Ingènierie d'indice optique à base de nanostructures métalliques

Bouchon
Patrick
3ème année

DOTA/CIO & LPN/CNRS

Directeur de thèse : Jean-Luc Pelouard (LPN/CNRS)
Encadrant ONERA : Riad Haïdar (DOTA/CIO)
Encadrant LPN : Fabrice Pardo (LPN/CNRS)

Site : Palaiseau

Thèse financée par : bourse AMX

Mail : patrick.bouchon@onera.fr **Tel :** 0180386432

Mots clés : plasmonique, optique infrarouge, méthode modale B-spline, nanorésonateurs plasmoniques à grand rapport d'aspect

Contexte :
Les équipes CIO à l'ONERA et Phydis au LPN/CNRS collaborent étroitement depuis plusieurs années pour concevoir, fabriquer et caractériser des nanostructures métalliques appliquées à l'optique infrarouge. La structuration de la matière se fait à une échelle sub-longueur d'onde créant de ce fait un matériau artificiel caractérisé par son indice effectif. Il est alors possible de réaliser des fonctions optiques plus ou moins complexes (filtres, absorbant, lentilles…) Ces dispositifs étant sub-longueur d'onde, cela ouvre la voie à une miniaturisation des systèmes optiques et peut amener une amélioration des caractéristiques du détecteur. Par ailleurs, cela ouvre la voie à l'intégration de la fonction optique au voisinage d'une puce de détection, voire en son sein.

Objectifs Scientifiques :
Cette thèse vise en premier lieu à développer des codes de conception de composants plasmoniques basés sur des modèles électromagnétiques originaux permettant d'accélérer les calculs pour des structures à motifs complexes. Des algorithmes métaheuristiques sont ensuite utilisés, mettant à profit ces codes électromagnétiques, pour dimensionner des fonctions optiques.
Par ailleurs, cette thèse vise à étudier des nano-résonateurs plasmoniques tant d'un point de vue physique, grâce aux outils précédemment développés, que technologique (salle blanche) et expérimental (caractérisation optique).

Démarche, déroulement et principaux résultats obtenus :

La structuration de la matière à des échelles très sub-longueur d'onde (<λ/10) a ouvert la voie à la conception et la fabrication de fonctions optiques très compactes, mais qui se complexifient, posant alors le problème du temps nécessaire à dimensionner un objet.
Pour modéliser des empilements de couches structurées suivant une ou deux dimensions, les méthodes les plus performantes sont les méthodes modales, parmi lesquelles la méthode modale de Fourier (ou RCWA) est considérée comme une référence [a,b].
Lors de ma première année de thèse, nous avons souhaité répondre au besoin de codes encore plus performants en développant la méthode modale B-spline (BMM) [1]. L'utilisation d'un maillage non-uniforme (Fig. 1) en fait une des méthodes les plus compétitives pour traiter des empilements de couches structurées suivant une dimension.

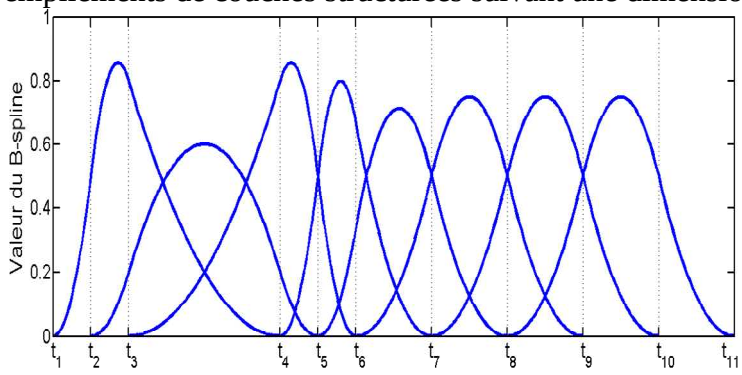

Figure 1. *Base de B-splines de degré 2 définis sur un maillage non-uniforme. Cette propriété permet de raffiner le calcul aux interfaces où se font des sauts d'indice.*

L'autre avantage de cette méthode est de produire une équation aux valeurs propres qui génère des matrices creuses. Je reviendrai dans cet exposé sur les techniques d'accélération de calculs en utilisant ces matrices creuses. Grâce à des algorithmes comme ARPACK, on peut résoudre partiellement des systèmes d'équations aux valeurs propres où les matrices sont creuses [1,2]. On peut ainsi déterminer l'indice effectif des modes propagatifs de structures trop complexes pour être modélisés par une méthode usuelle. Nous avons par ailleurs montré qu'il était possible de mener au bout l'analyse électromagnétique de structures plasmoniques relativement complexes (80 sauts d'indice par période).

