonde ICP (Inductive Coupled Plasma) sur $2\mu\text{m}$ (Fig.2). En revanche, la période selon la direction, perpendiculaire à la direction de propagation, varie et par voie de conséquence la composante transversale des tenseurs de permittivité et perméabilité. L'onde électromagnétique en se propageant dans le cristal voit son front de phase se courber progressivement permettant sa focalisation en aval de la lentille.

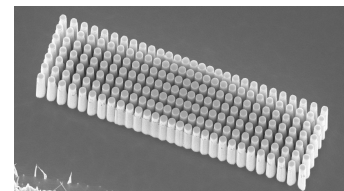


Figure 2 : Cliché MEB d'une lentille à gradient d'indice à base de piliers.

- [1] N. Fabre et al Phys. Review Letters **101**,073901 (2008)
- [2] E. Centeno et al Appl Phys Lett **92**, 133501 (2009)
- [3] G.Scherrer et al. Applied Phys. Lett. **97**,071119 (2010)
- [4] M. Hofman et al Applied Optics Vol 283, 1169-1173.
- [5] Vinck et al Phys Rev. Lett. **102**,133901 (2009)

Les résonateurs de forte permittivité, des briques pour les métamatériaux diélectriques

T. Lepetit^{1,2}, E. Akmansoy¹ et J-P. Ganne²

1) Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, Université Paris-Sud, Bât 220, 91405 Orsay Cedex, France

2) Thales Research and Technology, Route Départementale 128, 91767 Palaiseau Cedex, France

Les métamatériaux sont des matériaux artificiels, ou composites, dont les propriétés électromagnétiques effectives (ϵ_{eff} , μ_{eff}) peuvent prendre des valeurs non usuelles en comparaison des matériaux homogènes « classiques ». Ils tirent leurs propriétés de la structure géométrique de leurs inclusions ce qui permet de faire leur ingénierie dans une vaste gamme de fréquences (Hz-THz). De plus, leurs inclusions sont résonnantes, ce qui permet d'obtenir des valeurs de ϵ_{eff} et μ_{eff} négatives, et conduit aux propriétés les plus inattendues tel un indice de réfraction négatif [1]. Les métamatériaux offrent de nombreuses opportunités, notamment en radiofréquences (RF), pour la conception de filtres et d'antennes [2].

De par leur caractère résonnant, les métamatériaux présentent de fortes pertes. En RF, la plupart des métamatériaux sont constitués de pistes métalliques gravées sur un substrat. Dans ce cas, les pertes proviennent essentiellement du substrat. Cependant, il existe une alternative aux métamatériaux métalliques, les métamatériaux diélectriques. Ceux-ci sont constitués de matériaux de forte permittivité et, dans ce cas, les pertes sont essentiellement gouvernées par ledit matériau. Depuis les années 70, des matériaux de forte permittivité $30 < \epsilon_r < 100$ et de faible tangente de pertes $10^{-3} < \tan\delta$ ont été mis au point [3]. Cette voie diélectrique ouvre la porte à une réduction des pertes.

Les résonateurs diélectriques les plus utilisés en RF sont le cylindre, l'anneau, la sphère et dans une moindre mesure le parallélépipède. D'autres résonateurs moins courants, tels que le résonateur fendu en anneau (SRR) ou en spirale ont également été fabriqués [4]. Afin de concevoir des métamatériaux diélectriques, il est nécessaire d'identifier les modes de résonance dipolaires, électrique et magnétique, de ces résonateurs. Le cas du cylindre est étudié en détail, en bande X (8.2-1.4 GHz) et pour un matériau de permittivité 78 et de tangente de pertes 10^{-3} . Les modes dipolaires magnétique ($TE_{01\delta}$ et $HEM_{11\delta}$) et électrique ($TM_{01\delta}$ et $HEM_{12\delta}$) sont identifiés et mesurés [5]. Il est montré que le modèle de Cohn donne leurs fréquences de résonance avec une bonne précision et permet ainsi une conception rapide [6]. De plus, d'autres modes de résonance ($HEM_{21\delta}$ et $HEM_{22\delta}$), de caractère multipolaire et donc indésirables, sont identifiés. Le modèle de Cohn permet de concevoir des résonateurs pour lesquels ces derniers modes sont rejetés à plus hautes fréquences.

Références

- [1] R.A. Shelby, D.R. Smith et S. Schultz, « Experimental verification of a negative index of refraction », *Science* 292, 79 (2001).
- [2] A. Ourir, A. de Lustrac et J-M. Lourtioz, « All-metamaterial-based subwavelength cavities ($\lambda/60$) for ultrathin directive antennas », *Appl. Phys. Lett.* 88, 084103 (2006).
- [3] S.B. Narang et S. Bahel, « Low-loss dielectric ceramics for microwave applications : a review », *J. Ceram. Proc. Res.* 11, 316 (2010).
- [4] F. Guérin, P. Bannelier, M. Labeyrie, J-P. Ganne et P. Guillon, « Scattering of electromagnetic waves by helices and application to the modeling of chiral composites. II. Maxwell Garnett treatment », *J. Phys. D : Appl. Phys.* 28, 643 (1995).
- [5] T. Lepetit, E. Akmansoy et J-P. Ganne, « All-dielectric metamaterial : a ferroelectric based scheme in the microwave range », *Proc. SPIE* 7392, 7392H (2009).
- [6] D. Kajfez et P. Guillon, « Dielectric resonators », Artech House, Norwood (1986).

Conception et Mesures de Surface à Haute Impédance

Fabrice Linot^{1,2}, Richard Cousin³, Xavier Begaud¹, Michel Soiron⁴, Christian Renard²

¹Institut Telecom - Telecom ParisTech - LTCI - CNRS - UMR 5141 - 46 Rue Barrault, 75634 Paris, France

²THALES Airborne Systems 78852 Elancourt Cedex France

³CST AG Bad Nauheimer Str. 19, D - 64289 Darmstadt, Germany

⁴SART, Paris France

La phase de dimensionnement des Surfaces à Haute Impédance (SHI) est un challenge pour obtenir des antennes et réseaux compacts. Pour accomplir cette étape, un simulateur électromagnétique 3D est requis. Cette communication présente une vue d'ensemble des différentes méthodes numériques pouvant être appliquées pour caractériser les propriétés électromagnétiques d'une SHI à l'aide de CST Microwave Studio® (CST MWS). La SHI considérée est composée d'un réseau de pavés carrés métalliques imprimé sur un diélectrique surmontant un plan de masse. Pour démontrer la validité des différentes méthodes utilisées, des mesures de la structure considérée ont été réalisées en simulateur guide d'onde.



Figure 1 : Simulateur guide d'onde

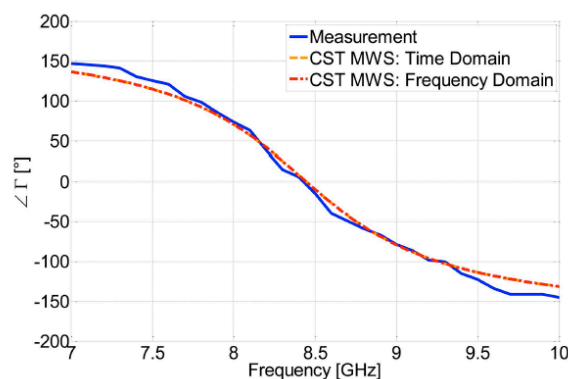


Figure 2 : Comparaison des différentes méthodes numériques avec une mesure pour déterminer la phase du coefficient de réflexion d'une SHI

Evaluation by ultrasonic method of the effect of tempering treatment on mechanical properties of hardened steel

A. Markou¹, H. Nounah¹, M. Ezzaidi¹ and I. Aboudaoud¹

¹Laboratory of metrology and information processing, faculty of sciences, Ibn Zohr university, Morocco

Abstract

We have studied by a non destructive testing system the effect of tempering treatment on acoustical and mechanical properties of hardened steel, the measurements are performed by an ultrasonic transducer with 10MHz in a center frequency, working on monostatic mod. The measurements are made for three samples of steel, each of these specimens are hardened according to different conditions (duration and fluid of quenching). From the signals backscattered by the samples we have determined the velocity of longitudinal wave and then we have deduced from, the mechanical properties of specimens.

Keywords : ultrasonic methods, Non destructive testing, Acoustic methods, advanced materials, tempering steel

Un Micro Résonateur à Métamatériaux Spirale

S. Nemer, B. Sauviac, B. Bayard

Laboratoire Télécom Claude Chappe (LT2C), université de Saint Etienne, France

Abstract- Les résonateurs micro-rubans et les filtres hyperfréquences (HF) ont une grande importance dans la fabrication des systèmes sans fil de la prochaine génération. Il existe des résonateurs micro-rubans miniatures à base de ferrite, fonctionnant autour de 2 GHz [1, 2], mais qui présente des pertes d'insertion importantes. D'autres micro résonateurs (super-compact Left-Handed Resonator [3]) possèdent de faibles dimensions par rapport à la longueur d'onde mais l'utilisation de vias rend la fabrication plus couteuse et limite la réduction de la largeur des rubans.

Dans ce travail, nous proposons un micro résonateur à base des spirales récemment étudié pour créer un matériau artificiel [4]. Ces particules peuvent être facilement couplées avec une ligne micro-ruban pour créer un filtre coupe bande. Le design proposé nous permet d'éviter l'utilisation de vias et les dimensions sont très compactes par rapport à la version à ferrite.

La structure est conçue sur de l'alumine (99.5% Al_2O_3) d'épaisseur $h=635\mu\text{m}$, de permittivité $\epsilon_r=9.8$, et d'une tangente de pertes diélectriques $\text{tg}(\delta)=10^{-4}$. Les dimensions des spirales sont choisies en essayant d'optimiser la surface, en respectant la précision de fabrication et en veillant à obtenir un flux du champ magnétique à l'intérieur de la spirale suffisant et presque constant. Ceci nous a conduits à proposer des spirales très allongées de longueur globale plus petite ou égale à $\lambda_g/10$. La largeur du micro-ruban est choisie pour obtenir une ligne adaptée à 50Ω . Une étude numérique a été faite à l'aide d'un simulateur 3D. Dans ces conditions, on observe une résonance à 1.33GHz pour une taille du dispositif vraiment miniaturisée.

REFERENCES

1. Y. Kinoshita, S. Kubota, S. Takeda, and A. Nakagoshi. Planar resonator and integrated oscillator using magnetostatic waves. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelec., and Freq. Control, 37(5):457_463, 1990.
2. Yahi, I., Bayard B, "Etude d'un micro résonateur hyperfréquence en structure planaire à couche mince de ferrite", 9^{èmes} journées de caractérisation micro-ondes et matériaux, Saint- Étienne, France, 29, 30, & 31 mars 2006.
3. Jokanović, B. and Crnojević-Bengin, V., "Super-Compact Left-Handed Resonator for Filter Applications", proceedings of the 37th European Microwave Conference, October 2007, Munich, Germany.
4. B. Sauviac, S. Nemer, B. Bayard, T. Rouiller, "S-Spirals particles to design an artificial material with high permittivity behaviour ", Proceedings of Metamaterials'2007 , Rome , Italy , October 22-26, 2007

Métamatériaux entièrement diélectriques pour applications submillimétriques

Riad Yahiaoui¹, Valérie Vignéras², U-Chan Chung³, Mario Maglione³, Catherine Elissalde³, Sylvain Lannebère⁴, Ashod Aradian⁴ et Patrick Mounaix¹

¹ Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine, Université Bordeaux1, UMR CNRS 5798,
351 Cours de la Libération, 33405 Talence cedex

² Laboratoire de l'intégration du matériau au système, Université Bordeaux 1, UMR CNRS 5218,
16 avenue Pey Berland 33607 Pessac Cedex.

³ Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux CNRS-UPR 9048, 87 av Dr. Schweitzer 33608 Pessac

⁴ Centre de Recherche Paul Pascal – CNRS UPR 8641& Université Bordeaux 1, 115 av. du Dr Schweitzer 33600 Pessac

r.yahiaoui@loma.u-bordeaux1.fr : correspondant principal

Depuis l'avènement des métamatériaux avec les travaux pionniers de V. Veselago¹, vers la fin des années 60, le monde de la physique fut complètement révolutionné avec leurs propriétés extraordinaires, n'existant pas à l'état naturel. Grace aux structures proposés initialement par J. B. Pendry et al^{2,3}, puis fabriqués et caractérisés expérimentalement par R. A. Shelby et al⁴, de nombreux groupes de recherches ont contribué au développement et à l'essor considérable que connaît actuellement cette nouvelle génération de matériaux. Dans ce résumé nous présentons les travaux effectués sur un métamatériau entièrement diélectriques à base de Dioxyde de Titane, un composite à très forte valeur de permittivité diélectrique relative (TiO_2 , $\epsilon_r=90$), calculé, fabriqué et caractérisé pour une fonctionnalité, dans la gamme de fréquences téraherz. Notre métamatériau présente un magnétisme artificiel avec $\text{Re}(\mu_{\text{eff}}) < 0$ sur une très large bande de fréquence estimée à environ 200 GHz (voir figure 1). Cette catégorie de métamatériau, dont le fonctionnement est basé sur le principe des résonances de Mie⁵⁻⁷, constitue une remarquable alternative aux structures classiques métal-diélectrique, offrant ainsi la possibilité de concevoir des structures isotropes à faibles pertes.

