



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Métamatériaux métal-diélectriques pour l'optique intégrée

Metal-dielectric metamaterials for integrated optics

Natalia Dubrovina^{}, Xavier Le Roux^{*}, André de Lustrac^{*}, Anatole Lupu^{*}*

**Univ. Paris-Sud, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France, natalia.dubrovina@u-psud.fr*

**Univ. Paris-Sud, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France, xavier.leroux@u-psud.fr*

**Univ. Paris-Sud, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France, andre.de-lustrac@u-psud.fr*

**Univ. Paris-Sud, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France, anatole.lupu@u-psud.fr*

Mots-clefs : *métamatériaux ; nanophotonique ; plasmons de surface localisés ; optique intégrée ; metamaterials ; nanophotonics ; localized surface plasmons ; integrated optics*

Résumé

Le sujet de cette étude concerne l'exploration, à la fois sur le plan théorique et expérimental, de la possibilité d'utilisation des métamatériaux (MM) pour des applications d'optique intégrée aux longueurs d'onde télécoms ($\lambda=1.5\mu\text{m}$). L'approche considérée consiste à utiliser une structure hybride composée d'une couche de MM à la surface d'un guide d'onde en Silicium. Il est notamment démontré la possibilité d'effectuer l'ingénierie de l'indice effectif et de contrôler le niveau des pertes d'un tel guide d'onde hybride en utilisant des MM métal-diélectriques de type fils coupés. Les résultats des modélisations (confirmés par des mesures expérimentales) montrent une forte variation de l'indice effective du guide d'onde au voisinage de la fréquence de résonance du MM.

Introduction

L'invention en début de la dernière décennie des MM a donné genèse d'un nouveau type de matériaux optiques artificiels ayant des propriétés souvent inédites, tel que par exemple l'indice de réfraction négatif [1,2], qui n'existe pas dans les matériaux dits "naturels". L'intérêt suscité par l'avènement des MM est dû en grande partie à la possibilité d'un contrôle sans précédent de la propagation des ondes électromagnétiques dans ces milieux composites, ouvrant ainsi la voie à des propriétés et des applications fascinantes comme la cape d'invisibilité [3-12], le concentrateur [12], le rotateur [13], le trou de verre [14] ou des transitions et virages dans des guides [15-20].

A l'heure actuelle la plupart des démonstrations expérimentales pour ces applications ont été réalisées dans le domaine des microondes [5-7]. Les démonstrations dans le domaine de l'optique sont essentiellement limitées à des structures tout diélectriques [11,12,21,22]. Les facteurs essentiels qui empêchent l'utilisation des MM métalliques dans le domaine de l'optique sont liés aux difficultés de la technologie, essentiellement planaire à l'heure actuelle, pour réaliser des structures multicouches [23-25] et aux pertes d'absorption dans les éléments métalliques résonants.

Pour contourner ces difficultés liées à l'utilisation des MM métalliques, l'approche considérée consiste à utiliser une structure hybride composée d'une couche de MM à la surface d'un guide d'onde en Silicium (Fig. 1a). Dans cette configuration le mode reste essentiellement confiné dans le guide d'onde Silicium et c'est uniquement sa partie évanescente qui interagit avec la couche MM. Le MM agit donc plutôt comme une perturbation. Son rôle est de modifier l'indice effectif du guide composite [26,27]. L'avantage d'une telle approche est que cela permet de réduire considérablement les pertes de propagation du fait que seulement une faible partie du mode guidé interagit avec le métal.

1. Design et fabrication

Dans notre étude nous avons considéré un réseau 2D des fils coupés d'au avec 10 périodes le long de la direction de propagation. Le réseau des fils coupés est situé à la surface d'un guide d'onde Silicium de 200nm d'épaisseur et de 10 μ m de largeur. Un étranglement de la largeur de guide à 0.6 μ m, situé entre la partie entrée de guide large de 3 μ m et la partie sortie du guide large de 10 μ m, assure le filtrage des modes latéraux d'ordres supérieurs et permet d'obtenir une propagation essentiellement dans le mode fondamental. Pour avoir une fréquence de résonance des fils à 200THz, qui correspond à la longueur d'onde de 1,5 μ m, la longueur, largeur et la hauteur des fils coupés réalisés est de 200 \times 50 \times 50nm, respectivement [26,27]. La distance de séparation entre les fils le long de l'axe longitudinal est de 100nm. La distance de séparation D le long de la direction de propagation pour différentes structures est D=50, D=100 ou D=150nm.