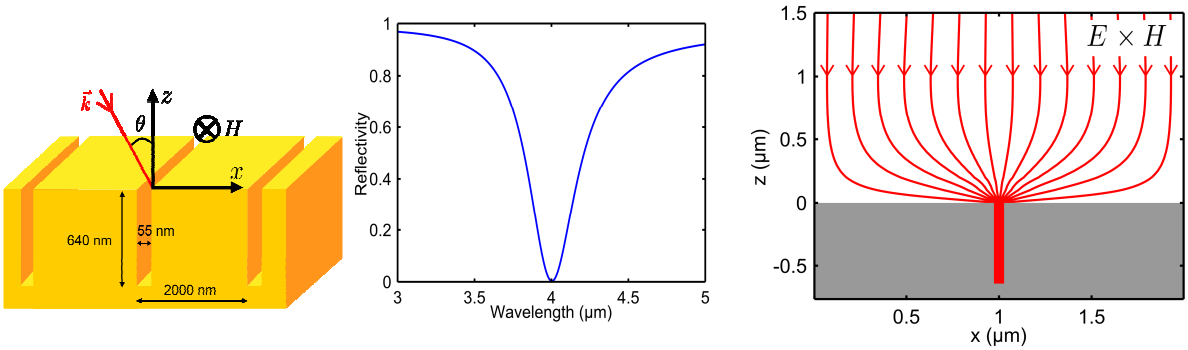

Figure 2. *A gauche, schéma du réseau de fentes métalliques. Au centre, spectre calculé pour une incidence normale et polarisée TM. Il y a absorption totale de la lumière à 4µm. A droite, lignes du flux de Poynting à la résonance. Toute l'énergie incidente est focalisée dans la fente puis absorbée au niveau des parois métalliques.*

Dans la suite de cette présentation, nous reviendrons sur l'étude de nano-résonateurs plasmoniques. Nous avons montré que dans l'infrarouge, il était possible d'obtenir une

absorption totale à une longueur d'onde donnée en structurant 3% d'une surface métallique par des sillons (cf. Fig. 2). La lumière incidente est collectée par toute la surface et focalisée dans la fente et absorbée le long des parois métalliques. Nous avons mis à jour le mécanisme responsable de la focalisation grâce à une analyse énergétique [4].
La fabrication de réseaux de fentes métalliques nanométriques à grand rapport d'aspect (10 :1) était un challenge technologique qui a demandé un développement original faisant appel à des procédés de lithographie électronique, de gravure sèche (ICP) [d] et de dépôt électrolytique. Les réseaux de fentes obtenus (Fig. 3) ont été caractérisés au spectromètre à transformée de Fourier dans l'infrarouge. Ces caractérisations sont cohérentes avec les prévisions théoriques. Les caractérisations angulaires ont permis de confirmer d'une part la nature localisée de la résonance dans la fente et d'autre part de donner des pistes sur l'agilité spectrale de ce résonateur. [5]

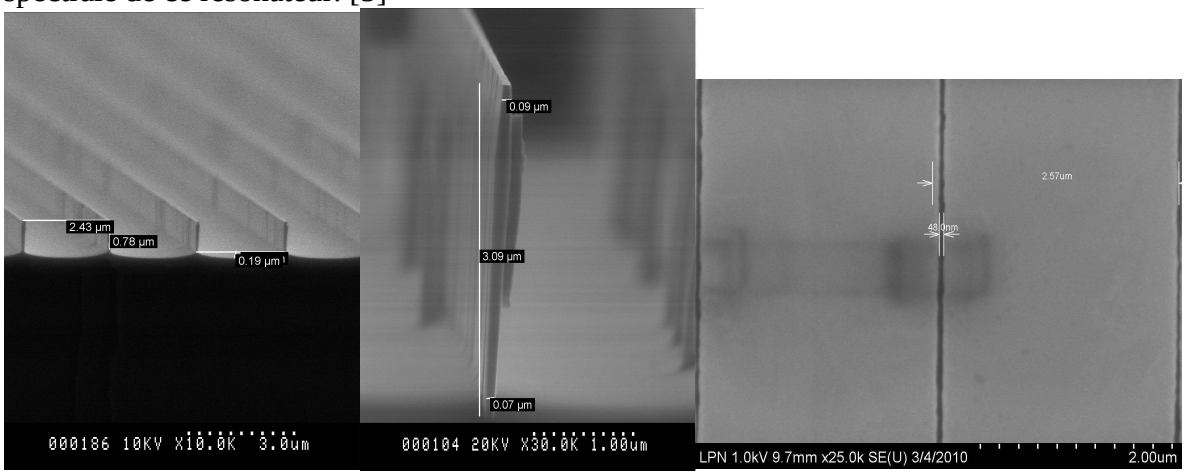

Figure 3. A gauche et au centre: observations MEB de deux réseaux de murs de GaAs. A droite: réseau de fentes d'or vu de dessus, à la fin du process.

