

RESEAUX DE NANOANTENNES PLASMONIQUES POUR SYSTEMES D'ECLAIRAGE GRANDE SURFACE COHERENT

Benjamin Leroy¹, Giovanni Magno¹, David Barat², Laetitia Pradere², Béatrice Dagens¹

¹ Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, C2N, 91120 Palaiseau cedex, France

² Groupe PSA, Direction Innovation, Centre technique de Vélizy, route de Gisy, 78140 Vélizy-Villacoublay, France

beatrice.dagens@u-psud.fr

RÉSUMÉ

Une chaîne périodique de nanoparticules plasmoniques constituant un réseau de Bragg est couplée à un guide d'onde afin de contrôler indépendamment la puissance et la directivité du faisceau émis par l'antenne collective. Une telle structure peut être utilisée pour concevoir un émetteur cohérent et uniforme sur une grande surface.

MOTS-CLEFS : *plasmons localisés ; source cohérente ; éclairage*

1. INTRODUCTION

Les sources optiques cohérentes de grande surface sont nécessaires pour révéler des hologrammes visibles à distance, notamment pour des applications automobiles. Les systèmes usuels combinent des éléments d'optique spatiale afin d'étendre le faisceau d'éclairage cohérent sur une large section. Pour rendre l'ensemble compact, voire portable, la source cohérente doit être plane. Elle peut être constituée de sources élémentaires et discrètes, du moment que celles-ci restent cohérentes entre elles et de même directivité. Le principe proposé ici consiste à réaliser un réseau de deux guides d'onde issus d'un même guide d'entrée (dans lequel est injectée une source laser) et 'enroulés' sur la surface, la couvrant entièrement et permettant de répartir la puissance optique sur son ensemble (typiquement 1 cm²). Des 'diffracteurs' (appelées émetteurs dans la suite) sont alors positionnées à proximité de ces guides en différents points de la surface et permettent de rediriger la lumière avec un angle et une directivité donnés (Fig. 1). Puisque ces émetteurs sont en série le long de chaque guide, le défi est de maintenir constantes la puissance émise par les émetteurs successifs, ainsi que la forme du faisceau, malgré la puissance guidée décroissante : comme illustré sur la Fig. 1, l'efficacité de couplage entre le guide et les émetteurs doit donc augmenter le long du guide, et la forme du faisceau émis doit être indépendante du contrôle de ce couplage.

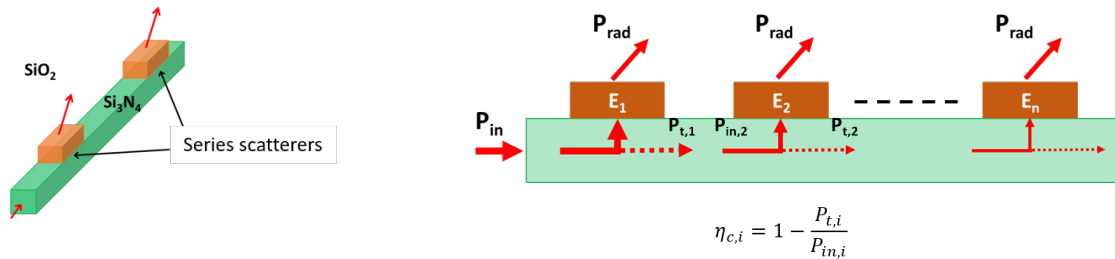


Fig. 1. Principe de l'émission cohérente distribuée: des 'diffracteurs' (ou émetteurs) sont positionnés en série près d'un guide d'onde. L'efficacité de couplage $\eta_{c,i}$ guide-émetteur doit croître le long du guide pour maintenir constante la puissance émise P_{rad} .

L'émission directive sur puce à partir d'antennes Yagi-Uda [1-3], ou les réseaux d'antennes plasmoniques positionnés près d'un guide [4] ont été étudiés récemment : mais dans tous les cas, la lumière émise par les nanoantennes se propage vers le milieu d'indice le plus élevé (substrat), avec un angle qui dépend du contraste d'indice, et donc sans contrôle de la direction d'émission.