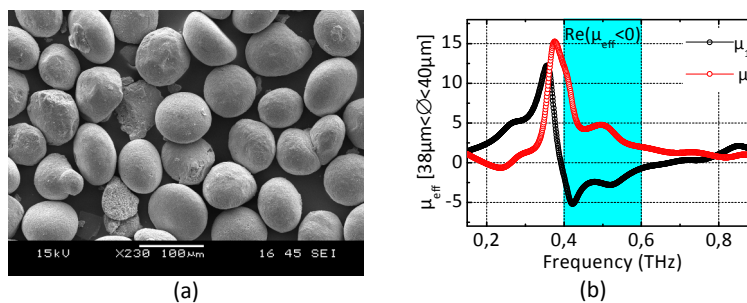


Figure 1. (a) Image au microscope électronique à balayage (MEB) des microparticules de TiO_2 utilisées pour notre métamatériau, (b) parties réelle et imaginaire expérimentale de la perméabilité effective magnétique calculés par méthode d'inversion des coefficients de transmission et de réflexion en modules et phases

Références

- [1] V. G. Veselago, "the electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Sov. Phys. Usp.* **10**, 509-514 (1968).
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, D.J. Robbins and W. J. Stewart, "Low frequency plasmons in thin thin-wires structures", *J. Phys. Cond. Mat.* **10**, 4785-4809 (1998).
- [3] J. B. Pendry, A.J. Holden, D. J. Robbins and W.J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena frequency plasmons in thin thin-wires structures", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, **47**, 2075-2084 (1999).
- [4] R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction", *Science*, **292**, 77-79 (2001).
- [5] Vendik, O.G. Gashinova, M.S, "Artificial double negative (DNG) media composed by two different dielectric sphere lattices embedded in a dielectric matrix", *Proc. 34th European Microwave Conference, Amsterdam* (IEEE Press, Piscataway, NJ, 2004), **3**, p. 1209-1212 (2004).
- [6] H. Němec, P. Kužel, F. Kadlec, C. Kadlec, R.Yahiaoui and P. Mounaix, "Tunable terahertz metamaterials with negative permeability", *Phys. Rev. B* **79**, 241108(R) (2009).
- [7] R.Yahiaoui, H. Němec, P. Kužel, F. Kadlec, C. Kadlec, and P. Mounaix, "Broadband dielectric terahertz metamaterials with negative permeability", *Opt. Lett.* **34**, 3541-3543 (2009).

Techniques d'Hybridation pour la Réalisation de Métamatériaux Isotropes et la Super-résolution

Abdelwaheb Ourir, Redha Abdeddaim, Julien de Rosny

*Institut Langevin, ESPCI ParisTech, UMR 7587, CNRS, Laboratoire Ondes et Acoustique (LOA),
10 rue Vauquelin 75231 PARIS Cedex 05 France*

Durant la dernière décennie, plusieurs tentatives de réalisation de métamatériaux en infra-rouge et dans le domaine visible ont été proposées. Il s'agit de véritables tours de force dans la mesure où la période du réseau est de l'ordre du dixième de la longueur d'onde. De nouvelles structures, plus simples à réaliser à l'échelle nanométrique, ont été récemment introduites. Leur fonctionnement repose sur l'hybridation de résonances de plasmons [1].

Nous avons contribué à la compréhension à la fois théorique et expérimentale de ces nouvelles structures en micro-ondes. En particulier, nous proposons une nouvelle structure pour la réalisation de stéréo-métamatériaux isotropes appropriés à l'optique en se basant sur le principe d'hybridation [2]. Actuellement, nous utilisons le principe couplage de modes pour la réalisation de « metalens » [3] magnétique permettant la focalisation sub-longueur d'onde. Nous avons montré la possibilité de réaliser une imagerie sub-longueur d'onde en champs lointain par des résonateurs à anneaux fendus.

Références

- [1] E. Prodan, C. Radloff, N. J. Halas, and P. Nordlander, *Science* 302, 419, 2003.
- [2] A. Ourir, R. Abdeddaim, and J. de Rosny, submitted to *Opt. Lett.*, December 2010.
- [3] F. Lemoult, G. Lerosey, J. de Rosny, and M. Fink, *PRL* 104, 203901 (2010).

Cristaux phononiques à résonances locales

Y. Pennec, H. Larabi, B. Djafari-Rouhani, A. Akjouj, G. Lévêque

Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, UMR CNRS
8520, Université de Lille1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

Les métamatériaux acoustiques donnent la description d'une structure par les calculs des paramètres effectifs comme l'impédance et l'indice de réfraction acoustique. Ces matériaux peuvent présenter des propriétés de réfraction négative à des fréquences spécifiques. De telles propriétés peuvent être utilisées dans la focalisation des champs acoustiques permettant de définir des lentilles d'indice négatif qui présentent la propriété de dépasser la limite de diffraction. Ces métamatériaux acoustiques permettent également de réaliser des propriétés d'invisibilités aux ondes élastiques. Une bande interdite absolue, quand elle existe, peut être un gap de type Bragg. Elle peut aussi trouver son origine dans des résonances locales de la structure. Dans ce dernier cas, on montre qu'il est possible d'obtenir des bandes interdites absolues à des valeurs de fréquences un à deux ordres de grandeur inférieurs à celles prédites par la diffraction de Bragg. Cette propriété conduit à l'obtention de très basses fréquences sans augmentation démesurée de la cellule unitaire du cristal. Nous nous sommes intéressés à un cristal phononique à deux dimensions constitué d'inclusions multi-coaxiales enrobées dans une matrice d'eau ou d'époxy. Les inclusions sont constituées d'un cœur solide recouvert de couches alternativement constituées d'un matériau solide et mou. Le matériau mou peut être choisi comme un gel ou un caoutchouc et doit présenter une vitesse intrinsèque très faible. Nous avons mis en évidence l'existence de deux types de résonances à basses fréquences d'origine physique différente. La première est associée à une vibration de l'anneau et du cœur solides en opposition de phase (figure 1), le polymère jouant le rôle de ressort. La seconde résonance (figure 2) est due à une vibration de l'anneau de polymère, les parties rigides restant fixes. Au-delà de ces propriétés de bouclier sonore, nous nous intéressons au comportement du milieu effectif de ces matériaux dans le voisinage de ces résonances locales par un calcul de la densité de masse et de la compressibilité effectives. Nous montrons que ce métamatériau peut être simplement ou doublement négatif selon l'origine de la résonance. Autour de la résonance de premier type, seule la densité de masse effective montre un changement de signe. Cette propriété est en accord avec la vibration en opposition de phase du cœur et de l'anneau rigide (figure 1b). Pour le second type de résonance, nous mettons en évidence un changement de signe à la fois de la densité et de la compressibilité, permettant ainsi d'envisager une application vers les propriétés de réfraction négative.

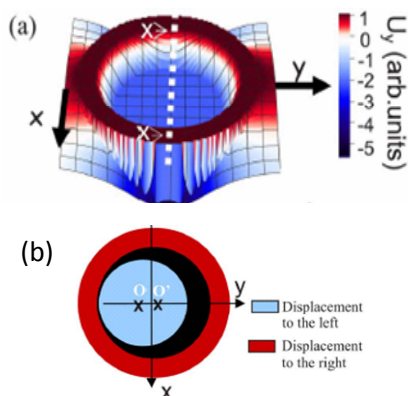


Figure 1

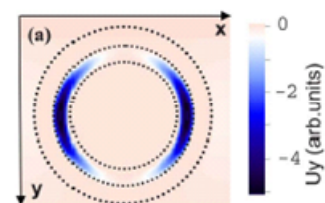


Figure 2

Auto-collimation et focalisation de la lumière dans des métamatériaux d'indice moyen nul.

Rémi Pollès, Emmanuel Centeno, Julien Arlandis, Antoine Moreau
Université Blaise Pascal, LASMEA, Aubière

De nouveaux matériaux à bande interdite photonique alternant des couches d'indices optiques positifs et négatifs ont récemment montré de nouvelles possibilité de contrôle de la propagation des ondes [1]. Lorsque l'indice optique moyen sur une période est nul, apparaît un gap photonique insensible à la périodicité du cristal, à la polarisation de la lumière ou au désordre [2]. L'existence de ce gap, nommé « zero-n gap », a été démontré dans le domaine des mirco-ondes dans des dispositifs à base de métamatériaux métalliques [3], ainsi qu'aux longueurs d'ondes optiques avec des cristaux photoniques 2D d'indice effectif négatif [4]. Lorsque des conditions de résonance particulières sont vérifiées, des modes de transmission peuvent en outre être créés dans le domaine des fréquences du zero-n gap. Nous montrerons que paradoxalement, les métamatériaux d'indice moyen nul présentent des propriétés d'auto-collimation et de focalisation lorsque la lumière est propagée via les états résonnants du zero-n gap [5-6].

Références

- [1] J. Li, L. Zhou, C. Chan, and P. Sheng, "Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials," *Phys Rev Lett* **90**, 83901 (2003).
- [2] D. Bria, B. Djafari-Rouhani, A. Akjouj, L. Dobrzynski, J. Vigneron, E. E. Boudouti, and A. Nougouai, "Band structure and omnidirectional photonic band gap in lamellar structures with left-handed materials," *Phys. Rev. E* **69**, 066613 (2004).
- [3] Y. Yuan, L. Ran, J. Huangfu, H. Chen, L. Shen, and J. Kong, "Experimental verification of zero order bandgap in a layered stack of left-handed and right-handed materials," *Opt Express* **14**, 2220–2227 (2006).
- [4] S. Kocaman, R. Chatterjee, N. Panoiu, J. Mcmillan, M. Yu, R. Osgood, D. Kwong, and C. Wong, "Observation of zeroth-order band gaps in negative-refraction photonic crystal superlattices at near-infrared frequencies," *Phys Rev Lett* **102**, 203905 (2009).
- [5] V. Mocella, S. Cabrini, A. Chang, P. Dardano, L. Moretti, I. Rendina, D. Olynick, B. Harteneck, and S. Dhuey, "Self-collimation of light over millimeter-scale distance in a quasi-zero-average-index metamaterial," *Phys Rev Lett* **102**, 133902 (2009).
- [6] Rémi Pollès, Emmanuel Centeno, Julien Arlandis, Antoine Moreau, « Self-collimation and focusing effects in zero-average index metamaterials », soumis (2011).

L'auto-assemblage comme outil de fabrication : particules plasmoniques organisées dans des matrices polymère nanostructurées

C. Tallet, J. Vieaud, O. Merchiers, A. Kumar, F. Nallet, A. Aradian and V. Ponsinet
 Université Bordeaux 1 – CNRS, Centre de Recherche Paul Pascal UPR 8641, avenue
 Schweitzer, 33600 Pessac, France

Des techniques de fabrication "bottom-up" sont aujourd'hui envisagées pour la fabrication de matériaux fonctionnels nanostructurés, et en particulier pour des systèmes nanophotoniques et des métamatériaux. Ces approches présentent les avantages de générer des matériaux tridimensionnels et de manipuler des nano-résonateurs de taille nanométrique. La nanochimie et l'auto-assemblage apparaissent ainsi des outils de fabrication potentiels. Parmi les systèmes auto-assemblés, les copolymères à blocs sont particulièrement intéressants. Constitués de deux chaînes macromoléculaires de nature distincte attachées ensemble, ils présentent des structures spontanées à l'état solide avec de l'ordre à longue portée et des périodes caractéristiques modulables entre 10 et 50 nm. En particulier, des structures de lamelles alternées et de cylindres organisés en réseau hexagonal sont décrites dans de nombreux systèmes. Ce sont, cependant, des matériaux organiques présentant des propriétés optiques non remarquables. Ils doivent donc être considérés comme des 'templates' utilisés pour organiser des entités actives. Nous considérons comme entités actives des nanoparticules présentant une résonance plasmonique. Les progrès récents de la chimie des nanoparticules en voie solvant ont permis des améliorations significatives du contrôle qu'on peut obtenir en terme de leur composition, chimie de surface, taille et propriétés.

Dans notre étude, des nanoparticules d'or sont incorporées dans des matrices polymères de différentes nanostructures. Nous souhaitons corréler la nature, la densité et l'organisation spatiale des particules avec les propriétés optiques des nanocomposites obtenus.

Deux systèmes expérimentaux distincts sont considérés. Dans le premier, des nanosphères d'or sont dispersées sans organisation dans des films minces de polymère déposés sur des wafers de silicium ou des lames de verre. On fait varier la fraction volumique d'or entre 1 et 30% et l'épaisseur du film entre 5 et 300 nm. La structure des films est étudiée par microscopie à force atomique (cf. Fig. 1.a) et par réflectivité des rayons X. Dans le second système, des nanosphères d'or sont incorporées, à fraction volumique variable, dans les domaines poly(acide acrylique) de la phase lamellaire d'un copolymère poly(styrène)-*bloc*-poly(acide acrylique). Des échantillons volumiques sont étudiés par diffusion des rayons X aux petits angles et par microscopie électronique en transmission (cf. Fig. 1.b). Des échantillons en films minces sont étudiés en réflectivité des rayons X et microscope à force atomique. L'étude structurale détaillée des systèmes a pour but de valider le contrôle de la densité et de l'organisation des particules.

Les propriétés optiques des nanocomposites sont étudiées par spectrophotométrie et ellipsométrie spectroscopique. Les indices de réfraction obtenus (cf. Fig. 2), dans les domaines visible et infrarouge, sont confrontés à des modèles de milieu effectif, prenant en compte les propriétés appropriées des nanoparticules, ainsi que des effets de substrat.

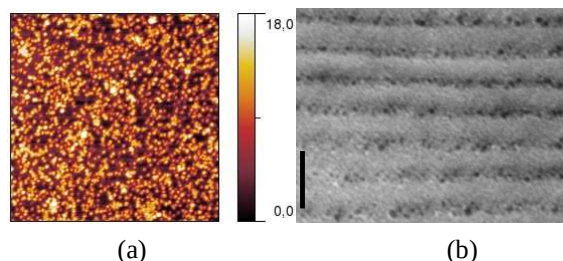


Fig. 1: (a) Image (vue de dessus) de $2 \times 2 \mu\text{m}$ de microscopie à force atomique sur un film mince de polymère et de nanoparticules d'or. Echelle de hauteur en nm. (b) Image (vue de côté) en microscopie électronique en transmission d'un film composite de nanoparticules d'or et de phase lamellaire de poly(styrène)-*b*-poly(acide acrylique). Barre = 50 nm.