Enfin, pour conclure cette présentation, nous présenterons les effets de couplages entre fentes.

Perspectives :

En ce qui concerne les perspectives à court terme de mon travail de thèse, des échantillons multi-fentes doivent être fabriqués afin de caractériser les effets de couplage. Par ailleurs, je travaille avec Charlie Koechlin (2ème année ONERA/LPN) sur le développement de résonateurs plasmoniques pour les bolomètres (projet MIMBO) [7,8] et avec Thomas Estruch (1ère année ONERA) et Emilie Sakat (1ère année ONERA/LPN) sur les effets de couplage entre les nano-résonateurs étudiés pendant ma thèse et d'autres objets plasmoniques (projets Vitrail et Filament).
A moyen terme, deux thèses s'inscrivent dans la continuité des travaux présentés ici, la première sur les antennes plasmoniques avec extension de BMM au 2D (Thèse Benjamin Portier, 1ère année ONERA/LPN) et l'utilisation des codes développés pour faire de la conception de micro-optiques (Thèse Quentin Levesque, début en Octobre 2011).

Bibliographie sommaire:

[a] Lalanne and G. M. Morris, “Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization,” J. Opt. Soc. Am. A 13, 779–784 (1996)
[b] M. Besbes et al, "Numerical analysis of a slit-groove diffraction problem," J. Eur. Opt. Soc. 207022 (2007)
[c] J. Le Perchec et al. "Why Metallic Surfaces with Grooves a Few Nanometers Deep and Wide May Strongly Absorb Visible Light", PRL 100 (2008)
[d] S. Bouchoule et al. Journal of the Electrochemical Society 155, H778 (2008)

Liste des publications et congrès :

Publications:

[1] P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar et J.-L. Pelouard, "Fast modal method for subwavelength gratings based on B-splines formulation", JOSA A 27(4), 696–702 (2010).
[2] P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar et J.-L. Pelouard, "Simulations of nano-optics devices with a fast B-spline modal method", Proc. SPIE 7717, 771703 (2010) – Best student paper
[3] P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar, G. Vincent et J.-L. Pelouard, "Reduced scattering-matrix algorithm for high density plasmonic structures", Opt. Lett. 35, 3222 (2010)
[4] F. Pardo, P. Bouchon, R. Haïdar et J.-L. Pelouard, "Photon harvesting by evanescent waves outgoing from very narrow grooves", preprint sur ArXiv (2010) (soumis)
[5] P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar et al., préparent un article sur la fabrication et la caractérisation de réseaux de fentes métalliques à grand rapport d’aspect. (soumis)

Brevets:

[6] F. Pardo, J.-L. Pelouard, R. Haïdar , P. Bouchon, "Système plasmonique de détection hyperspectrale", brevet en préparation
[7] C. Koechlin, P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar, et al., Enveloppe Soleau déposée "structures plasmoniques pour les bolomètres" (2010)
[8] C. Koechlin, P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar, et al. brevet en préparation structures plasmoniques pour les bolomètres

Conférences:

[9] Poster P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar et J.-L. Pelouard, "Maxwell and Constitutive equations with B-splines approximation", workshop Nanoantenna à l’IOGS, Janvier 2009
[10] Poster, F. Pardo, P. Bouchon R. Haïdar et J.-L. Pelouard, "Huge reduction of computation cost of S-matrix interface terms", workshop Polaritons à Aussoix, Mai 2009
[11] Poster, P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar et J.-L. Pelouard, "B-splines modal method: a new tool for plasmons-based devices", Conférence SPP4 à Amsterdam, Juin 2009
[12] Poster, F. Pardo, P. Bouchon, R. Haïdar et J.-L. Pelouard, "Wide band perfect infrared antenna using multiple nanoslit-resonators", conférence SPP4 à Amsterdam, Juin 2009
[13] Oral, P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar et J.-L. Pelouard, SPIE photonics europe à Bruxelles, Avril 2010
[14] Poster P. Bouchon, F. Pardo, R. Haïdar et J.-L. Pelouard, "Méthode modale B-spline pour le calcul de structures sub-longueur d'onde", JNMO 2010 aux Issambres, Septembre 2010
[15] Poster S. Vassant, F. Pardo, P. Bouchon, F. Marquier, J.-J. Greffet, J.-L. Pelouard, "Tailoring GaAs THz radiatives properties with Surface Phonons Polaritons", JNMO 2010 aux Issambres, Septembre 2010