



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

### Approche milieu effectif dans le domaine optique appliquée à une monocouche de métamatériau sur substrat diélectrique

#### Single metafilm effective medium behavior in optical domain

*Natalia Dubrovina\**, *Shah Nawaz Burokur\**, *Rasta Ghasemi\**, *Aloyse. Degiron\**, *André de Lustrac\**, *Anatole Lupu\**

\*Univ. Paris-Sud, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France, [natalia.dubrovina@u-psud.fr](mailto:natalia.dubrovina@u-psud.fr)

\*Univ. Paris-Sud, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France, [shah-nawaz.burokur@u-psud.fr](mailto:shah-nawaz.burokur@u-psud.fr)

\*Univ. Paris-Sud, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France, [rasta.ghasemi@u-psud.fr](mailto:rasta.ghasemi@u-psud.fr)

\*Univ. Paris-Sud, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France, [aloyse.degiron@u-psud.fr](mailto:aloyse.degiron@u-psud.fr)

\*Univ. Paris-Sud, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS UMR 8622, 91405 Orsay Cedex, France, [andre.de-lustrac@u-psud.fr](mailto: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](mailto: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 le comportement d'une mono-couche de métamatériau (MM) en tant que milieu effectif. Les résultats des modélisations montrent que les propriétés optiques d'une mono-couche de MM peuvent être décrites par celle d'une couche homogène avec un certain indice effectif. L'épaisseur de cette couche est égale à celle des motifs métalliques, à condition qu'elle soit inférieure à quelques dizaines de nm. Pour des faibles facteurs de remplissage en surface, l'indice de réfraction d'une telle couche suit l'approximation de Maxwell-Garnett. Cet indice ne varie pas avec l'angle d'incidence pour une polarisation S de la lumière perpendiculaire au plan d'incidence

#### Introduction

L'avènement des métamatériaux (MM) a généré une intense activité de recherche sur l'étude de ces milieux optiques artificiels qui montrent des propriétés inhabituelles et qui n'existent pas dans les matériaux naturels [1,2]. L'intérêt pour l'exploration de ces structures est motivé par l'habileté d'un contrôle sans précédent de la propagation des ondes électromagnétiques dans ces milieux artificiels, ouvrant ainsi la voie à des applications inédites, comme par exemple la cape d'invisibilité [3-9] ou la lentille parfaite à base des MM à indice négatif [2].

L'ingénierie de ces milieux artificiels est généralement effectuée en considérant qu'il s'agit d'un milieu effectif volumique avec une permittivité diélectrique  $\epsilon$  et perméabilité magnétique  $\mu$ . Ces paramètres effectifs peuvent être anisotropes dans le cas le plus général. La validité de cette approche est bien établie, mais essentiellement dans le domaine de micro-ondes [10]. Son application dans le domaine de l'optique pose des difficultés, notamment du fait que dans la plupart des cas il s'agit d'une surface recouverte partiellement des motifs métalliques [10-16]. Il n'est pas clair alors quelle épaisseur de MM il faut considérer dans ce cas [15,16].

L'objectif de ce travail est de démontrer que les propriétés optiques d'une mono-couche de MM peuvent être décrites par celle d'une couche homogène avec un certain indice effectif. L'épaisseur de cette couche est égale à celle des motifs métalliques du MM à condition que l'épaisseur du métal soit inférieure à quelques dizaines de nm. Pour des faibles facteurs de remplissage en surface, l'indice de réfraction d'une telle couche suit l'approximation de Maxwell-Garnett.

### 1. Critères de validité approche milieu effectif pour une mono-couche de MM

Pour réaliser cette étude nous avons considéré l'exemple d'un réseau périodique 2D des fils coupés d'Au sur substrat Silicium (Fig. 1a). L'avantage d'une telle structure est que son comportement est essentiellement non-magnétique avec  $\mu \approx 1$  en raison d'une absence de couplage significative entre la résonance électrique et magnétique. Pour vérifier la validité modèle milieu effectif, représenté sur la figure 1b, les critères suivants ont été considérés :

- Perméabilité magnétique  $\mu \approx 1$ , sauf près de la résonance (comportement non-magnétique)
- Linéarité de la variation de la permittivité diélectrique en fonction du facteur de remplissage en surface  $\rho$  (validité de l'approximation Maxwell-Garnett)
- Linéarité de la variation de l'épaisseur optique avec celle du métal
- Invariance de la permittivité diélectrique du MM par rapport à une variation de l'angle d'incidence