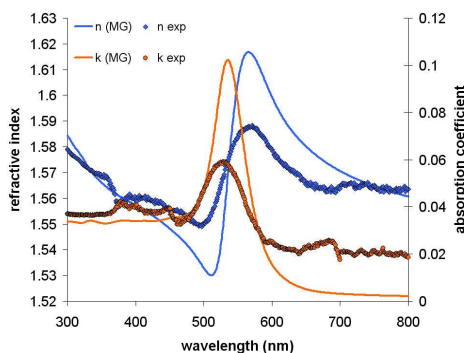


Fig. 2: Indice optique n et coefficient d'absorption k , déterminés par l'analyse des données d'ellipsométrie spectroscopique sur un film mince de polymère et de nanoparticules d'or, en fonction de la longueur d'onde. L'écart avec un modèle simple de Maxwell-Garnett (lignes continues) justifie la prise en compte d'effets supplémentaires comme le confinement des électrons et des effets de substrat.

Remerciements – Ce travail bénéficie du soutien de la Région Aquitaine, de l'Agence Nationale de la Recherche (NANODIELLIPSO, ANR-09-NANO-003) et du 7ème "Framework Programme" de l'Union Européenne (FP7/2008, numéro d'agément 228762, METACHEM).

Transmission exaltée par la résonance magnétique de cubes ferroélectriques à travers l'ouverture d'un plan métallique sous la coupure

Véronique Sadaune, Lei Kang, Éric Lheurette et Didier Lippens

Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanoélectronique, UMR CNRS 8520

Université Lille 1

59652 Villeneuve d'Ascq cedex, France

Véronique.Sadaune@iemn.univ-lille1.fr

Résumé : Nous démontrons expérimentalement l'amélioration d'un ordre de grandeur de la transmission à travers une ouverture unique de taille sous longueur d'onde ($\lambda/20$) couplée à un cube ferroélectrique de forte permittivité ($\epsilon_r=120$) aux fréquences micro-ondes. Cette amélioration de la transmission, dont nous venons de publier l'analyse numérique, est ici vérifiée expérimentalement en considérant notamment la distance de couplage et la taille de l'ouverture pris comme paramètres.

La théorie de la diffraction de Bethe prédit que la transmission à travers un trou, de rayon r , percé dans une plaque de métal parfaitement conducteur d'épaisseur nulle est extrêmement faible et décroît en $(r/\lambda)^4$. Cependant de nombreux travaux ont montré qu'une transmission optique extraordinaire, plusieurs ordres de grandeurs au dessus des prédictions de Bethe, est obtenue à travers un réseau de trous de dimension sous longueur d'onde percés dans une plaque métallique. Ces phénomènes d'augmentation anormale de la transmission sont liés aux plasmons de surface, qui sont essentiellement des ondes électromagnétiques piégées à la surface métallique et interagissant avec les électrons libres du métal [1]. Cependant aux fréquences micro-ondes, la plaque de métal peut être considérée comme un conducteur parfait avec aucune possibilité de piégeage des ondes de surface par un seul conducteur. Pour augmenter la transmission à ces fréquences, il a été montré récemment la possibilité d'utiliser des microrésonateurs en anneau comme dipôle électrique et magnétique [2]. Une augmentation de la transmission très importante a ainsi été obtenue avec toutefois une forte sensibilité à la polarisation et à l'angle d'incidence. Par ailleurs, on peut également créer un dipôle magnétique en tirant parti des résonances de Mie d'une particule diélectrique à forte permittivité. En préservant les propriétés de symétrie notamment par une forme cubique, la réponse magnétique ne montre presque aucune sensibilité à la polarisation et à l'angle d'incidence. Sur cette base, nous avons récemment montré numériquement qu'une augmentation de la transmission similaire à celle démontrée par le groupe d'Ozby pouvait être obtenue par un couplage fort de la résonance de Mie de cette particule et d'une ouverture de dimension caractéristique sous longueur d'onde [3]. Dans cette communication, l'augmentation par des résonateurs de Mie est expérimentalement évaluée en utilisant un cube ferroélectrique de BaSrTiO₃ de 1.83mm de côté, avec une permittivité de $120(1+j0.02)$. Le résultat de

mesure, illustré figure 1, met en évidence une augmentation proche de 10 de la transmittance d'une ouverture de dimension millimétrique dans la bande de fréquences centimétriques.

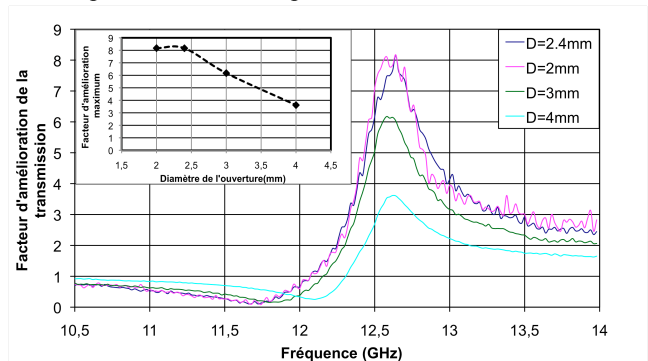


Fig.1 Mesure de l'augmentation de la transmission par l'utilisation d'un cube diélectrique de forte permittivité ($\epsilon_r=120$) pour différent diamètre D de l'ouverture dans la plaque de métal. En insert, l'évolution du maximum de transmittance avec le diamètre de l'ouverture.

Sur cette figure, on constate que la plus forte augmentation de la transmission est obtenue lorsque l'arête du cube a environ la même taille que l'ouverture ($\lambda/20$) adaptant le diagramme de rayonnement du dipôle magnétique à celle-ci. Par ailleurs, la mesure de la sensibilité de la transmission à la distance séparant le cube de la plaque de métal met en évidence une décroissance de la transmission maximale avec l'augmentation de cette distance de couplage reflétant l'évanescence de la fonction d'onde. Ces résultats obtenus avec une ouverture unique dans une plaque métallique vont être étendus au cas de réseau de trous en couplage fort avec un réseau cubes BST de forte permittivité afin de réaliser des métamatériaux quasi-isotropes à forte transmission et faible perte jusqu'aux fréquences sub-millimétriques.

Références

- [1] C.Genet, T.W.Ebbesen, Light in tiny holes, Nature, Vol.445, pp39-46,2007
- [2] K.Aydin, A.O.Cakmak, L.Sahin, Z.Li, F.Bilotti, L.Vegni, E.Ozby, Split-Ring-Resonator coupled enhanced transmission through a single subwavelength aperture, Phys.Rev.Lett, Vol.102, 013904, 2009
- [3] L.Kang, V.Sadaune, D.Lippens, Numerical analysis of enhanced transmission trough a single subwavelength aperture based on Mie resonance single particle, PIER 113, pp 211-226, 2011

Divitha Seetharamdoo, Isacco Coccato, Marion Berbineau
IFSTTAR, LEOST,
20, Rue Elisée Reclus, 59 650 – Villeneuve d'Ascq, France.
divitha.seetharamdoo@ifsttar.fr

Contexte et objectifs

Aux fréquences micro-ondes, de nombreuses applications exploitent le phénomène de résonance sub-longueur d'onde grâce à l'utilisation des métamatériaux. Le fonctionnement des guides d'ondes sous la fréquence de coupure a été réalisé en insérant des particules métalliques à résonance magnétique (SRR) au sein du guide [1]. Des cavités sub-longueur d'onde sont souvent utilisées pour les antennes ultra-minces et/ou directives [2]. Dans ce papier, nous proposons d'utiliser le concept de cavité sub-longueur d'onde pour des applications CEM. Les moyens d'essai CEM tels que la chambre réverbérante à brassage de modes sont généralement des cages de Faraday qui présentent en leur sein une répartition de champ contrôlée soit de manière déterministe ou statistique. Nous considérerons particulièrement la chambre réverbérante qui est une cavité métallique surdimensionnée avec un champ électromagnétique statistiquement homogène et isotrope. La limite basse de la fréquence d'utilisation de la chambre réverbérante sera améliorée grâce à l'utilisation des métamatériaux pour générer des résonances sub-longueur d'ondes.

Cavité sub-longueur d'onde à métamatériaux

La cavité sub-longueur d'onde sera réalisée à l'aide de métamatériaux à impédance d'onde réactive. Ces métamatériaux ont un coefficient de réflexion $R = e^{j\phi_{x,y,z}}$. Pour une cavité constituée de six faces à métamatériaux les pulsations de résonances sont données par [3]:

$$\omega_{mnp} = c \sqrt{\frac{\Delta\phi_x^2}{4L_x^2} + \frac{\Delta\phi_y^2}{4L_y^2} + \frac{\Delta\phi_z^2}{4L_z^2}},$$

où L_x , L_y et L_z sont les dimensions de la cavité, $\Delta\phi_{x,y,z}$ sont les différences entre les phases des coefficients de réflexion des faces selon la direction spécifiée et définies à $2m\pi$ près. En sachant que ϕ peut être différent de π pour un métamatériau, les valeurs de pulsations propres peuvent être beaucoup plus petites pour des dimensions physiques de cavités métalliques équivalentes. Ce principe a été appliqué à une chambre réverbérante classique et l'amélioration de ses caractéristiques a été évaluée.

Application à la chambre réverbérante à brassage de modes pour des mesures CEM

Le métamatériau à impédance d'onde réactive utilisé ainsi que son circuit équivalent sont illustrés figure 1 (a). La phase du coefficient de réflexion décroît de π (mur électrique parfait) à 0 (mur magnétique parfait) pour ensuite atteindre $-\pi$. Une valeur de phase intermédiaire est choisie et les règles de conception sont définies à l'aide des réactances issues du modèle électrique équivalent donné figure 1(b). Ce métamatériau est ensuite utilisé sur 2 murs de chambre réverbérante puis 6 murs et le nombre de modes de résonances est calculé.

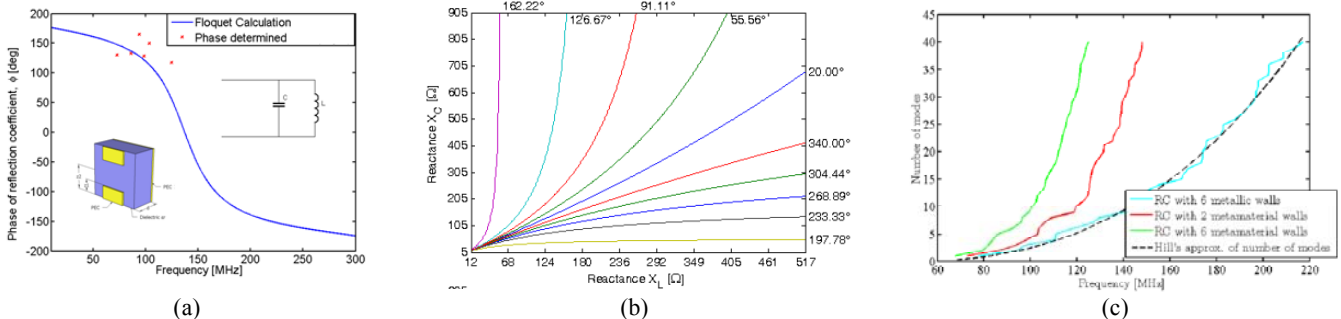


Figure 1 : (a) La phase du coefficient de réflexion, ϕ pour le métamatériau montré sur la gauche et le circuit équivalent pour une modélisation électrique équivalente, (b) La définition de ϕ en fonction des réactances capacitive et inductive, (c) Le nombre de modes de résonances en fonction de la fréquence pour une cavité métallique, avec 2 faces et 6 faces à métamatériaux

Les résultats obtenus sont présentés figure 1(c) pour la chambre réverbérante de l'INRETS-TELICE. Nous constatons un nombre de modes beaucoup plus important pour les basses fréquences par rapport à une chambre réverbérante à murs métalliques. Un nombre de modes de résonances suffisant est une condition nécessaire pour l'obtention d'un champ électrique homogène et isotrope au sein d'une CRBM. La diminution de la fréquence de résonance minimale d'utilisation de la CRBM constitue un verrou que plusieurs auteurs cherchent à lever [4]. Ce résultat numérique démontre qu'il est intéressant de considérer une solution basée sur l'utilisation du concept de cavité sub-longueur d'onde à base de métamatériaux pour aboutir à cet objectif. Notons que le paramètre à optimiser dans cette application est la densité modale dans une bande de fréquence donnée. Ceci rend le caractère dispersif de la phase du coefficient de réflexion d'autant plus intéressant à exploiter.

Références

- [1] H. Mosallaei and K. Sarabandi, "Antenna miniaturization and bandwidth enhancement using a reactive impedance substrate," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 9, pp. 2403 – 2414, Sep. 2004.
- [2] J. Carbonell, L. Rogla, V. Boria, and R. Marques, "Coaxial probe excitation of evanescent waveguides loaded with split ring resonators," in *Microwave Conference, 2006. 36th European*, Sep. 2006, pp. 336, –339.
- [3] D. Seetharamdoo, I. Coccato, "Investigation on the use of metamaterials to lower the operating frequency of reverberation chamber", submitted to *EMC Europe 2011*.
- [4] L. Arnaut, "Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at relatively low frequencies," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 43, no. 4, pp. 637 –653, Nov. 2001.

Effet d'une surface haute impédance sur l'impédance et le rayonnement d'une antenne dipôle sur silicium à 60 GHz

Romain Siragusa¹, Laurent Dussopt¹, Marc Ledieu², Roch Espiau de Lamaestre¹

¹CEA-LETI, MINATEC, F38054, Grenoble, France

²CEA, DAM, LE RIPAUT, F37260 Monts, France

Romain.siragusa@cea.fr : correspondant principal

Depuis quelques années, les applications sans fil haut débit dans la bande de fréquence 57-66 GHz ne cessent de croître, nécessitant des antennes toujours plus efficace et directive. Une solution alternative au réflecteur métallique peut-être l'utilisation de surfaces haute impédance (SHI) sous l'antenne agissant comme réflecteur magnétique permettant ainsi de placer l'antenne très proche de son réflecteur sans perdre en performance. Cependant, bien qu'activement étudiée, nous ne trouvons pas aujourd'hui dans la littérature de règles de conception simples permettant l'association d'une antenne et d'une SHI. De plus, l'effet de la taille finie du réflecteur est rarement exploré alors qu'il induit des résonances parasites difficiles à prévoir.

