TRANSMISSION EXALTÉE À TRAVERS DES OUVERTURES ANNULAIRES INCLINÉES (SAAA)

Tahseen Alaridhee*, Abdoulaye Ndao et Fadi. I. Baida

Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174, Département d'Optique P. M. Duffieux

Université de Franche-Comté, 16 route de Gray, 25030 Besançon cedex, France

Email : tahseen.alaridhee@femto-st.fr

RÉSUMÉ

Cette étude examine un aspect fondamental de la transmission optique exaltée de la lumière à travers des réseaux périodiques d'ouvertures sub-longueurs d'onde gravées dans des films métalliques opaques. Ce phénomène remarquable que nous vous présentons repose principalement sur l'excitation d'un mode guidé à l'intérieur des cavités annulaires inclinées (SAAA : Slanted Annular Aperture Arrays). Nous montrons, pour la première fois, que cette transmission extraordinaire est accompagnée d'une propagation en zigzig qui se produit sur des distances sub-micrométriques à l'intérieur des SAAA accompagnée de l'excitation du mode fondamental (TEM : Transverse Electro Magnetic) et ceci de manière indépendante des propriétés d'éclairage (polarisation, angle d'incidence et de l'angle azimutal).

MOTS-CLEFS: *transmission exaltée ; nanostructures métalliques ; modes guidés ; FDTD*

1. INTRODUCTION

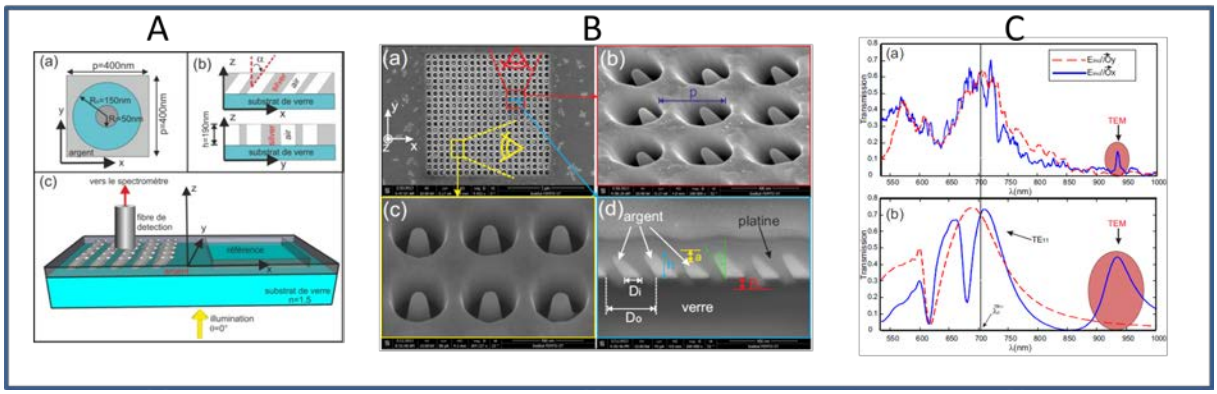
Historiquement, la structure AAA (Annular Aperture Array) a été proposée [1] dans le contexte de la transmission extraordinaire car une telle cavité coaxiale admet un mode guidé sans fréquence de coupure : le mode transverse électromagnétique TEM. Cependant, l'excitation de ce mode pour lequel le champ électromagnétique admet une symétrie de révolution parfaite, reste impossible à l'aide d'une onde plane polarisée linéairement en incidence normale; il ne peut être généré que par une onde dont le champ électrique présente une composante non nulle selon l'axe des ouvertures. Néanmoins, une transmission exaltée a pu être mise en évidence dans ces conditions mais elle était le fruit de l'excitation d'un autre mode guidé dans les nano-ouvertures ; i.e. le mode TE_{11} [2]. En effet, ce dernier présent un bon recouvrement maximal avec une onde plane polarisée rectilignement éclairant la structure sous incidence normale. Cette transmission extraordinaire est obtenue à la longueur d'onde de coupure de ce mode TE_{11}. Cependant, l'excitation du mode transverse électromagnétique TEM peut permettre une transmission efficace à des longueurs d'onde bien supérieures à celle de coupure du mode TE_{11}. En 2007 [3], F. I. Baida a démontré analytiquement et numériquement la possibilité d'exciter ce mode TEM par une onde polarisée linéairement dans le cas d'une structure AAA en métal parfait . Cette étude a permis de démontrer que le mode TEM ne peut être générer qu'avec un faisceau incident oblique polarisé TM (transverse magnétique).