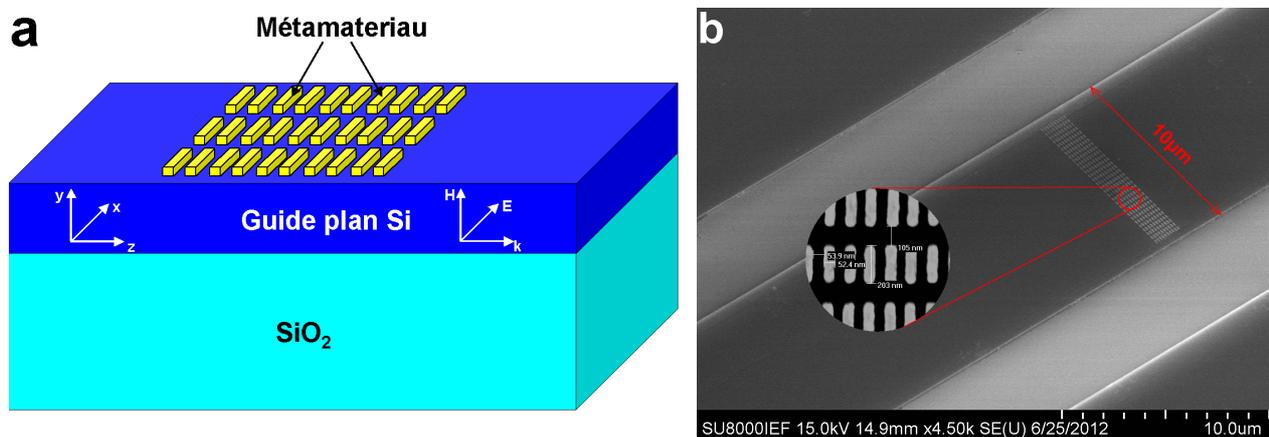


Figure 1. a) Schéma d'une structure hybride de guide photonique SOI incluant une couche de MM. Direction de propagation de la lumière le long de l'axe z. Orientation du champ électrique parallèle à l'axe x ; b) Image MEB d'un guide SOI de 10 μ m de largeur avec une zone de MM (agrandissement).

La réalisation technologique a été effectuée sur un substrat SOI avec 200nm d'épaisseur pour la couche de Silicium et 2 μ m pour l'oxyde enterré. La définition des motifs pour les éléments métalliques a été réalisée par lithographie électronique avec RAITH 150 en utilisant une résine positive PMMA. Une métallisation suivie d'un lift-off aboutit à la réalisation du MM et des marques d'alignement pour une seconde lithographie électronique, destinée à la réalisation des guides. La définition des guides est effectuée par lithographie électronique avec NanoBeam NB5 en utilisant une résine positive ZEP520A. Cette même résine sert de masque pour la gravure ICP (Inductive Coupled Plasma) utilisant un mélange des gaz C₄F₈/SF₆.

Les observations par microscope électronique à balayage (MEB) (fig. 1b), montrent que les dimensions des motifs du MM sont très proches des valeurs nominales. La précision d'alignement des motifs de MM par rapport au guide est de l'ordre de quelques centaines de nanomètres. Une telle précision est bien suffisante dans le cas d'un guide de 10 μ m de largeur et une dimension de la zone de MM de 9 μ m de largeur.

2. Caractérisation expérimentale et comparaison avec les modélisations

La caractérisation expérimentale des structures guidantes à MM est effectuée sur un banc de couplage en bout par fibre lentillée à maintien de polarisation. L'utilisation de plusieurs lasers accordables type T100S, synchronisés avec un détecteur large bande CT400 de Yenista Optics, permet de couvrir sans interruptions la plage spectrale de 1,25 à 1,64 μ m et d'effectuer des mesures spectrales rapides avec 1pm de résolution sur toute la plage spectrale. Le très grand nombre des points de mesures >200000 donne la possibilité d'appliquer une analyse par transformation de Fourier et obtenir ainsi une information détaillée sur les modes qui se propagent et les endroits où la lumière subit des réflexions et de l'absorption dans le guide.

Les spectres de transmission (Fig. 2) montrent pour un mode en polarisation TE la présence d'un creux de transmission qui correspond à la fréquence de résonance obtenue à partir des modélisations (Fig. 3). Ce creux de transmission est absent pour un mode en polarisation TM, quand la direction du champ électrique est perpendiculaire à l'axe longitudinal des fils. Ces résultats démontrent une excitation efficace des résonances du MM dans une configuration guidée pour un mode en polarisation TE. Les spectres de transmission montrent également que pour une même quantité des éléments métalliques, le taux d'atténuation dans le creux de transmission augmente de 20dB avec la distance de séparation D entre les fils le long de la direction de propagation (Fig. 2).