Nous proposons d'étudier au travers d'un exemple l'influence d'une SHI sur une antenne de type dipôle fonctionnant sur la bande 57-66 GHz. La structure est composée d'un substrat silicium d'épaisseur 100 μm associé à une couche de benzocyclobutène (BCB) d'épaisseur 20 μm séparant l'antenne dipôle (face supérieure) de la SHI (interface silicium-BCB) (Fig. 1 (a)). La SHI est composée d'un réseau de pavés métalliques carrés de 247.5 μm de côté et de période $p = 250 \mu\text{m}$ ($\lambda_0/20$ à 60 GHz), ce qui garantit l'homogénéité de la structure à 60 GHz. Le dipôle a une largeur de 20 μm et une longueur totale de 875 μm .

La figure 1 (b) montre la partie imaginaire de l'impédance d'entrée du dipôle pour une structure sans SHI et une structure avec SHI de taille 10×10, 10×14 et 14×10 périodes simulée avec le logiciel Ansoft-HFSS. Dans chaque cas, la taille du substrat et du plan de masse est limitée à celle de la SHI. Nous pouvons voir que la SHI a pour effet de diminuer la résonance fondamentale de l'antenne, passant de 72 GHz à 56 GHz. En effet, le dipôle est capacitif à basse fréquence et sa réactance est alors compensée par celle de la SHI qui est inductive. La SHI abaisse également la fréquence de résonance parallèle à 62 GHz. Ces fréquences sont constantes pour toutes les tailles de SHI, elles ne dépendent que des caractéristiques de la cellule unitaire de la SHI et de l'antenne. L'ajout de la SHI a aussi fait apparaître des résonances d'ordre supérieur. Leurs fréquences sont quasiment identiques pour les SHI de taille 10×10 et 10×14 alors qu'elles se trouvent à plus basse fréquence pour la SHI de taille 14×10. Cette dépendance suivant le plan H (Ox) s'explique en visualisant une carte de champ qui montre une onde de surface se propageant suivant Ox rendant ainsi l'impédance et le diagramme de rayonnement dépendants de la taille du réflecteur. Nous pouvons aussi remarquer la présence de résonances parallèles à fort facteur de qualité assimilables à des modes de cavité. Ces résonances ne sont dépendantes que de la dimension de la SHI suivant le plan E (Oy). En regardant le champ à l'intérieur du substrat, nous pouvons remarquer qu'elles correspondent à des résonances de cavité d'ordre 3 suivant l'axe y.

Chaque type de résonance ne dépendant que d'un paramètre géométrique, il est donc possible de les contrôler de manière indépendante afin d'élargir la bande passante de l'antenne. Nous voyons dans le cas 10×10 que la réactance de l'antenne varie peu autour de zéro sur la bande 55-71 GHz ce qui permet une bonne adaptation d'impédance (Fig. 1 (b)). La structure finale de dimension 10×10 cellules (soit $\lambda_0/2 \times \lambda_0/2 \times \lambda_0/40$) présente une bande passante de 58-71 GHz (20%) à -10 dB de réflexion et un gain de l'ordre de 6 dBi sur cette bande (fig. 1 (c)).

Cette étude a montré l'influence de la taille finie de la SHI sur l'impédance d'entrée de l'antenne dipôle. Elle démontre qu'une conception faisant l'hypothèse d'une SHI infinie n'est pas appropriée.

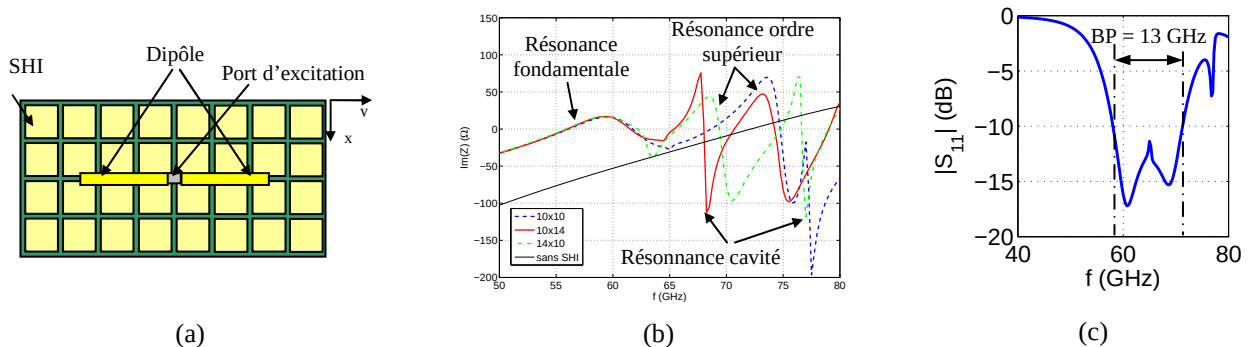


Figure 1. (a) Schéma de l'antenne dipôle associée à une SHI composée de pavés métalliques. (b) Réactance du dipôle sans SHI et avec une SHI de taille 10×10, 10×14, et 14×10. (c) Coefficient S_{11} de l'antenne dipôle avec la SHI de 10×10 éléments.

I. INTRODUCTION

La technologie RFID est de nos jours très utilisée dans un large domaine d'applications tant militaire que civil incluant les futurs services bancaires de paiement sans contact. Usuellement, la technologie RFID utilise principalement trois bandes de fréquences : 125kHz (LF), 13,56MHz (HF) et 860-960MHz (UHF). Dans la bande HF, l'induction magnétique est utilisée pour établir la communication entre le lecteur et le tag. L'antenne étant très petite devant la longueur d'onde, la distance de lecture permettant une liaison fiable n'atteint que quelques millimètres. Dans certains téléphones mobiles récents équipés de la technologie RFID ou NFC, l'espace disponible pour l'antenne est encore plus limité. Pour atteindre des portées plus importantes (quelques cm), un substrat à base de ferrite peut être intégré sous des antennes boucles [1]. Une alternative à ces substrats couteux peut venir de matériaux magnétiques artificiels ou métamatériaux réalisés à partir d'agencements uniformes et périodiques de petits éléments résonants. Comme exemple usuel, on peut citer les résonateurs à anneaux fendus (Split-Ring Resonator-SRR) qui présentent des valeurs de perméabilité effective supérieures à 1 à leurs fréquences de résonance. Cependant, cette fréquence étant bien au delà de la bande HF, les SRR ne peuvent pas être utilisés pour notre application. Parmi les autres solutions proposées dans la littérature (SRR multiples [2], ...) nous avons choisi les spirales résonantes (SR) [3] pour la simplicité de leur structure.

II. ANTENNE RFID A METAMATERIAUX

Dans ce papier, nous avons utilisé une antenne bobine imprimée de forme carrée. Les éléments constituant le métamatériau sont également des bobines imprimées au dos de l'antenne. Ces éléments sont des résonateurs spiraux (SR) imprimés, dont la fréquence de résonance peut être aisément ajustée par le nombre de tour et par un condensateur d'accord. L'antenne présente des dimensions de $64 \times 64 \text{ mm}^2$ et est située à une distance de 0,5mm du substrat à métamatériau. La réponse magnétique de l'ensemble est évaluée pour une fréquence de 13,56MHz avec des spirales (SR) présentant 50 tours associées avec un condensateur d'accord de 1,5pF (figure 1(a)).

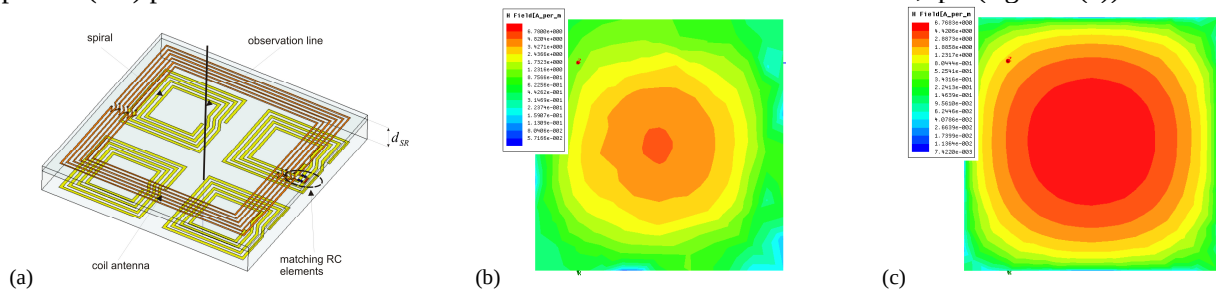


Fig. 1. (a) Géométrie de l'antenne avec le substrat à métamatériaux. (b) et (c) Champ magnétique à 50mm au-dessus de l'antenne sans et avec le méta-substrat.

Les Figures 1(b) et (c) présente le champ magnétique à 5cm au-dessus de l'antenne. Nous pouvons remarquer que le champ magnétique au centre est 1,5 fois plus fort pour l'antenne à métamatériau (figure 1(c)). Mais le résultat le plus important est que la distribution du champ est beaucoup plus uniforme ce qui permet d'obtenir une surface utile 25 fois plus importante avec le métamatériau.

III. DISCUSSION SUR LES PROBLEMES DE CONCEPTION DUES AUX SUBSTRATS A METAMATERIAUX

Les éléments SR ne peuvent améliorer efficacement le champ magnétique que s'ils sont à la résonance. D'un autre côté, l'antenne bobine étant très inductive, a besoin d'être adaptée par l'ajout d'une capacité extérieure. Elle sera donc à la résonance à la fréquence de travail. La distance proche et le fort couplage entre ces deux structures résonantes (le métamatériau et l'antenne) désaccorde les résonances et crée deux nouvelles fréquences de résonance très loin de la fréquence de travail. Ce phénomène empêche l'obtention de la performance maximum quand l'antenne et le substrat à métamatériau sont accordés à une fréquence unique. Nous avons été amenés à adapter l'antenne à une fréquence plus élevée que la fréquence de travail RFID.

IV. CONCLUSION

Nous avons utilisé un substrat à métamatériaux pour augmenter le champ magnétique généré par des antennes bobines utilisés pour la technologie RFID. Les inclusions sont des SR imprimés sur un substrat diélectrique. Cette technologie facilite leurs réalisations et limitent les pertes. L'amplification du champ magnétique est assez modérée (facteur 1,5), mais la surface utile est nettement plus importante (facteur 25). De plus, le changement de la distribution du champ magnétique produit par la structure peut être utile pour d'autres applications dans la bande HF comme l'imagerie par résonance magnétique.

V. REFERENCES

- [1] J. J. H. Wang, "Spiral Antennas in RFID and Their Size Reduction and Performance Enhancement", IEEE Anti-counterfeiting, Security, Identification 2007.
- [2] F. Bilotti et al., "Design of Spiral and Multiple Split-Ring Resonators for the Realization of Miniaturized Metamaterial Samples", Antenna and Propagation 2007.
- [3] R. Marques et al., "Metamaterials with Negative Parameters", J. Wiley & Sons, 2008.

Calcul approximatif des coefficients de transmission et réflexion aux interfaces entre milieux périodiques

W. Śmigaj¹, P. Lalanne², J. Yang¹, T. Paul³, C. Rockstuhl³, F. Lederer³

¹ Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, CNRS, Université Paris-Sud,
Campus Polytechnique, RD 128, 91127 Palaiseau cedex, France

² Laboratoire Photonique, Numériques et Nanosciences, Université Bordeaux 1, CNRS,
Institut d'Optique, 33405 Talence cedex, France

³ Institute of Condensed Matter Theory and Solid State Optics, Abbe Center of Photonics,
Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena, Allemagne

Nous employons les relations d'orthogonalité des modes de Bloch afin d'obtenir de simples expressions semianalytiques pour les coefficients de diffusion à l'interface entre deux milieux périodiques. Le calcul rigoureux de ces coefficients, en particulier dans le cas tridimensionnel, prend beaucoup de temps et nécessite l'usage des outils numériques avancés. En supposant que l'interface est éclairé par le mode fondamental de Bloch d'un des milieux et que les paramètres géométriques de ces milieux sont similaires, nous déduisons des formules approchées qui ne dépendent que des paramètres des modes de Bloch fondamentaux des deux milieux.

Nous vérifions ensuite que les valeurs des coefficients de diffusion prédites par ces formules sont en bon accord avec les résultats des calculs rigoureux pour des structures différentes, telles que des guides d'ondes diélectriques périodiques et des métamatériaux métalliques du type « fishnet ». En particulier, nous démontrons que les expressions obtenues à l'aide des relations d'orthogonalité permettent d'atteindre des résultats plusieurs fois plus précis que celles déduites par l'imposition des conditions de continuité du champ dans le sens des moindres carrés ou de la valeur moyenne. Les formules dérivées peuvent donc être utilisées avec confiance pour la conception et l'ingénierie des empilements de structures périodiques dont les paramètres géométriques changent d'une façon graduelle.

Augmentation de la sensibilité de détection par métamatériaux térahertz

Nadia Soltani¹, Éric Lheurette¹, Shengxiang Wang¹, Frédéric Garet², Karine Blary¹, Jean-Louis Coutaz² et Didier Lippens¹

¹ IEMN, UMR CNRS 8520, Université de Lille 1, avenue Poincaré, BP 60069, 59652 Villeneuve d'Ascq Cedex

² IMEP-LAHC, UMR CNRS 5130, Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac Cedex

nadia.soltani@ed.univ-lille1.fr

Résumé

Nous montrons théoriquement qu'en utilisant des structures métallo-diélectriques, il est possible de détecter des variations de l'indice de réfraction avec une très haute sensibilité. La rupture de la symétrie au niveau de la géométrie de ces structures permet l'excitation de modes non radiatifs, un spectre de transmission avec de pics très sélectifs est ainsi obtenu.