Dans le but de contrôler à la fois la directivité et la puissance émise, nous proposons ici d'utiliser des émetteurs constitués chacun d'un réseau périodique de nanostructures plasmoniques (NP), couplé à un guide monomode en nitrure de silicium (Si_3N_4): la résonance plasmonique collective dans chaque chaîne de NP ajuste l'efficacité de couplage entre le guide d'onde et l'émetteur [5], tandis que le réseau de Bragg a pour fonction de contrôler la directivité (direction et divergence) du faisceau réémis [6]. Nous avons montré précédemment [7, 8] le couplage efficace entre le guide Si_3N_4 et une chaîne plasmonique en jouant sur la position, la forme, la taille et le nombre de nanoparticules. Ici, nous montrons que ces propriétés permettent de contrôler indépendamment l'efficacité d'excitation et la directivité des émetteurs, jusqu'à la conception viable technologiquement de l'ensemble de la source cohérente planaire. Les conceptions sont réalisées par FDTD 3D (Finite Difference Time Domain) [9], soutenues par plusieurs validations expérimentales élémentaires. La longueur d'onde de fonctionnement visée est 633 nm.

2. COUPLAGE GUIDE-EMETTEUR

Nous considérons un guide monomode en Si_3N_4 d'épaisseur $T_g = 250 \text{ nm}$ et de largeur $W_g = 300 \text{ nm}$, enterré dans du SiO_2 ($n_{\text{SiO}_2} = 1,457$). Chaque chaîne de NP est composée de nanocylindres elliptiques d'Ag de rayons a_x et a_y , d'épaisseur $t = 40 \text{ nm}$ et de période d . L'indice complexe de l'argent a été déterminé à partir de données ellipsométriques.

Les études précédentes ont montré que la chaîne peut être positionnée au-dessus ou de part et d'autre du guide, sans altérer l'efficacité de couplage. La Fig. 2 montre le cas où 2 chaînes sont positionnées de chaque côté et à mi-hauteur du guide. La distance D' entre la chaîne et le guide caractérise ce positionnement. Le mode fondamental TE est injecté dans le guide, dans la gamme 600-800 nm.

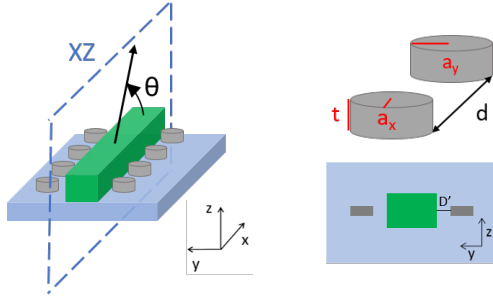


Fig. 2. Emetteur élémentaire constitué de 2 chaînes de nanocylindres elliptiques d'Ag

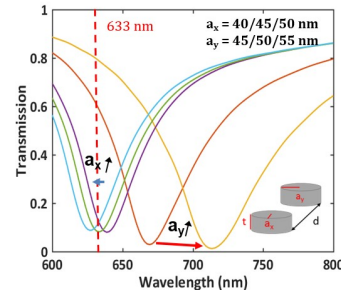


Fig. 3. Spectres de transmission d'une chaîne de 8 NP située 50 nm au-dessus du guide. Période $d=130 \text{ nm}$.

L'efficacité de couplage η_c est évaluée à partir de la transmission T de puissance dans le guide d'onde au niveau de chaque émetteur : $\eta_c = 1 - T$. Les spectres de transmission pour une chaîne positionnée 50 nm au-dessus du guide d'onde et pour différentes dimensions d'ellipses sont représentés sur la Fig. 3. Le minimum de transmission, et donc le maximum de couplage guide-chaîne, correspond à la position spectrale de la résonance de chaîne. Cette position est très sensible à la dimension a_y , et un peu moins à a_x : pour un fonctionnement à 633 nm, l'efficacité de couplage peut donc être choisie de manière précise dans une grande gamme de valeur (de $\sim 10\%$ à $\sim 80\%$) simplement en modifiant les dimensions des ellipses de la chaîne.

3. RAYONNEMENT DIRECTIF ET EMETTEURS EN SERIE

Le contrôle de la directivité est réalisé en changeant la période de la chaîne, suivant l'équation de diffraction : pour une période de 300 nm, l'angle de diffraction dans le plan xz est de

$\pm 108^\circ$ à 633 nm. Les diagrammes de diffraction pour 3 valeurs de a_y (Fig. 4) montrent que l'angle est très peu dépendant de cette dimension, qui en revanche impacte la puissance diffractée. Par ailleurs, le diagramme de rayonnement mesuré sur une structure réalisée avec $d=290\text{nm}$ et $\lambda=635\text{ nm}$ valide l'accord simulation-expérience (Fig. 4).