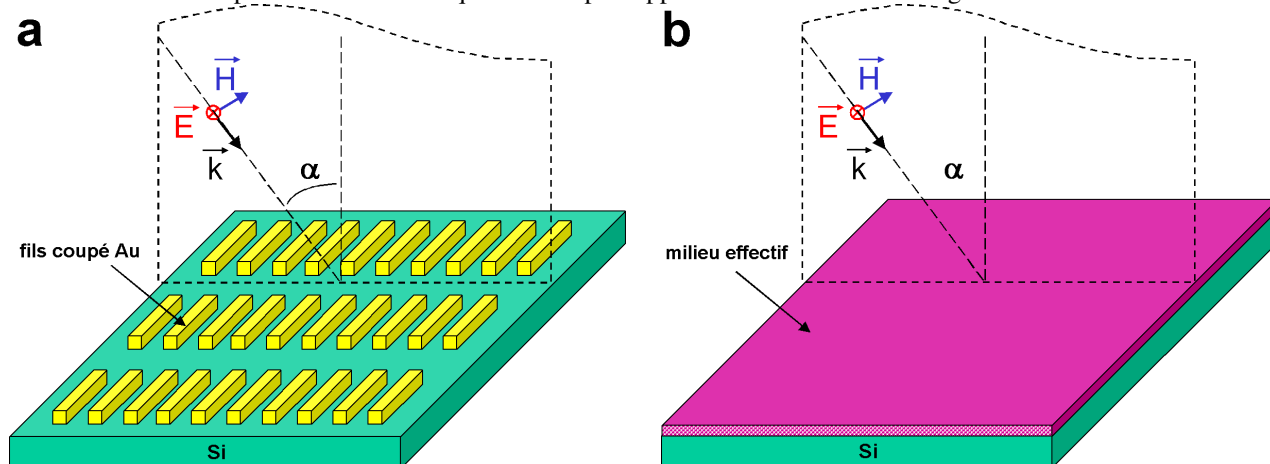


Figure 1 : a) Schéma d'un réseau 2D des fils coupés d'Au sur un substrat Si ; b) Modèle équivalent du milieu effectif

Les modélisations numériques de la transmission et réflexion d'un réseau 2D des fils coupés ont été réalisées en utilisant le logiciel HFSS d'ANSOFT. Les valeurs de la permittivité diélectrique de l'Au utilisé pour ce calcul ont été ceux donné par Palik [17]. L'indice de réfraction de substrat pris est égal à 3,45 et correspond à celui du Silicium à  $1,5\mu\text{m}$  de longueur d'onde. Pour calculer la permittivité effective  $\epsilon_{\text{eff}}$  et la perméabilité effective  $\mu_{\text{eff}}$  à partir des coefficients de réflexion et transmission en amplitude et en phase nous avons utilisé les expressions données dans [18].

Les résultats des modélisations pour différentes épaisseurs du métal du réseau 2D ont confirmé que, en dehors de la région de la résonance la perméabilité magnétique  $\mu \approx 1$ . Ce résultat est obtenu dans le cas ou on considère l'épaisseur de la couche effective égale à celle du métal.

La linéarité de la variation de la permittivité diélectrique en fonction du facteur de remplissage en surface  $\rho$  a été vérifiée en faisant varier de différentes manières la taille et la distance de séparation des fils coupés. Les résultats des modélisations montrent que dans le cas ou la fréquence des résonances des fils coupés est fixe, la permittivité diélectrique effective, normalisée par le facteur de remplissage  $\rho$ , reste approximativement constante.

La linéarité de la variation de l'épaisseur optique avec celle du métal est vérifiée pour des épaisseurs de métal jusqu'à environ 50nm, surtout pour des faibles facteurs de remplissage (Fig. 2a).