La structure étudiée est composée de deux couches métalliques (Or) espacées d'un diélectrique (BCB), percées par des ouvertures elliptiques sous longueur d'onde. L'optimisation de cette structure pour un fonctionnement à 1 THz est basée sur une mise à l'échelle d'un prototype fonctionnant à 500 GHz [1,2]. En variant l'indice au niveau des ouvertures, un décalage vers les basses fréquences est mis en évidence.

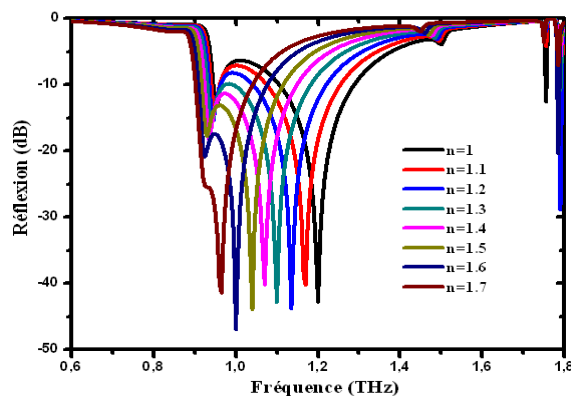


Figure 1. Spectre de réflexion en amplitude pour différents indices au niveau des ouvertures.

L'évaluation des performances de ce capteur (voir Figure 2) montre une très

haute sensibilité et un facteur de mérite de l'ordre de 46 pour une différence d'indice de 0.1. Rappelons que ces paramètres sont donnés par les formules suivantes :

$$S = \Delta\lambda / \Delta n$$

$$FOM = S / FWHM$$

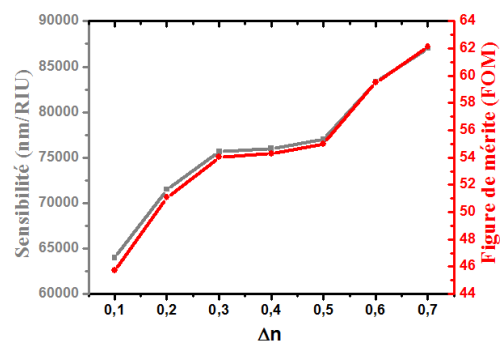


Figure 2. Évolution de la sensibilité et du facteur de mérite en fonction de la différence d'indice.

Une rupture de symétrie au niveau de la cellule élémentaire fait apparaître des pics très sélectifs dans le spectre de transmission. Ce changement de topologie peut considérablement accroître les performances en termes de sensibilité de détection et de facteur de mérite. Des calculs numériques sont en cours pour évaluer ces performances.

[1] C. Croënne, F. Garet, É. Lheurette, J.-L. Coutaz and D. Lippens, « Left handed dispersion of a stack of subwavelength hole metal arrays at terahertz frequencies », Applied Physics Letters, vol. 94, p. 133112, 2009.

[2] S.Wang, F. Garet, K. Blary, C. Croënne, É. Lheurette, J.-L. Coutaz and D. Lippens, « Composite left/right-handed stacked hole arrays at submillimeter wavelengths », Journal of Applied Physics, vol. 107, p. 074510, 2010.

Métamatériaux basés sur des nano-éléments ferromagnétiques : du milieu efficace au comportement magnonique

A.A.Stachkevitch

LSPM CNRS (UPR 3407), Université Paris 13, 93430 Villetaneuse, France

Email: stachkevitch@univ-paris13.fr

Les métamatériaux basés sur des nanostructures ferromagnétiques sont intéressants dû à la richesse de la physique ondulatoire qui les caractérise ainsi que pour de nombreuses applications importantes. Les propriétés magnétiques dynamiques micro-onde de tels systèmes peuvent varier, dans une gamme considérable, en modifiant, indépendamment la taille et la forme des nano-éléments, leur concentration et composition chimique, ainsi que la nature de la matrice.

Plus particulièrement, il s'agit des études de deux géométries de base de couches minces nano-structurées : sphérique (nanobilles de Co dans une matrice de silice SiO_2 [1]) et cylindrique (nano-cylindres de Ni dans une matrice d'alumine [2]). La spectroscopie Brillouin a été utilisée comme instrument principal expérimental. Dans le premier cas, nous avons étudié la possibilité de la création d'un milieu magnétique artificiel avec une constante d'échange effective *ajustable* pendant une transition de l'état super-paramagnétique à un état super-ferromagnétique. Dans le deuxième, on a mis l'accent sur l'influence de l'anisotropie efficace de forme (concurrence entre l'anisotropie de chaque cylindre et celle de leur ensemble) sur le spectre de modes dipôle-échange dans un tel milieu artificiel. En outre, nous avons étudié la section efficace des interactions magnéto-optiques dans cette géométrie, y compris le rôle du champ proche.

Nous avons choisi un réseau de nano-rubans de permalloy pour modaliser les effets magnonique afin de comprendre le comportement ondulatoire de modes magnétostatiques dans le cas important où l'approche du milieu effectif n'est plus valable.

1. A.A. Stashkevich, Y. Roussigné, A. I. Stognij, N. N. Novitskii, M. P. Kostylev, G. A. Wurtz, A. V. Zayats, and L. V. Lutsev, Phys.Rev.B, **78**, 212404- (2008).
2. A. A. Stashkevich, Y. Roussigné, P. Djemia, S. M. Chérif, P. R. Evans, A. P. Murphy, W. R. Hendren, R. Atkinson, R. J. Pollard, A. V. Zayats, G. Chaboussant, and F. Ott, Phys. Rev. **B 80**, 144406 (2009).
3. M. P. Kostylev and A. A. Stashkevich, Phys. Rev. **B 81**, 054418 (2010).

Métamatériau à bande interdite photonique ajustable à base de réseau métal-diélectrique

Thierry TALIERCIO, Viliame N'TSAME GULENGUI

Institut d'Electronique du Sud, CNRS-INSIS-UMR 5214, Université Montpellier 2, 34095
MONTPELLIER cedex 05 (France)

Jérôme LEON

Laboratoire Charles Coulomb, CNRS-UM2 UMR 5221, Département Physique Théorique, CC 070
Université Montpellier 2, 34095 MONTPELLIER cedex 05 (France)

Thierry.taliercio@univ-montp2.fr

Nous présentons un modèle permettant de traiter de manière rigoureuse la propagation de la lumière dans des réseaux à base de semi-conducteur dopé (métal) et non dopé (diélectrique) (figure 1). Ce type de structure périodique permet d'exciter naturellement des plasmons de surface polaritons lui conférant des propriétés optiques remarquables. Dans la limite des grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire, pour une longueur d'onde correspondant à la longueur d'onde plasma du gaz d'électron, λ_p , supérieure à 0.2 fois la période de la structure, celle-ci peut être considérée comme un matériau effectif simplifiant grandement le traitement numérique du problème [1]. La structure se comporte alors comme un oscillateur très fortement couplé au rayonnement électromagnétique. Ce couplage intense permet l'ouverture d'une bande interdite photonique très large, dépassant 30% de la valeur de la fréquence plasma. En jouant sur la géométrie et la densité d'électron, il est possible d'ajuster la position en énergie et la largeur de la bande interdite photonique dans la gamme spectrale du moyen infrarouge au THz. Le modèle du matériau effectif permet de prendre en considération les pertes occasionnées par les porteurs libres. Nous obtenons alors un excellent accord avec des simulations réalistes en FDTD.

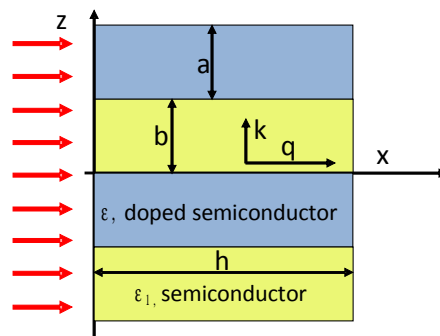


Figure 1 : Schema de la structure, infiniment périodique dans la direction z et infinie suivant y.

[1] J. Léon and T. Taliercio, *Phys. Rev B* **82** (2010) 195 301.

Antennes large bande à onde de fuite à base de lignes de transmission composites main droite/ main gauche

Aïta Thior¹, Anne Claire Lepage¹, Xavier Begaud¹, Olivier Maas²
¹Institut TELECOM, TELECOM ParisTech - LTCI CNRS UMR 5141
 46 rue Barrault 75634 Paris Cedex 13, France
aita.thior@telecom-paristech.fr, xavier.begaud@telecom-paristech.fr
anne-claire.lepage@telecom-paristech.fr
²THALES Air Systems Business Line Surface Radar
 Hameau de Roussigny 91470 Limours, France
olivier.maas@thalesgroup.com

Les métamatériaux sont des structures périodiques artificielles dont la taille de la cellule unitaire p est très inférieure devant la longueur d'onde guidée ($p \ll \lambda_g$). Ces matériaux peuvent produire des ondes progressives directes $\beta > 0$ (matériaux conventionnels), indirectes $\beta < 0$ (matériaux main gauche) et même une constante de propagation nulle ($\beta = 0$). Ces propriétés électromagnétiques permettent ainsi de réaliser différents types d'antennes avec une maîtrise de leurs dimensions et de leurs performances au-delà des limites des antennes conventionnelles.

Une des applications de ces matériaux composites est de réaliser des antennes à ondes de fuite qui permettent un balayage spatial Back-Fire vers End-Fire en modifiant la fréquence. En effet, le dépointage du faisceau s'effectue des angles négatifs (impossible avec une solution classique) vers les angles positifs, avec un rayonnement dans l'axe perpendiculaire à l'antenne, également impossible avec une solution à onde de fuite classique. Une étude paramétrique de la structure [1] a permis d'élargir la bande leaky-wave en modifiant la permittivité du substrat. Ces résultats seront présentés lors de la conférence.

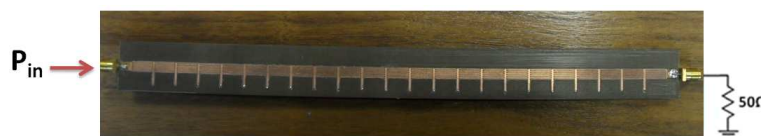


Fig.1 Antenne composite à onde de fuite avec 22 cellules

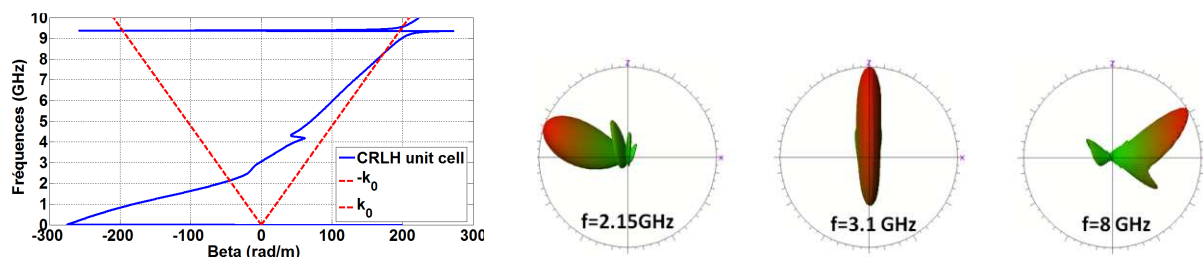


Fig.2 Diagramme de dispersion et diagrammes de rayonnement à 3 fréquences de la bande leaky-wave

- [1] L. Liu, C. Caloz, T. Itoh, "Dominant mode leaky-wave antenna with backfire-to-endfire scanning capability," *Electronics Letters*, vol. 38, 2002.

Ingénierie par transformations d'espace.

P-H. Tichit, S.N. Burokur, A. de Lustrac.

Institut d'Electronique Fondamentale, Centre Scientifique d'Orsay, 91405 Orsay, France

paul-henri.tichit@u-psud.fr

Abstract: La transformation de coordonnées spatiales est une méthode mathématique permettant de concevoir des systèmes électromagnétiques aux propriétés inhabituelles. Dans cet article nous exposons les résultats de ce concept au travers d'une antenne ultra-directive, d'un adaptateur entre 2 guides de sections différentes, et d'une cape d'invisibilité polygonale. Tous les résultats ont été validés par des simulations numériques.

INTRODUCTION

Le concept de transformation d'espace a été développé par Sir John Pendry en 2006 et validé par la fabrication de la première cape d'invisibilité en micro-ondes [1]. Le principe de fonctionnement de la transformation de coordonnées spatiales est de générer des équations de Maxwell invariantes dans un nouveau système de coordonnées par création d'une perméabilité et permittivité adaptée. Ce nouveau système de coordonnées doit contenir toutes les caractéristiques essentielles nécessaires au dispositif que l'on souhaite concevoir. Ainsi mathématiquement cela revient souvent à imaginer un espace représenté par la trajectoire des rayons lumineux, comme il peut l'être en relativité générale. L'étape la plus importante du processus est de déterminer une permittivité et une perméabilité qui vont imiter le rôle de notre espace dessiné précédemment. Généralement ces permittivités et perméabilités sont anisotropes, inhomogènes mais peuvent être réalisées dans certains cas à l'aide de métamatériaux.

DESIGN DE NOUVEAUX SYSTEMES

Pour illustrer le concept de la transformation d'espace nous nous sommes intéressés à 3 systèmes électromagnétiques. Tout d'abord nous nous intéresserons à une antenne ultra-directive dérivée d'une antenne omnidirectionnelle [2]. Ensuite nous considérerons le cas d'un adaptateur entre 2 guides d'ondes de sections différentes pour terminer sur le cas d'une cape polygonale régulière [3].