L'importance d'exciter ce mode sans fréquence de coupure et la difficulté expérimentale de le générer en incidence oblique, ont motivé plusieurs chercheurs à s'intéresser à la structure SAAA qui permet de passer outre cette incidence oblique [4-6]. Récemment, nous avons démontré, aussi bien théoriquement qu'expérimentalement, l'excitation de ce mode TEM à travers la structure SAAA fabriquée en métal réel (l'argent) dans la gamme du visible proche IR [7] (voir figure ci-dessous). En parallèle, nous avons réalisé une étude comparative entre AAA et SAAA qui nous a permis non seulement de montrer l'avantage des SAAA par rapport aux AAA (plus d'efficacité de transmission et une longueur d'onde supérieure à celle du mode TE_{11}) mais aussi de démontrer certaines caractéristiques importantes de cette transmission. En effet, comme prévu dans une étude théorique effectuée par une équipe de l'Institut Fresnel à Marseille il y a quelques années [8], nous avons

démontré l'existence de deux états propres de la polarisation (états orthogonaux) pour lesquels la transmission par excitation de ce mode TEM est de 100% pour l'un et de 0% pour l'autre indépendamment des conditions d'éclairage (polarisation, angle d'incidence, angle de tilt, …). Ainsi, il en découle que la transmission d'une lumière dépolarisée (naturelle) est de 50% quelque soit les conditions d'éclairage. Ce résultat ouvre plusieurs perspectives en termes d'applications pour cette structure (photovoltaïque, protection de radar, imagerie champ proche térahertz …).

2. DESCRIPTION, FABRICATION ET CARACTÉRISATION DES SAAA.

La fabrication des structures SAAA en métal réel comporte deux étapes à savoir le dépôt par évaporation d'une couche d'argent suivie d'une gravure par faisceau d'ions focalisés (FIB : Focused Ion Beam). Plusieurs matrices SAAA ont été réalisées. Nous présentons sur la figure ci-dessous un exemple d'une structure présentant une transmission exaltée basée sur l'excitation du mode TEM à la longueur d'onde l=900nm alors que la période de la structure n'est que de 400nm.



(A-a) : coupe xOy montrant les paramètres géométriques (période p=400nm, Ri=50nm, R0=150nm. (A-b) : coupes xOz et xOy avec une épaisseur h=190 nm, a=30°. (A-c) : schéma de la structure avec la référence qui est un trou carré de même dimension que la matrice. (B-a) vue de dessus de l'image MEB d'une matrice SAAA. (B-b) Agrandissement d'une zone contenant 3x 3 ouvertures, (B-c) Agrandissement d'une zone contenant 3x3 ouvertures, (B-d) Section verticale le long de l'axe des ouvertures permettant de mesurer les paramètres géométriques après fabrication (Di = 95nm, Do = 295nm, h=192nm. (C) L'ordre zéro transmis par la structure SAAA en fonction de la longueur d'onde pour deux cas de polarisation : Einc//Ox (ligne bleue) et Ein //Oy (ligne rouge pointillée). Expérience en (C-a) et théorique correspondante en (C-b). Le mode TEM apparait lorsque le champ électrique incident admet une composante électrique non nulle le long de l'axe de l'ouverture.

Nous allons présenter des résultats qui démontrent que quelque soit le plan d'inclinaison, le plan d'incidence ou l'angle azimutal la somme des amplitudes de transmission des pic correspondant à l'excitation du mode TEM pour deux polarisations orthogonales (ici TE et TM) est de 100%. En outre, nous avons également pu montrer la propagation en zigzag de la lumière à l'intérieur SAAA avec des déviations extraordinaires du flux lumineux de plus de 100° sur des distances inférieures à $\lambda/15$.

RÉFÉRENCES

[1] A. Ndao, A. Belkhir, R. Salut and F. I. Baida, "Slanted annular aperture arrays as enhanced-transmission metamaterials: Excitation of the plasmonic transverse electromagnetic guided mode", *Appl. Phys. Lett.*, 103, 211901 (2013)

[2] F.I. Baida, and D. Van Labeke, "Light transmission by subwavelength annular aperture arrays in metallic films", Opt. *Commun*. 209 (2002)

[3] Y. Poujet, J. Salvi, and F. I. Baida, "90% Extraordinary optical transmission in the visible range through annular aperture metallic arrays", *Opt. Lett*. 2942, 32 (2007)

[4] F. I. Baida, "Enhanced transmission through subwavelength metallic coaxial apertures by excitation of the TEM mode", *App. Phys.* B, 89,145 (2007)

[5] M. Hamidi, C. Chemrouk, A. Belkhir, Z. Kebci, A. Ndao, O. Lamrous and F.I. Baida, "SFM-FDTD analysis of triangular-lattice AAA structure: Parametric study of the TEM mode", *Opt. Commun*., 318, 47-52 (2014)

[6] F.I. Baida, A. Belkhir, O. Arar, E.H. Barakat, J. Dahdah, C. Chemrouk, D. Van Labeke, C. Diebold, N. Perry and M.-P. Bernal, "Enhanced optical transmission by light coaxing: Mechanism of the TEM-mode excitation", *Micron* 41 742–745 (2010)

[7] S. Nosal, *Thèse* à l'Ecole Centrale Paris (2009)

[8] A. Fehrembach, D. Maystre, and A. Sentenac, "Phenomenological theory of filtering by resonant dielectric gratings," *J. Opt. Soc. Am*. A 19, 1136-1144 (2002).