Ce comportement est également confirmé par des modélisations numériques avec HFSS de ANSOFT. Cette augmentation de l'absorption est due à la présence des effets d'interférence à cause des réflexions de Bragg. La contribution des effets interférence augmente avec la période entre les fils. Le comportement observé peut être pris en compte par une approche analytique de propagation des ondes planes dans des milieux périodiques stratifiés en utilisant la loi de dispersion de Lorentz pour décrire les propriétés de MM. Les résultats des modélisations numériques HFSS et

des calculs analytiques en ondes planes (Fig. 3) montrent un bon accord avec les mesures expérimentales. Les mesures de transmission permettent ainsi de déterminer la variation de l'indice effectif du guide induite par la résonance du MM. Cela permet de mettre en évidence une importante variation de l'indice effective du guide d'onde au voisinage de la fréquence de résonance du MM. La possibilité d'effectuer l'ingénierie de l'indice effectif et de contrôler le niveau des pertes d'un guide d'onde hybride utilisant des MM métallo-diélectriques ouvre des perspectives réelles pour un nouveau type de dispositifs photoniques.

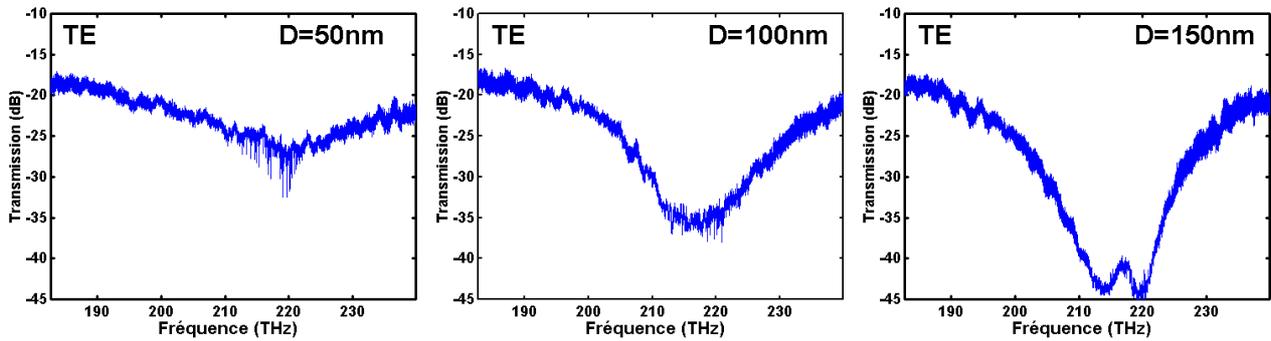


Figure 2. Spectres de transmission d'un guide SOI pour différentes distances de séparation D entre les éléments du MM.

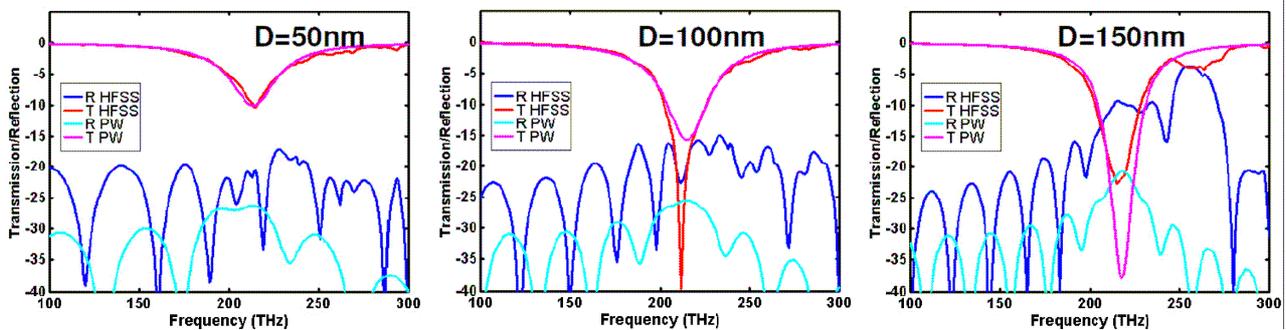


Figure 3. Spectres de transmission et réflexion par modélisations numériques HFSS et calculs en onde planes pour guide SOI avec différentes distances de séparation D entre les éléments du MM.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier de la part de l'ANR VERSO (projet Metaphotonique, contrat N°7452RA09).

