

Nanoantennes infrarouge et dispositifs nanophotoniques

Infrared nanoantenna and nanophotonics devices

Patrick Bouchon¹, Alice Fabas¹, Baptiste Fix¹, Hasnaa El Ouazzani¹, Eslam El Shamy¹, Julien Jaeck¹, Mathilde Makhsian¹, Arthur Salmon¹, Léna Soun¹, and Riad Haïdar¹

¹DOTA, ONERA, Université Paris-Saclay, F-91123 Palaiseau, France

Mots-clés: nanoantennes, absorption infrarouge, émission thermique, dispositifs nanophotoniques

Keywords: nanoantenna, infrared absorption, thermal emission, nanophotonics devices

Résumé:

La structuration de la matière à une échelle sub-longueur d'onde permet la conception de nanoantennes qui vont être capables de modifier la réponse optique (réflectivité, absorption) d'une surface avec une texturation d'une épaisseur inférieure au centième de la longueur d'onde. Ces nano-antennes peuvent aussi exalter les interactions lumière-matière dans leur voisinage champ proche. Une structure composée d'un empilement métal-isolant-métal va être le siège de résonances de type Fabry-Perot, de modes guidés ou de Helmholtz optique. Elles peuvent être mises à profit pour sculpter la réponse spectrale d'une surface en absorption et en émission infrarouge, avec une modulation spatiale de l'ordre de la longueur d'onde. Ces effets peuvent être utilisés dans des dispositifs de sources infrarouges, de convertisseurs thermiques ou non linéaires de longueurs d'onde ou bien pour exalter la signature infrarouge de molécules.

Abstract: The patterning of matter at a sub-wavelength scale allows the design of nanoantennas that will be able to modify the optical response (reflectivity, absorption) of a surface with a texturing thickness of less than one hundredth of the wavelength. These nano-antennas can also enhance light-matter interactions in their near-field neighbourhood. A structure composed of a metal-insulator-metal stack will be the seat of Fabry-Perot, guided modes or optical Helmholtz resonances. They can be used to shape the spectral response of a surface in absorption and infrared emission, with a spatial modulation at the wavelength scale. These effects can be used in various devices such as infrared sources, thermal or non-linear wavelength converters or to enhance the infrared signature of molecules.

1 Introduction

Les nanoantennes sont des structures sub-longueur d'onde capables de manipuler la lumière, soit en modifiant la réponse optique, soit en exaltant des interactions lumière-matière comme les effets non linéaires ou l'absorption infrarouge de molécules. Après avoir dressé un panorama des résonances présentes dans les structures de type métal-isolant-métal (MIM), et des couplages pouvant exister entre nanostructures voisines, je présenterai divers dispositifs nanophotoniques utilisant ces nanoantennes.

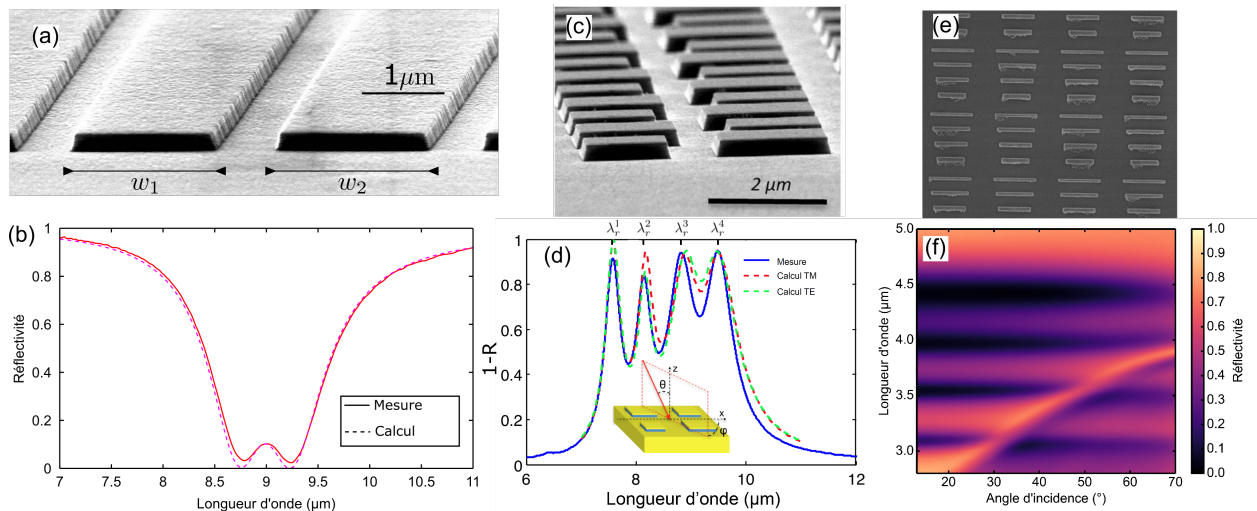


FIGURE 1 – Images MEB des structures (a) biMIM, (c) 4-MIM non polarisée et (e) 4 MIM polarisée. (b) Courbes de réflectivité expérimentale de la structure biMIM en polarisation TM avec un angle d'incidence de 13° mesurée (ligne pleine) et calculée (ligne pointillée). (d) Courbes de réflectivité expérimentale de la structure 4 MIM plots avec un angle d'incidence de 13° mesurée (ligne pleine) et calculée en polarisation TM et TE (lignes pointillées). (f) Diagramme de réflectivité expérimental de la structure à 4 MIM bâtonnets.