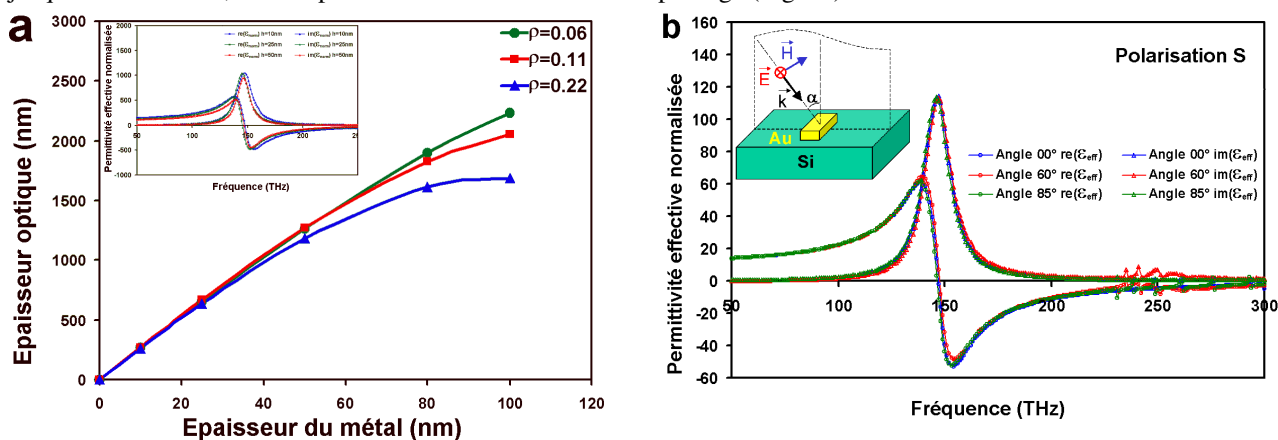


Figure 2 : a) Variation de l'épaisseur optique d'une monocouche de MM normalisé par le facteur de remplissage de surface  $\rho$ . Insert : Variation spectrale de la partie réelle  $\epsilon'_{\text{eff}}$  et imaginaire  $\epsilon''_{\text{eff}}$  de la permittivité diélectrique d'une mono-couche de MM pour différentes épaisseurs du métal. b) Variation spectrale de la partie réelle  $\epsilon'_{\text{eff}}$  et imaginaire  $\epsilon''_{\text{eff}}$  de la permittivité diélectrique d'une mono-couche de MM pour polarisation S à différents angles d'incidence. Insert : Schéma de la configuration pour incidence oblique.

Le dernier point de notre analyse concerne le comportement de MM comme milieu effectif dans le cas d'incidence oblique. Pour éviter les problèmes liés à l'anisotropie nous avons considéré le cas de polarisation S, quand le champ électrique est parallèle à l'axe longitudinal du fil. A l'heure actuelle il n'existe pas encore des méthodes fiables permettant de retrouver correctement les paramètres effectifs dans un cas anisotrope. Les résultats des modélisations ont permis de démontrer que dans le cas de la configuration considérée la permittivité et la perméabilité effectives ne varient pas avec l'angle d'incidence (Fig. 2a).

L'ensemble des résultats obtenus permet ainsi d'affirmer que le comportement d'une mono-couche de MM sur un substrat diélectrique peut être décrit comme celui d'un milieu effectif. L'épaisseur de cette couche effective est égale à celle du métal et pour des faibles facteurs de remplissage peut être décrit par l'approximation de Maxwell-Garnett.

## 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- X. Chen, T. M. Grzegorzczak, B. I. Wu, J. Pacheco, and J. A. Kong, "Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials," *Phys. Rev. E* 70, 016608, 2004.
- 11- T. Driscoll, D. N. Basov, W. J. Padilla, J. J. Mock and D. R. Smith, "Electromagnetic characterization of planar metamaterials by oblique angle spectroscopic measurements," *Phys. Rev. B* 75, 115114, 2007.
- 12- J. Zhou, T. Koschny, M. Kafesaki, and C. M. Soukoulis, "Negative refractive index response of weakly and strongly coupled optical metamaterials," *Phys. Rev. B* 80, 035109, 2009.
- 13- C. Menzel, C. Rockstuhl, T. Paul, and F. Lederer, "Retrieving effective parameters for metamaterials at oblique incidence," *Phys. Rev. B* 77, 195328, 2008.
- 14- C R Simovski, "On electromagnetic characterization and homogenization of nanostructured metamaterials," *J. Opt.* 13 013001 (2011).
- 15- S. Zhang, W. Fan, N. C. Panoiu, K. J. Malloy, R. M. Osgood, and S. R. J. Brueck, "Experimental Demonstration of Near-Infrared Negative-Index Metamaterials," *Phys. Rev. Lett.* 95, 137404 (2005).
- 16- B. Kanté, A. de Lustrac, J.-M. Lourtioz, "Optical metafilms on a dielectric substrate," *Phys. Rev. B* 80, 205120 (2009).
- 17- E. D. Palik, *Handbook of optical constants of solids* (Academic Press, New York, NY 1998).
- 18- 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.