MODELISATION ET VALIDATION NUMERIQUE

Nous illustrerons la validation des 3 systèmes générés par transformations d'espace. Pour l'antenne, une source isotrope a été encastrée dans le matériau fonctionnant à 10Ghz. De même dans le cas de l'adaptateur, la transformation d'espace permet de canaliser le champ du guide d'onde 1 dans le guide d'onde 2 pour une fréquence de 10GHz pratiquement sans pertes avec respectivement des fréquences de coupures à 1.5GHz et 7.5GHz pour les 2 guides. La cape hexagonale présentée est conçue par juxtaposition de 6 matériaux, chacun issu par une rotation de 60°. Une onde plane monochromatique est envoyée sur la structure. Celle-ci transfère cette onde parfaitement derrière le dispositif, supprimant ainsi la diffraction et la réflexion de l'objet placé à l'intérieur. Ces trois exemples permettent d'illustrer les possibilités d'applications de la transformation d'espace dans des domaines variant des ondes radio à l'optique. Toute la difficulté consiste ensuite à réaliser pratiquement le matériau correspondant aux paramètres électromagnétiques obtenus. Ceci implique souvent une simplification de ces matériaux.

CONCLUSION

Dans cet article nous avons présenté trois transformations spatiales pour 3 systèmes électromagnétiques : un adaptateur entre 2 guides d'ondes de différentes sections, une antenne ultra-directive et une cape d'invisibilité de forme polygonale régulière. Il apparaît clairement que la transformation d'espace s'avère très efficace pour la fabrication de systèmes comportant des propriétés électromagnétiques extraordinaires. De plus il est maintenant possible d'implémenter les perméabilités et permittivités à l'aide de métamatériaux comme cela a été fait pour l'antenne ultra-directive.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, "Controlling electromagnetic fields," Science 312, 1780-1782 (2006).
- [2] P.-H. TICHIT, S. N. BUROKUR, AND A. DE LUSTRAC, « Ultra-directive antenna via transformation optics », J. of Appl. Physic, 105 104912 (2009).
- [3] P.-H. TICHIT, S. N. BUROKUR, AND A. DE LUSTRAC, « Waveguide taper engineering using coordinate transformation technology », Optics Express

Compensation active des pertes résonantes de nanoparticules plasmoniques

Alessandro Veltri* et Ashod Aradian

Centre de Recherche Paul Pascal, CNRS / Université de Bordeaux, 115 av. Schweitzer, 33600 Pessac, France

* veltri@crpp-bordeaux.cnrs.fr

Dans les domaines de la nanophotonique, de la plasmonique et des métamatériaux, les pertes inhérentes à l'utilisation de métaux aux fréquences infrarouges ou optiques limitent grandement les performances des dispositifs proposés, en particulier les pertes résonantes au voisinage de la résonance plasmon. Une des stratégies proposées est de « compenser » les pertes résonantes en introduisant dans les structures considérées des matériaux à gain optique, tels que des fluorophores ou des nanocristaux quantiques.

Nous avons travaillé sur le système très simple en apparence de nanoparticules métalliques sphériques immergées dans une solution de fluorophores. Une approche analytique élémentaire nous a permis de mettre en évidence une riche variété de comportements des plasmons localisés ainsi « compensés » : point de compensation optimal des pertes, résonances asymétriques de type Fano, et apparition de plasmons dits « conjugués » pour lesquels la partie réelle peut être fortement négative ou positive dans des régions de faibles pertes.

Développement de filtres multi-spectraux dans l'infrarouge à base de structures plasmoniques

^{1,2}Benjamin Vial, ¹André Nicolet, ¹Frédéric Zolla, ¹Mireille Commandré, ²Stéphane Tisserand

1: Institut Fresnel, UMR 6133, Domaine Universitaire de Saint Jérôme, 13397 Marseille cedex 20, FRANCE

2 : Silios Technologies, Z.I Peynier-Rousset, Rue Gaston Imbert prolongée, 13 790 Peynier, FRANCE

Résumé

La solution classique pour réaliser des filtres en transmission dans l'infrarouge moyen ou lointain (bandes 2 et 3, de 3 à 5 μm et de 8 à 13 μm) pour des applications de type imagerie multispectrale est basée sur la technologie multicouches et nécessite quelques dizaines de couches diélectriques.

Les structures de type plasmonique sont constituées typiquement d'un substrat isolant sur lequel on dépose une couche métallique qui est ensuite microstructurée, et pourraient avantageusement remplacer les composants multicouches pour la réalisation de filtres en transmission, permettant une simplification du procédé de fabrication et une réduction du coût.

La modélisation de telles structures est réalisée par la méthode des éléments finis (FEM). Des codes développés à l'Institut Fresnel ([1] et [2]) permettent de calculer le champ électromagnétique diffracté par des réseaux mono ou bi périodiques de géométrie et de matériaux quelconques, éclairés par une onde plane d'incidence et de polarisation arbitraires. On obtient ainsi les efficacités de diffraction dans les différents ordres en transmission et en réflexion ainsi que les pertes et on peut établir un bilan d'énergie dans la structure. On peut ainsi en faisant varier la longueur d'onde obtenir la réponse spectrale des structures étudiées.

Néanmoins, puisque nous recherchons à réaliser des filtres résonants, l'étude des fréquences propres de la structure semble plus appropriée. La résolution du problème aux valeurs propres par la méthode des éléments finis permet en effet d'obtenir les fréquences propres complexes de la structure (la partie réelle correspondant à la fréquence de résonance et la partie imaginaire à l'amortissement, c'est à dire à la largeur du pic de résonance). Ces fréquences propres sont aussi des pôles du coefficient de transmission.

Afin de valider la méthode de recherche de résonances par la FEM, nous confrontons les résultats obtenus par cette dernière sur un exemple simple (un slab constitué de 3 diélectriques) avec ceux obtenus par une méthode dite de « tétrachotomie », qui permet d'obtenir avec une méthode numérique très robuste les pôles du coefficient de transmission calculé analytiquement.

Nous présentons ensuite les résultats de la recherche de résonances par la FEM pour un réseau de fentes gravées dans du chrome déposé sur un substrat de verre.

[1] G. Demésy, F. Zolla, A. Nicolet, M. Commandré, and C. Fossati, "The finite element method as applied to the diffraction by an anisotropic grating," *Opt. Express* 15, 18089-18102 (2007).

[2] G. Demésy, F. Zolla, A. Nicolet, and M. Commandré, "Versatile full-vectorial finite element model for crossed gratings," *Opt. Lett.* 34, 2216-2218 (2009).

Lentille métamatériau à gradient d'indice aux longueurs d'ondes des télécommunications

S. Wang, L. Kang, L. Burgnies and D. Lippens

Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanoélectronique, UMR CNRS 8520

Université Lille 1, 59652 Villeneuve d'Ascq cedex, France

didier.lippens@iemn.univ-lille1.fr

Abstract- La conception d'une lentille plane métallo-diélectrique à gradient d'indice, permettant la focalisation d'une onde plane, est analysée pour un fonctionnement à $1.55\mu\text{m}$. La lentille est constituée d'un empilement de multicouches d'argent, structuré à une échelle bien inférieure à la longueur d'onde de travail par un réseau de trous séparés par des lames de SiO_2 . En changeant le facteur de remplissage du réseau de trous, une variation de l'indice effectif de réfraction est obtenue dans la direction transverse à celle correspondant à la direction d'incidence entraînant une courbure des rayons. En cumulant cet effet de courbure du front d'onde par trois couches successives, la focalisation de l'onde plane incidente est démontrée à une distance de $4.25\mu\text{m}$ pour une lentille de $6.4\mu\text{m}$ de diamètre

La fabrication de lentilles convexes à indice de réfraction uniforme pour focaliser une onde plane pose un certain nombre de difficultés de fabrication pour un fonctionnement en nanophotonique. Par ailleurs, l'émergence des technologies métamatériaux, qui sont par essence des nanostructures artificielles, peut apporter de nombreux degrés de liberté dans l'obtention de gradients de l'indice effectif de ces matériaux, par la structuration à une échelle bien plus petite que la longueur d'onde. Nous présentons dans cette communication les premiers résultats d'une étude sur les possibilités offertes par les technologies métamatériaux en portant notre attention non pas sur la focalisation d'une source ponctuelle, par indice de réfraction négatif uniforme [1-4] mais plutôt sur la focalisation d'une source en champ lointain. La contrainte est ici de conserver une architecture planaire en vue de sa réalisation par des technologies avancées de la nanophotonique. En outre, bien que les métamatériaux permettent de réaliser des gradients d'indice de valeurs négatives, nous avons pris ici le parti de concevoir la lentille plane à partir de valeurs positives de l'indice de réfraction de motifs de type fente, conformément à la figure 1 (a). La structure élémentaire est constituée d'une fente annulaire de 30 nm de large. La mise en réseau des motifs a été effectuée suivant une maille carrée typiquement de pas égal à 370 nm .

La variation du facteur de remplissage en gardant constante la largeur de la fente permet de faire varier localement l'indice effectif de réfraction. La mise au point des gradients ainsi que la vérification finale de l'effet de focalisation ont été effectuées par simulation du comportement électromagnétique des dispositifs à l'aide d'un logiciel commercial de résolution des équations de

Maxwell (CST Microwave studio). Nous avons supposé que les couches métalliques sont en argent, d'épaisseur 45 nm. La dispersion de la permittivité des couches en argent est supposée obéir à un modèle de dispersion de type Drude avec les valeurs suivantes pour les fréquences plasma et de collision ($\omega_{\text{pl}}=1.37\times 10^{16}\text{ rad/s}$, $\omega_{\text{col}}=0.85\times 10^{14}\text{ Hz}$). Pour les couches diélectriques de SiO_2 nous avons supposé les valeurs suivantes pour les valeurs réelle et imaginaire de la permittivité complexe supposée constante dans la bande de fréquence considérée ($\epsilon_r=2.4$, $\tan\delta=0.001$). La figure 1. (b) montre le dessin en perspective de la lentille plane, composée de trois 'métasurfaces', utilisée pour démontrer la focalisation d'une onde plane incidente. En faisant varier le coté de la cellule élémentaire de 260 nm au centre de la lentille à 500 nm sur le pourtour, nous avons obtenu une variation de l'indice effectif n de 1.2 au centre à $n=0.2$ à la périphérie. En se basant sur ce gradient radial d'indice, la focalisation est démontrée numériquement sur la figure 1(c) avec une distance focale de $4.25\mu\text{m}$ à la longueur d'onde de $1.55\mu\text{m}$.

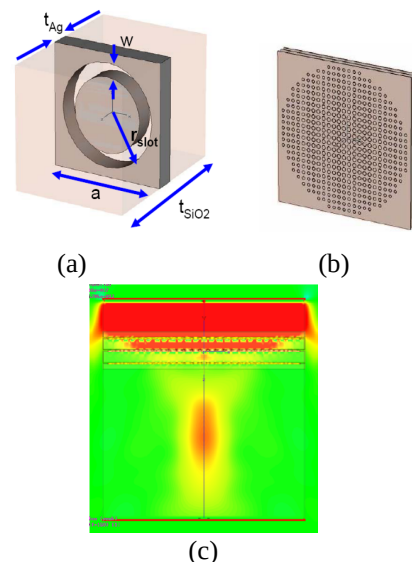


Figure 1. (a) Cellule unitaire d'une structure annulaire de type fente ; (b) vue en perspective de la cellule comportant 25 cellules unitaires transversalement; (c) cartographie de l'intensité du champ électrique à $1.55\mu\text{m}$ pour un plan horizontal médian à la structure.

- [1] J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett. 85, 3966–3969 (2000).
- [2] P. V. Parimi, et al., Nature 426, 404 (2003)
- [3] T. Driscoll, et al., Appl. Phys. Lett. 88, 081101-1- 081101-3 (2006.)
- [4] N. Fabre et al Phys Review Lett. 101,073901 (200

Métamatériaux compatibles avec les techniques de fabrication de masse pour applications en bande millimétrique.

Riad Yahiaoui^{1,2}, Valérie Vignéras² et Patrick Mounaix¹

¹ Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine, Université Bordeaux1, UMR CNRS 5798,
351 Cours de la Libération, 33405 Talence cedex

² Laboratoire de l'intégration du matériau au système, Université Bordeaux 1, UMR CNRS 5218,
16 avenue Pey Berland 33607 Pessac Cedex.

r.yahiaoui@loma.u-bordeaux1.fr : correspondant principal

Nous proposons dans ce papier une panoplie de métamatériaux calculés, fabriqués sur PCB et caractérisés expérimentalement pour une fonctionnalité en bande millimétrique (35, 55, 85 et 94 GHz). Il s'agit de structures proprement appelées "métamatériaux fishnet" (tri-couches métal-diélectrique-métal), largement étudiées et répandues dans la littérature scientifique¹⁻³. En effet, éclairée par une onde plane sous incidence normale, avec une seule couche suivant la direction de propagation, cette nouvelle catégorie de métamatériaux planaires métallo-diélectriques est considérée comme une des meilleures alternatives aux structures classiques initialement proposés par J. B. Pendry et al^{4,5}, puis fabriqués et caractérisés expérimentalement par R. A. Shelby et al⁶. Elles offrent ainsi la possibilité d'obtenir un indice de réfraction négatif avec une grande simplicité et à faible coût. À l'aide d'un outil de calcul numérique basé sur la méthode des éléments finis (HFSS)⁷, et d'un banc de caractérisation expérimentale non destructif en espace libre à base d'un analyseur de réseau vectoriel, nous avons pu caractériser expérimentalement nos différentes structures⁸, et les confronter aux prévisions théoriques. La figure 1(a) représente la partie réelle et imaginaire de l'indice de réfraction effectif d'une de nos structures avec $\text{Re}(n_{\text{eff}}) < 0$ aux alentours de 85 GHz. Une cartographie du champ électrique diffracté à travers un prisme microstructuré à base des métamatériaux, représentée sur la figure 1(b), démontre clairement l'effet de réfraction négative (matériau main-gauche). Il est à noter que deux techniques de fabrication ont été utilisées pour concevoir nos métamatériaux, la lithographie optique standard et l'usinage mécanique par fraiseuse numérique qui évite toute étape technologique et laisse la porte ouverte à de la fabrication de masse. Une étude exhaustive dans diverses configurations expérimentales sera présentée.