2 Les nanoantennes

Les nanoantennes MIM sont composés d'une couche métallique continue, d'une couche diélectrique et d'une nanostructure métallique, qui va permettre la création d'une cavité optique dans lequel un mode gap-plasmon va résonner à une longueur d'onde déterminée par les dimensions latérales de la nanostructuration [1]. Cette résonance, équivalente à celle d'un résonateur de Fabry-Perot, donne lieu à une absorption quasi-totale de la lumière qui est indépendante de l'angle d'incidence. La nanoantenne a une section efficace d'absorption beaucoup plus grande que sa section géométrique.

Ces nanoantennes peuvent être combinées dans une même période sub-longueur d'onde, soit de manière indépendante, soit en étant couplées, créant un résonateur équivalent à une cavité Fabry-Perot à 3 miroirs [2]. Lorsqu'elles sont combinées de manière indépendantes, il est possible d'élargir la bande spectrale d'absorption comme montré sur la Figure 1 [3]. Paradoxalement, lorsqu'elles sont couplées, elles donnent naissance à une résonance présentant un facteur de qualité jusqu'à dix fois plus élevé.

Par ailleurs, ces résonateurs peuvent aussi être le siège de résonances de type Helmholtz optique, dont la principale caractéristique est une exaltation du champ électrique dans le volume chaud contenu entre deux nanostructurations [4]. Elles peuvent aussi être le siège de résonances de type modes guidés [5]. Toutes ces résonances peuvent être mises à profit pour sculpter la réponse spectrale d'une surface en absorption et en émission infrarouge, avec une possible modulation spatiale sur l'échelle d'une longueur d'onde.

3 Dispositifs nanophotoniques

Une application directe de ces résonateurs est leur utilisation comme sources infrarouge [6]. En effet, la loi de Kirchhoff stipule qu'une surface absorbante sera également émettrice avec les mêmes caractéristiques spectrales. On peut ainsi juxtaposer des sources infrarouge de caractéristiques spectrales différentes, et possiblement polarisées. Par ailleurs, en plaçant des antennes absorbantes à une longueur d'onde sur une face d'un substrat, et d'autres jouant le rôle d'émetteur thermique sur la face opposée, on conçoit un convertisseur de longueurs d'onde fonctionnant par transduction thermique. Ce composant peut être utilisé avec une caméra infrarouge pour réaliser un instrument d'imagerie capable de cibler les fréquences térahertz et millimétriques.

Enfin, ces nanoantennes concentrent le champ électrique dans leurs voisinages, menant à des exaltation de plusieurs ordres de grandeurs de l'intensité du champ. Cette propriété peut être utilisée pour exalter les signatures infrarouge d'absorption de molécules placée à proximité des nanoantennes pour des applications de capteurs optiques de molécules. Elle peut aussi être utilisée dans des scénarii de conversion non linéaire de fréquences. Dans ces applications, on tire également parti de la capacité de ces nanoantennes à présenter plusieurs résonances dont les exaltations sont colocalisées.

4 Références

- [1] C. Koechlin, P. Bouchon, F. Pardo, J.-L. Pelouard, and R. Haïdar, "Analytical description of subwavelength plasmonic mim resonators and of their combination," *Optics Express*, vol. 21, no. 6, pp. 7025–7032, 2013.
- [2] B. Fix, J. Jaeck, P. Bouchon, S. Héron, B. Vest, and R. Haïdar, "High-quality-factor double fabry-perot plasmonic nanoresonator," *Optics Letters*, vol. 42, no. 24, pp. 5062–5065, 2017.
- [3] P. Bouchon, C. Koechlin, F. Pardo, R. Haïdar, and J. Pelouard, "Wideband omnidirectional infrared absorber with a patchwork of plasmonic nanoantennas," *Optics Letters*, vol. 37, no. 6, pp. 1038–1040, 2012.
- [4] P. Chevalier, P. Bouchon, R. Haïdar, and F. Pardo, "Optical helmholtz resonators," *Applied Physics Letters*, vol. 105, no. 7, p. 071110, 2014.
- [5] E. Sakat, G. Vincent, P. Ghenuche, N. Bardou, S. Collin, F. Pardo, J. Pelouard, and R. Haïdar, "Guided mode resonance in subwavelength metallodielectric free-standing grating for bandpass filtering," *Optics Letters*, vol. 36, no. 16, pp. 3054–3056, 2011.
- [6] M. Makhsiyani, P. Bouchon, J. Jaeck, J.-L. Pelouard, and R. Haïdar, "Shaping the spatial and spectral emissivity at the diffraction limit," *Applied Physics Letters*, vol. 107, no. 25, p. 251103, 2015.