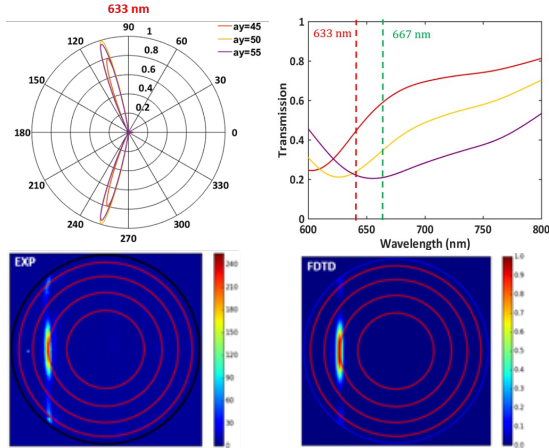


Fig. 4. Diagrammes d'émission calculés et mesurés pour la structure de la Fig. 2 et $d=290\text{nm}$, $D'=125\text{ nm}$

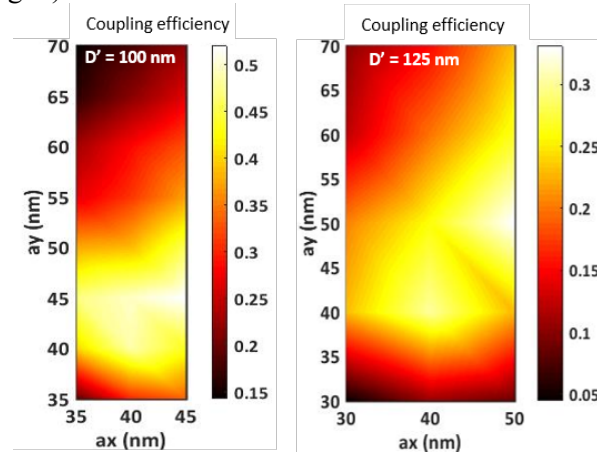


Fig. 5. Efficacité de couplage pour différentes dimensions d'ellipse et deux valeurs de D' .

L'étape finale de la conception consiste à vérifier que ces paramètres ajustables suffisent à obtenir une émission uniforme en puissance et en directivité par 8 émetteurs en série constitués chacun d'un réseau de Bragg de 15 NP. Considérant que la puissance injectée dans l'émetteur j est égale à celle dans le guide après l'émetteur $j-1$ (pas de pertes de propagation), l'efficacité du $n^{\text{ième}}$ émetteur est reliée à celle du 1^{er} par la relation :

$$\eta_{cn} = \frac{\eta_{c1}}{1 - (n-1)\eta_{c1}}$$

Les efficacités de couplage accessibles pour $D'=100$ ou 125 nm sont représentées sur la Fig. 5. La valeur la plus élevée est de 50% avec $D'=100\text{nm}$ et est attribuée au dernier émetteur. Le 1^{er} doit alors être couplé avec une efficacité de 11%. Cela est possible avec une distance $D'=125\text{ nm}$. Les diagrammes de rayonnement pour $D'=100$ et 125 nm sont similaires, donc la conception de la source planaire complète répond aux caractéristiques requises.

CONCLUSION

Nous avons montré la faisabilité d'une source cohérente de grande surface à partir de nanoantennes plasmoniques couplées à un guide d'onde. Chaque chaîne plasmonique périodique joue ainsi le rôle d'émetteur local avec un contrôle indépendant de la directivité, de la forme du faisceau émis et de sa puissance. Des premiers résultats expérimentaux valident l'approche.

Ces travaux ont été soutenus par l'OpenLab PhOVeA et par le réseau RENATECH.

REFERENCES

- [1] A. Curto et al, Science, vol. 329, p.312-315, 2010.
- [2] T. Kosako et al., Nature Photon., vol. 4, p. 312-315, 2010
- [3] F. B. Arango et al., ACS Nano, vol. 6, 10156-10167, 2012
- [4] W. Ding et al. Chin. Phys. B, vol. 23, n°3, 037301-1 à 037301-7, 2014.
- [5] M. Février et al., Nanoletters, vol.12, p. 1032-1037, 2012.
- [6] M. Février et al., Optics Express, vol.21, No.21, 24504-245013, 2013.
- [7] B. Leroy et al, 'Couplage entre un guide d'onde et une nanoantenne en argent,' JNOG 2015.
- [8] B. Leroy et al, oral paper at ACP 2016, Nov. 2-5, 2016, Wuhan, China
- [9] "Lumerical Solutions." <http://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>.