Références bibliographiques

- 1- V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability," *Sov. Phys. Usp.* 10, 504 (1968).
- 2- J.B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966-3969 (2000).
- 3- J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, "Controlling electromagnetic fields," *Science* 312, 1780-1782 (2006).
- 4- U. Leonhardt, "Optical conformal mapping," *Science* 312, 1777-1780 (2006).
- 5- D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," *Science* 314, 977-980 (2006).
- 6- B. Kanté, D. Germain, and A. de Lustrac, "Experimental demonstration of a nonmagnetic metamaterial cloak at microwave frequencies," *Phys. Rev. B* 80, 201104 (2009).
- 7- S. Tretyakov, P. Alitalo, O. Luukkonen, and C. Simovski, "Broadband Electromagnetic Cloaking of Long Cylindrical Objects," *Phys. Rev. Lett.* 103, 103905 (2009).
- 8- R. Liu, C. Ji, J. J. Mock, J. Y. Chin, T. J. Cui, and D. R. Smith, "Broadband ground-plane cloak," *Science* 323, 366-369 (2009).
- 9- T. Ergin, N. Stenger, J. B. Pendry, M. Wegener, "Three-Dimensional Invisibility Cloak at Optical Wavelengths," *Science* 328(5976), 337-339 (2010).
- 10- J. Valentine, J. Li, T. Zentgraf, G. Bartal, and X. Zhang, "An optical cloak made of dielectrics," *Nat. Mater.* 8(7), 568-571 (2009).
- 11- L. H. Gabrielli, J. Cardenas, C. B. Poitras, and M. Lipson, "Silicon nanostructure cloak operating at optical frequencies," *Nat. Photonics* 3, 461-463 (2009).
- 12- M. Rahm, D. Schurig, D. A. Roberts, S. A. Cummer, D. R. Smith, and J. B. Pendry, "Design of electromagnetic cloaks and concentrators using form-invariant coordinate transformations of Maxwell's equations," *Photon. Nanostruct.: Fundam. Appl.* 6, 87-95 (2008).

- 13- H. Y. Chen, B. Hou, S. Chen, X. Ao, W. Wen, and C. T. Chan, "Design and experimental realization of a broadband transformation media field rotator at microwave frequencies," *Phys. Rev. Lett.* 102, 183903 (2009).
- 14- Greenleaf, Y. Kurylev, M. Lassas, and G. Uhlmann, "Electromagnetic Wormholes and Virtual Magnetic Monopoles from Metamaterials," *Phys. Rev. Lett.* 99, 183901 (2007).
- 15- M. Rahm, D. A. Roberts, J. B. Pendry, and D. R. Smith, "Transformation-optical design of adaptive beam bends and beam expanders," *Opt. Express* 16, 11555-11567 (2008).
- 16- M. Rahm, S. A. Cummer, D. Schurig, J. B. Pendry, and D. R. Smith, "Optical Design of Reflectionless Complex Media by Finite Embedded Coordinate Transformations," *Phys. Rev. Lett.* 100, 063903 (2008).
- 17- L. Lin, W. Wang, J. Cui, C. Du, and X. Luo, "Design of electromagnetic refractor and phase transformer using coordinate transformation theory," *Opt. Express* 16, 6815-6821 (2008).
- 18- J. Huangfu, S. Xi, F. Kong, J. Zhang, H. Chen, D. Wang, B.-I. Wu, L. Ran, and J. A. Kong, "Application of coordinate transformation in bent waveguides," *J. Appl. Phys.* 104, 014502 (2008).
- 19- P.H. Tichit, S.N. Burokur, A. de Lustrac, "Waveguide taper engineering using coordinate transformation technology," *Opt. Express* 18, 767-772 (2010).
- 20- R. Ghasemi, P.-H.Tichit, A. Degiron, A. Lupu, A. de Lustrac, "Efficient control of a 3D optical mode using a thin sheet of transformation optical medium," *Optics Express* 18, 20305-20312 (2010).
- 21- T. Ergin, N. Stenger, P. Brenner, J. B. Pendry, M. Wegener, "Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths," *Science* 328, 337-339 (2010).
- 22- L. H. Gabrielli, J. Cardenas, C. B. Poitras, and M. Lipson, "Silicon nanostructure cloak operating at optical frequencies," *Nature Photon.* 3, 461-463 (2009).
- 23- J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal, and X. Zhang, "Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index," *Nature* 455, 376-379 (2008).
- 24- N. Liu, H. Guo, L. Fu, S. Kaiser, H. Schweizer, and H. Giessen, "Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies," *Nature Mater.* 7, 31-37 (2008).
- 25- R. Ghasemi, N. Dubrovina, P.-H. Tichit, A. Degiron, A. Lupu, and A. de Lustrac, "Transformation optics and infrared metamaterials for optical devices," *Applied Physics A* 109, 819-823 (2012).
- 26- A. Lupu, N. Dubrovina, R. Ghasemi, A. Degiron, and A. de Lustrac, "Metal-dielectric metamaterials for guided wave silicon photonics," *Opt. Express* 19, 24746-24761 (2011).
- 27- A. Lupu, N. Dubrovina, R. Ghasemi, A. Degiron, A. de Lustrac, "Metal-dielectric metamaterials for guided optics applications," *Proc. SPIE* 8423, 842306 (2012).