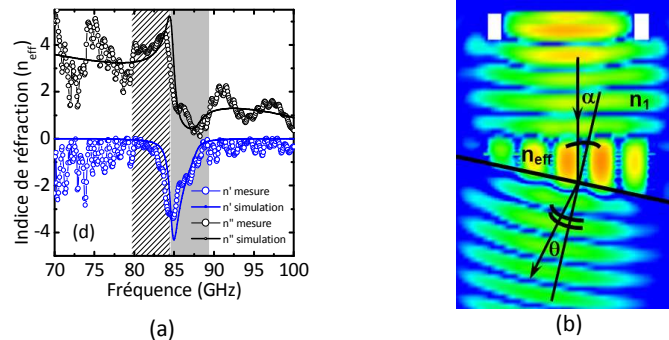


Figure 1. (a) parties réelles et imaginaires de l'indice de réfraction calculées (trait plein) et mesurées (traits et symboles), (b) démonstration de la réfraction négative par visualisation du module du champ électrique diffracté par un prisme microstructuré.

Références

- [1] S. Zhang, W. Fan, K. J. Malloy, and S. R. J. Brueck, N. C. Panoiu, and R. M. Osgood, "Near-infrared double negative metamaterials", *Opt. Express* **13**, 4922-4930 (2005).
- [2] M. Beruete, M. Sorolla, and I. Campillo, "Left-handed extraordinary optical transmission through a photonic crystal of subwavelength hole arrays", *Opt. Express* **14**, 5445-5455 (2006).
- [3] M. Navarro-Cía, M. Beruete, M. Sorolla, and I. Campillo, "Negative refraction in a prism made of stacked subwavelength hole arrays" *Opt. Express* **16**, 560-566 (2008).
- [4] J. B. Pendry, A. J. Holden, D.J. Robbins and W. J. Stewart, "Low frequency plasmons in thin thin-wires structures", *J. Phys. Cond. Mat.* **10**, 4785-4809 (1998).
- [5] J. B. Pendry, A.J. Holden, D. J. Robbins and W.J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena frequency plasmons in thin thin-wires structures", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, **47**, 2075 (1999).
- [6] R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction", *Science*, **292**, 77-79 (2001).
- [7] <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
- [8] R. Yahiaoui, V. Vignéras and P. Mounaix, "Theoretical and experimental investigations of easy made fishnet metamaterials at microwave frequencies," accepted for publication in *Journal of Applied Physics A*.

Métamatériaux fishnet et ouvertures sub-longueurs d'ondes

Riad Yahiaoui¹, Hynek Němec², Filip Kadlec², Christelle Kadlec², Petr Kužel² et Patrick Mounaix¹

¹ Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine, Université Bordeaux1, UMR CNRS 5798,
351 Cours de la Libération, 33405 Talence cedex

² Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic,
Na Slovance 2, 182 21 Prague 8, Czech Republic

r.yahiaoui@loma.u-bordeaux1.fr : correspondant principal

Les métamatériaux sont considérés comme une véritable révolution dans le monde de la physique depuis les travaux pionniers de V. G. Veselago¹, J. B. Pendry², et R. A. Shelby³. Nous proposons dans ce papier une étude théorique et expérimentale sur une série de métamatériaux fishnet et d'ouvertures sub-longueurs d'ondes en régime de fréquences térahertz. Un outil de calcul électromagnétique basé sur la méthode des éléments finis (HFSS) ainsi que la spectroscopie térahertz résolue en temps (THz-TDS) ont été utilisés pour prédire le comportement fréquentiel de nos différentes structures et pour caractériser expérimentalement nos prototypes, respectivement, avec un assez bon accord quantitatif entre la mesure et les prédictions théoriques. Nous avons utilisé deux techniques de fabrication, la lithographie optique standard et le micro-usinage au laser. Nous présentons également dans ce papier, une nouvelle approche de caractérisation et d'extraction des paramètres effectifs en régime térahertz^{4,5}.

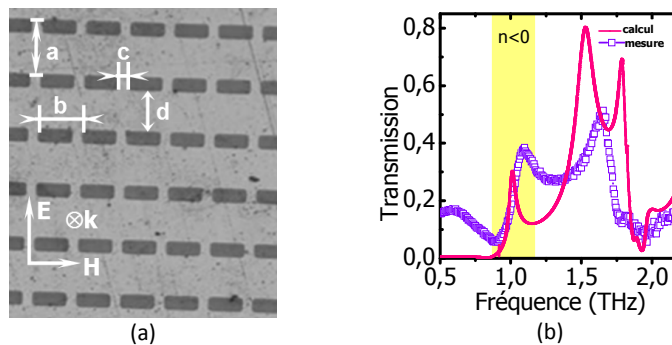


Figure 1. (a) Image au microscope électronique à balayage (MEB) d'une de nos différentes structures fishnet fabriqué par lithographie optique avec les dimensions géométriques suivantes : are $a=160\text{ }\mu\text{m}$, $b=110\text{ }\mu\text{m}$, $c=36\text{ }\mu\text{m}$, $d=120\text{ }\mu\text{m}$, (b) module du coefficient de transmission simulé sous HFSS (traits continus) et mesuré (traits+symboles) par spectroscopie THz résolue en temps.

Références

- [1] V. G. Veselago, "the electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Sov. Phys. Usp.* **10**, 509-514 (1968).
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, D.J. Robbins and W. J. Stewart, "Low frequency plasmons in thin thin-wires structures", *J. Phys. Cond. Mat.* **10**, 4785-4809 (1998).
- [3] J. B. Pendry, A.J. Holden, D. J. Robbins and W.J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena frequency plasmons in thin thin-wires structures", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, **47**, 2075-2084 (1999).
- [4] R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction", *Science*, **292**, 77-79 (2001).
- [5] H. Němec, P. Kužel, F. Kadlec, C. Kadlec, R.Yahiaoui and P. Mounaix, "Tunable terahertz metamaterials with negative permeability", *Phys. Rev. B* **79**, 241108(R) (2009).
- [6] R.Yahiaoui, H. Němec, P. Kužel, F. Kadlec, C. Kadlec, and P. Mounaix, "Broadband dielectric terahertz metamaterials with negative permeability", *Opt. Lett.* **34**, 3541-3543 (2009).

Modélisation directe 3D de métamatériaux et analyse effective

L. Le Cunff, L. Arnaud, S. Blaize, A. Vial, G. Léron del, S. Collin⁺, A. Lupu*

Laboratoire de Nanotechnologie et d'Instrumentation Optique, Institut Charles Delaunay, Université de Technologie de Troyes, 12 rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes Cedex, France

⁺ *Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (LPN-CNRS), Route de Nozay, 91460 Marcoussis, France*

* *Institut d'Électronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, Univ. Paris Sud, 91405 ORSAY Cedex, France*

La modélisation directe aux échelles caractéristiques d'un métamatériau est une problématique à part entière. L'utilisation du mot « matériau » sous entend de pouvoir définir des grandeurs macroscopiques (permittivité et perméabilité effectives). Cette approche reste à être validée quel que soit l'angle d'incidence. Cette dépendance de l'indice en fonction de l'angle devient importante à angle rasant et plus particulièrement en configuration guidée. La description effective devient d'autant plus nécessaire pour modéliser des systèmes complexes intégrant des métamatériaux.

Les études présentées ici sont effectuées dans le cadre du projet ANR METAPHOTONIQUE qui vise en premier lieu à intégrer des métamatériaux sur structures guidantes SOI (Silicon On Insulator) opérant à 1.55 micron.

Nous présenterons des premiers résultats de modélisation 3D, par la méthode FDTD, de « split-rings » résonants sur une gamme spectrale de 1 à 5 microns. Une étude paramétrique en fonction de la taille, périodicité, épaisseur et nature du métal a été réalisée afin d'optimiser la résonance aux longueurs d'ondes télécoms. Ces mêmes simulations ont ensuite été utilisées pour étudier la validité du modèle effectif en incidence normale à partir des spectres théoriques de réflectivité et transmission en amplitude.

Enfin nous présenterons les résultats d'une première analyse effectuée sur des spectres expérimentaux en incidence variable tenant compte de l'anisotropie intrinsèque au métamatériau.

#	Prénom	NOM	Organisme	Contributions déposées	Autres Contributions	Courriel
1	Redha	ABDEDDAIM	Institut Langevin, UMR 7587 CNRS, ESPCI ParisTech	P1	P21	redha.abdeddaim[a]espci.fr
2	Pierre- Michel	ADAM	LNIO/ICD			adam[a]utt.fr
3	Tahsin	AKALIN	IEMN, Lille 1 Univ	E8		tahsin.akalin[a]iemn.univ-lille1.fr
4	Abdellatif	AKJOUJ	IEMN, Université de Lille 1	P2	P22	abdellatif.akjouj[a]univ-lille1.fr
5	Eric	AKMANSOY	Institut d'Electronique Fondamentale		P16	eric.akmansoy[a]ief.u-psud.fr
6	Apostolidis	ALEXANDRA	PLD AND NANOIONICS GROUP			xelapostolidis[a]yahoo.gr
7	Jean- François	ALLAEYS	Thales Communications France			jean-francois.allaey[s]afr.thalesgroup.com
8	Julie	ANGLY	LOf	P3		julie.angly-exterieur[a]eu.rhodia.com
9	Frédéric	ANIEL	IEF			frederic.aniel[a]u-psud.fr
10	Ashod	ARADIAN	Centre de Recherche Paul Pascal (CNRS / U. Bordeaux)	E20	P20 P24 P35	aradian[a]crpp-bordeaux.cnrs.fr
11	Françoise	AXEL	Laboratoire de Physique des Solides			francoise.axel[a]u-psud.fr
12	Nicolas	BACHELARD	Institut Langevin			nicolas.bachelard[a]gmail.com
13	Damienne	BAJON	MOSE/DEOS/ISAE			bajon[a]isae.fr
14	Claudia	BARDES	DCNS			claudia.bardes[a]dcnsgroup.com
15	André	BARKA	ONERA	E21		andre.barka[a]onera.fr
16	Xavier	BEGAUD	Telecom ParisTech		P17 P33	xavier.begaud[a]telecom-paristech.fr
17	Daniel	BLOCH	Laboratoire de Physique des Lasers			daniel.bloch[a]univ-paris13.fr
18	Anne- Sophie	BONNET-BEN DHIA	POEMS	E5	P5	anne-sophie.bonnet-bendhia[a]ensta-paristech.fr
19	Yves	BORENSZTEIN	Institut des NanoSciences de Paris			borensztein[a]insp.jussieu.fr
20	Alain	BOSSAVIT	LGEP	E18		bossavit[a]lgep.supelec.fr
21	Philippe	BOUCAUD	IEF			philippe.boucaud[a]ief.u-psud.fr
22	Guy	BOUCHITTÉ	IMATH	E11		bouchitte[a]univ-tln.fr
23	Patrick	BOUCHON	Laboratoire de Photonique et Nanostructures	P4		patrick.bouchon[a]lpn.cnrs.fr

#	Prénom	NOM	Organisme	Contributions déposées	Autres Contributions	Courriel
24	Azzedine	BOUDRIOUA	Laboratoire de Physique des Lasers			boudrioua[a]univ-paris13.fr
25	Fabrice	BOUST	ONERA-DEMR	E12		fabrice.boust[a]onera.fr
26	Salim	BOUTAMI	CEA-LETI, MINATEC Campus			salim.boutami[a]cea.fr
27	Renald	BRENNER	Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux			renald.brenner[a]univ-paris13.fr
28	Shah Nawaz	BUROKUR	LEME - Univ. Paris Ouest		P34	sburokur[a]u-paris10.fr
29	Olivier	CALVO	Dassault Aviation			olivier.calvo-perez[a]dassault-aviation.com
30	Michael	CANVA	Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique (LCFIO)			michael.canva[a]institutoptique.fr
31	David	CASSAGNE	Laboratoire Charles Coulomb		E19	david.cassagne[a]univ-montp2.fr
32	Éric	CASSAN	IEF		P9	eric.cassan[a]u-psud.fr
33	Emmanuel	CENTENO	LASMEA	E10	E19 P23	emmanuel.centeno[a]univ-bpclermont.fr
34	Lucas	CHESNEL	Ensta, POEMS	P5	E5	lucas.chesnel[a]ensta-paristech.fr
35	Patrick	CIARLET	POEMS		E5 P5	patrick.ciarlet[a]ensta-paristech.fr
36	Benoit	CLUZEL	ICB - Université de Bourgogne		E15	benoit.cluzel[a]u-bourgogne.fr
37	Pierre- Henri	COCQUET	Mathématiques pour l'Industrie et la Physique (MIP)	P6		pierre-henri.cocquet[a]onera.fr
38	Stéphane	COLLIN	LPN/CNRS		E14 P40	stephane.collin[a]lpn.cnrs.fr
39	Doru	CONSTANTIN	Laboratoire de Physique des Solides			constantin[a]lps.u-psud.fr
40	Andrea	COZZA	SUPELEC / DRE			andrea.cozza[a]supelec.fr
41	Thomas	CRÉPIN	ONERA	P7		thomas.crepin[a]onera.fr
42	Romain	CZARNY	Thales R&T			romain.czarny[a]thalesgroup.com
43	Beatrice	DAGENS	IEF			beatrice.dagens[a]ief.u-psud.fr
44	Jean	DAILLANT	LIONS			jean.daillant[a]cea.fr
45	Frédérique	DE FORNEL	ICB-Université de Bourgogne		E15	ffornel[a]u-bourgogne.fr
46	Julien	DE ROSNY	Institut Langevin, UMR 7587 CNRS, ESPCI ParisTech		P1 P2 1	julien.derosny[a]lespci.fr

#	Prénom	NOM	Organisme	Contributions déposées	Autres Contributions	Courriel
47	Aloyse	DEGIRON	IEF		E4 P1 1	aloyse.degiron@u-psud.fr
48	Jean	DELLINGER	Equipe d'Optique de Champ Proche			jean.dellinger@u-bourgogne.fr
49	Rudy	DESMARCHELIER	ICMMO			rudy.desmarchelier@u-psud.fr
50	Abdallah	DHOUBI	LEME			a.dhouibi@u-paris10.fr
51	Bahram	DJAFARI ROUHANI	institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologies			bahram.djafari-rouhani@univ-lille1.fr
52	Zine Eddine	DJEFFAL	L2E	P8		zineddine.dieffal@upmc.fr
53	Khanh Van	DO	CMO- Instiut d'Electronique Fondamentale	P9		van.do-khanh@u-psud.fr
54	Natalia	DUBROVINA	IEF, UMR8622			natalia.dubrovina@u-psud.fr
55	Martial	DUCLOY	Laboratoire de Physique des Lasers	P10		martial.ducloy@univ-paris13.fr
56	Guillaume	DUPONT	Institut Fresnel	E24		guillaume.dupont@fresnel.fr
57	Didier	FELBACQ	Laboratoire Charles Coulomb	E7	E11 E19	didier.felbacq@univ-montp2.fr
58	Mickaël	FEVRIER	Institut d'Electonique Fondamentale			mickael.fevrier@u-psud.fr
59	Sonia	FLISS	POems (UMR 7231 CNRS-INRIA- ENSTA)			sonia.fliss@ensta-paristech.fr
60	Victor	FOUAD HANNA	L2E / Université Pierre Marie Curie			victor.fouad_hanna@upmc.fr
61	Bruno	GALLAS	Institut des NanoSciences de Paris	E23		bruno.gallas@insp.jussieu.fr
62	Jean- Pierre	GANNE	Thales RT		P16	jean-pierre.ganne@thalesgroup.com
63	Enric	GARCIA-CAUREL	LPICM			enric.garcia-caurel@polytechnique.edu
64	Rasta	GHASEMI	IEF	P11		rasta.ghasemi@u-psud.fr
65	Petru	GHENUCHE	LPN/CNRS et ONERA	E14		petru.ghenuche@lpn.cnrs.fr
66	Sandra	GOMEZ	Lab-STICC	P12		sandra.gomez@univ-brest.fr
67	Boris	GRALAK	Institut Fresnel		E15	boris.gralak@fresnel.fr
68	Johan	GRAND	ITODYS, Univ. Paris 7			johan.grand@univ-paris-diderot.fr
69	Sylvain	GRANSART	DGA IP/MC/PMA			sylvain.gransart@dga.defense.gouv.fr
70	Sebastien	GUENNEAU	Institut Fresnel	E17	E24	sebastien.guenneau@fresnel.fr

#	Prénom	NOM	Organisme	Contributions déposées	Autres Contributions	Courriel
71	Patrick	GUENOUN	LIONS			patrick.guenoun[a]cea.fr
72	Géraldine	GUIDA	LEME		E23	geraldine.guida[a]u-paris10.fr
73	Nicolas	GUTH	INSP - UPMC		E23	nicolas.guth[a]insp.jussieu.fr
74	Xiaohe	HAN	LEME			xiaohe.han[a]u-paris10.fr
75	Jiaming	HAO	LGEP	P13		jiaming.hao[a]supelec.fr
76	Jérôme	HAZARD	CEA LETI - Laboratoire d'Ingénierie Nanophotonique			jerome.hazart[a]cea.fr
77	Anne- Christine	HLADKY	IEMN	P14		anne-christine.hladky[a]isen.fr
78	Maxence	HOFMAN	IEMN	P15	E15	m.hofman[a]ed.univ-lille1.fr
79	Antonio	IAZZOLINO	Laboratoire du Futur - CNRS Rhodia Bordeaux-1			<a href="mailto:antonio.iazzolino-
exterieur[a]eu.rhodia.com">antonio.iazzolino- exterieur[a]eu.rhodia.com
80	Jean-Louis	IZBICKI	FANO FR 3110			jean-louis.izbicki[a]univ-lehavre.fr
81	Anthony	JOUANIN	Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique			anthony.jouanin[a]institutoptique.fr
82	Camille	JOUVAUD	Institut Langevin- ESPCI			camille.jouvaud[a]espci.fr
83	Mathieu	KOCIAK	LPS-CNRS	E3		kociak[a]lps.u-psud.fr
84	Gilles	LÉRONDEL	UTT ICD/LNIO	P40		lerondel[a]utt.fr
85	Gaëtan	LÉVÊQUE	IEMN		P22	gaetan.leveque[a]univ-lille1.fr
86	Philippe	LALANNE	Institut d'Optique		E13 P29	philippe.lalanne[a]institutoptique.fr
87	Sylvain	LANNEBERE	CRPP/IMS		E20 P20	lannebere[a]crpp-bordeaux.cnrs.fr
88	Loic	LE CUNFF	UTT ICD/LNIO		P40	loic.le_cunff[a]utt.fr
89	Guillaume	LECAMP	Saint-Gobain Recherche			guillaume.lecamp[a]saint-gobain.com
90	Giuseppe	LEO	Matériaux et Phénomènes Quantiques			giuseppe.leo[a]univ-paris-diderot.fr
91	Thomas	LEPETIT	CEA Le Ripault	P16		thomas.lepetit[a]cea.fr
92	Geoffroy	LEROSEY	Institut Langevin - UMR7587	E2		geoffroy.lerosey[a]espci.fr
93	Jonathan	LEROY	Xlim			jonathan.leroy[a]xlim.fr
94	Eric	LHEURETTE	IEMN		P25 P30	eric.lheurette[a]iemn.univ-lille1.fr

#	Prénom	NOM	Organisme	Contributions déposées	Autres Contributions	Courriel
95	Fabrice	LINOT	Telecom ParisTech	P17		fabrice.linot@telecom-paristech.fr
96	Didier	LIPPENS	IEMN - Université Lille 1	E1	E15 P15 P25 P30 P37	didier.lippens@iemn.univ-lille1.fr
97	Brigitte	LOISEAUX	Thales R&T			brigitte.loiseaux@thalesgroup.com
98	Anatole	LUPU	IEF, CNRS UMR8622		P11 P40	anatole.lupu@u-psud.fr
99	Liubov	MAGDENKO	LPN			liubov.magdenko@lpn.cnrs.fr
100	Kouroch	MAHDJOUBI	IETR , UMR CNRS 6164		P28	kouroch.mahdjoubi@univ-rennes1.fr
101	Nicolas	MALLÉJAC	CEA Le Ripault	E22		nicolas.mallejac@cea.fr
102	Mohamad	MANTASH	IETR - Université de Rennes 1			mohamad.mantash@univ-rennes1.fr
103	Bruno	MARCILHAC	Unité Mixte de Physique CNRS/Thales (UMR 137)			bruno.marcilhac@thalesgroup.com
104	Ahmed	MARKOU	laboratoire de metrologie et de traitement de l'information	P18		ahmed-vert@hotmail.com
105	Anthony	MARTINEZ	CNRS Laboratoire de Photonique et de Nanostructures			anthony.martinez@lpn.cnrs.fr
106	Olivier	MERCHIER	Centre de Recherche Paul Pascal (CNRS / U. Bordeaux)		P24	merchiers@crpp-bordeaux.cnrs.fr
107	Emmanuel	MOEBEL	Université de Strasbourg			emmanuel.moebel@gmail.com
108	Bruno	MORVAN	LOMC FRE 3102 CNRS		P14	bruno.morvan@univ-lehavre.fr
109	Salim	NEMER	LT2C	P19		salim.nemer@univ-st-etienne.fr
110	André	NICOLET	Institut Fresnel		P36	andre.nicolet@fresnel.fr
111	Jérémy	ODEN	Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique			jeremy.oden@institutoptique.fr
112	Jonathan	ODEN	IEMN UMR 8520 CNRS			oden.jonathan@gmail.com
113	Florence	OSSART	LGEP - UPMC			florence.ossart@supelec.fr
114	Abdelwaheb	OURIR	Institut Langevin, UMR 7587 CNRS, ESPCI ParisTech	P21	P1	a.ourir@espci.fr

#	Prénom	NOM	Organisme	Contributions déposées	Autres Contributions	Courriel
115	Yan	PENNEC	IEMN Lille 1	P22	P2	yan.pennec[a]univ-lille1.fr
116	Gérard-Pascal	PIAU	EADS Innovation Works	E9		gerard-pascal.piau[a]eads.net
117	Lionel	PICHON	LGEP			pichon[a]lgep.supelec.fr
118	Rémi	POLLÈS	LASMEA	P23		remi.polles[a]univ-bpclermont.fr
119	Olivier	PONCELET	Institut de Mécanique - Bordeaux			olivier.poncelet[a]u-bordeaux1.fr
120	Virginie	PONSINET	Centre de Recherche Paul Pascal	P24		ponsinet[a]crpp-bordeaux.cnrs.fr
121	Bertrand	POUMELLEC	CNRS-Univ. Paris Sud			bertrand.poumellec[a]u-psud.fr
122	Jean-Marcel	RAX	Laboratoire de Physique des Plasmas			rax[a]lptp.polytechnique.fr
123	Pascal	REMBERT	Laboratoire Ondes et Milieux Complexes			rembertp[a]univ-lehavre.fr
124	Damien	RIEDEL	ISMO			damien.riedel[a]u-psud.fr
125	Yves	ROUSSIGNE	LSPM Université Paris Nord			yves.roussigne[a]univ-paris13.fr
126	Véronique	SADAUNE	IEMN	P25		veronique.sadaune[a]iemn.univ-lille1.fr
127	Reveka	SAINIDOU	Laboratoire Ondes et Milieux Complexes			sainidor[a]univ-lehavre.fr
128	Ronan	SAULEAU	IETR			ronan.sauleau[a]univ-rennes1.fr
129	Sébastien	SAUVAGE	Institut d'Électronique Fondamentale			sebastien.sauvage[a]ief.u-psud.fr
130	Christophe	SAUVAN	Institut d'Optique	E13		christophe.sauvan[a]institutoptique.fr
131	Bruno	SAUVIAC	LT2C	E16	P19	bruno.sauviac[a]telecom-st-etienne.fr
132	Geoffroy	SCHERRER	Groupe d'Optique de Champ Proche - laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne - Université de Bourgogne	E15		geoffroy.scherrer[a]u-bourgogne.fr
133	Christian	SEASSAL	INL-CNRS			christian.seassal[a]ec-lyon.fr
134	Patrick	SEBBAH	Institut Langevin			patrick.sebbah[a]espci.fr
135	Divitha	SEETHARAMDOO	IFSTTAR, LEOST	P26		divitha.seetharamdoo[a]ifsttar.fr
136	Marcio	SILVA PIMENTA	LEAT			spimenta[a]unice.fr
137	Romain	SIRAGUSA	CEA Leti	P27		romain.siragusa[a]cea.fr
138	Maciej	SMIERZCHALSKI	IETR	P28		maciej.smierzchalski[a]univ-rennes1.fr
139	Wojciech	SMIGAJ	Institut d'Optique	P29	E15	wojciech.smigaj[a]institutoptique.fr

#	Prénom	NOM	Organisme	Contributions déposées	Autres Contributions	Courriel
140	Nadia	SOLTANI	IEMN	P30		nadia.soltani[a]ed.univ-lille1.fr
141	Andrei	STACHKEVITCH	LSPM	P31		stachkevitch[a]univ-paris13.fr
142	Thierry	TALIERCIO	IES-UM2-CNRS Montpellier	P32		thierry.taliercio[a]univ-montp2.fr
143	Hakeim	TALLEB	Laboratoire d'Electronique et Electromagnétisme			hakeim.talleb[a]upmc.fr
144	Anne- Claude	TAROT	IETR - Université de Rennes 1	E6		anne-claude.tarot[a]univ-rennes1.fr
145	Flaviano	TATEO	Femto-st			flaviano.tateo[a]femto-st.fr
146	Tatiana	TEPERIK	IEF	E4		tatiana.teperik[a]u-psud.fr
147	Bruno	THEDREZ	Telecom ParisTech			bruno.thedrez[a]telecom-paristech.fr
148	Aita	THIOR	Institut TELECOM - TELECOM ParisTech - LTCI CNRS (UMR 5141)	P33		aita.thior[a]telecom-paristech.fr
149	Paul-Henri	TICHIT	Institut d'Electronique Fondamentale	P34	P11	paul-henri.tichit[a]u-psud.fr
150	Mathias	VANWOLLEGHEM	IEF			mathias.vanwolleghem[a]u-psud.fr
151	Alessandro	VELTRI	CRPP	P35		veltri[a]crpp-bordeaux.cnrs.fr
152	Benjamin	VIAL	Institut Fresnel	P36	P40	benjamin.vial[a]fresnel.fr
153	Valérie	VIGNÉRAS	Laboratoire IMS		E20 P20 P38	valerie.vigneras[a]ims-bordeaux.fr
154	Kevin	VYNCK	LENS	E19		vynck[a]lens.unifi.it
155	Shengxian g	WANG	IEMN	P37	P30	shengxiang.wang[a]iemn.univ-lille1.fr
156	Joffrey	WILL	Université de Strasbourg			joffrey_will[a]orange.fr
157	Régis	WUNENBURGER	LOMA - université Bordeaux 1			r.wunenburger[a]loma.u-bordeaux1.fr
158	Riad	YAHIAOUI	LOMA et IMS	P38 P39 P20		riad.yahiaoui[a]ims-bordeaux.fr
159	Maxim	ZHADOBOV	IETR			maxim.zhadobov[a]univ-rennes1.fr
160	Luyang	ZHOU	LEME-OMS		P13	luyang.zhou[a]u-paris10.fr
161	Yu	ZHU	Laboratoire de Génie Electrique de Paris			yu.zhu[a]supelec.fr

Les organisateurs



Les sponsors



UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11

Faculté des
sciences
d'Orsay

