

Adressage optique pour pixels sub-micrométriques *Optical addressing for sub-micrometer pixels*

Marius Crouzier¹, Vy Yam¹, Thomas Lopez², Laetitia Pradere², Béatrice Dagens¹

¹ Université Paris-Saclay, CNRS, Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, 91120, Palaiseau, France

² Stellantis, Direction Scientifique, Centre technique de Vélizy, 78140 Vélizy-Villacoublay, France

Mots clés (en français et en anglais) : Adressage/Adressing ; Optique guidée/Guided Optics ; Plasmons/Plasmons

Résumé/Abstract

Les modulateurs spatiaux de lumière (SLM) sont utilisés pour façonner le front d'onde d'un signal lumineux, et obtenir des fonctionnalités telles que la directivité de faisceaux ou la génération d'hologrammes numériques. La résolution spatiale du SLM peut avoir un impact important sur la performance de la fonction. La technologie LCOS actuelle de ces SLM présente des inconvénients si l'on désire réduire la taille des pixels en dessous de $1 \mu\text{m}$, notamment à cause de son système d'adressage. Nous proposons ici une nouvelle méthode pour réaliser l'adressage d'une zone sub-micrométrique. Pour cela nous utilisons des guides d'ondes en silicium fonctionnalisés avec des chaînes plasmoniques composées de nanoparticules d'or. La dépendance entre la longueur d'onde de résonance plasmonique et la géométrie des nanoparticules est utilisée pour sélectionner le pixel souhaité. Enfin, cette technique nous laisse une liberté sur la disposition des nanoparticules que l'on peut utiliser pour moduler la distribution spatiale du champ électromagnétique.

Spatial light modulators (SLM) are used to shape the wavefront of an optical signal enabling the control of its directivity or generating digital holograms. SLM's spatial resolution may have a major impact on the performance of these functions. The current technique used for SLM is LCOS technology, but its addressing system makes it very difficult to obtain a SLM with a pixel pitch under $1 \mu\text{m}$. In this paper, we present a new technique to address a sub-micrometer area using silicon waveguides with gold nanoparticles chains on their top. The dependence between the plasmon resonance wavelength and the nanoparticle chain geometry is used to address a specific pixel. Finally, this technique allow us to organize the nanoparticles arrangement in order to optimize the spatial distribution of the electromagnetic field.

1 Introduction

Un modulateur spatial de lumière (SLM) est utilisé pour façonner le front d'onde d'un signal lumineux transmis ou réfléchi, afin d'obtenir des fonctionnalités telles que la directivité de faisceaux ou la génération d'hologrammes numériques. Dans ce dernier cas, la résolution spatiale du SLM joue un rôle très important sur la qualité de l'image holographique restituée. Une application phare de ces SLM à haute résolution serait la réalisation d'écrans holographiques 3D.

La majorité des modulateurs spatiaux de lumières (SLM) utilisent la technologie LCOS (Liquid Crystal on Silicium). Ce type de SLM est schématiquement composé d'une nappe de cristaux liquides comprise entre deux électrodes adressables électriquement. Lorsqu'une différence de tension est appliquée entre les deux électrodes un champ électrique se forme dans la couche de cristaux liquides. Ces molécules étant polaires, elles vont alors pivoter afin d'aligner leur moment dipolaire avec le champ électrique. De plus, elles sont également anisotropes : ainsi, le changement d'orientation induit aussi un changement d'indice optique dans la zone située entre les deux électrodes, constituant un pixel. Il est alors possible de moduler localement la phase d'une onde qui traverse le SLM [1].

Cependant, avec cette technologie la taille des pixels est limitée à environ $2\text{-}3 \mu\text{m}$, ce qui n'est pas suffisant pour certaines applications comme, par exemple, l'holographie [2]. La dimension des pixels est limitée principalement par deux mécanismes. Le premier est la fuite du champ électrique d'un pixel sur ces voisins qui entraîne une perturbation de l'orientation des pixels adjacents. Le second effet limitant est la diffusion de la force élastique de rotation entre les molécules de cristaux liquides. La somme de ces deux phénomènes ne permet pas de réduire indéfiniment la taille des pixels [3]. Malgré certaines améliorations [3], il semble très difficile de parvenir à atteindre une taille en dessous du micromètre. Pour s'affranchir de cette limite, en particulier celle due

aux fuites électriques, nous nous sommes penchés vers un nouveau principe d'adressage des pixels, tout-optique, et basé sur l'optique guidée sur silicium. La structure est composée d'une matrice de guides d'onde monomodes rectangulaires en silicium reposant sur un substrat en SiO₂. Chaque intersection, de taille sub-micrométrique, compose la base d'un pixel et est fonctionnalisée par des chaînes de nanoparticules d'or elliptiques situées sur leur surface. Les modes TE propagés dans ces guides (de hauteur $h=220$ nm et de largeur $l=500$ nm) peuvent se coupler aux chaînes plasmoniques [4,5] et générer des points chauds sub-longueur d'onde sur certaines nanoparticules. Ainsi, les intersections sont composées de deux chaînes de nanoparticules pouvant être excitées par le mode TE de l'un des guides.

Dans cette article, nous nous intéresserons uniquement à une intersection : l'étude préliminaire du comportement de ces structures croisées pose plusieurs questions, telles que l'interdépendance de l'excitation des deux chaînes (avec une ou deux sources), dans le cas de chaînes identiques ou à résonances différentes, ainsi que la robustesse du guidage par des chaînes avec des formes de nanostructures plasmoniques diversifiées. L'intervalle de longueur d'onde étudié ici est le proche infrarouge (1200 -1650 nm).

La fonctionnalité ON du pixel est atteinte quand les deux chaînes sont excitées ; si seulement l'une d'entre elles l'est alors le pixel sera considéré dans sa configuration OFF. Il sera donc important de trouver une grandeur qui permettra la distinction entre ces deux états.

2 Indépendance des chaînes

Dans un premier temps, on peut remarquer que si l'on souhaite réaliser à terme une matrice, il faudra alors qu'un même guide puisse adresser plusieurs chaînes (en série). Pour cela, nous disposerons sur un même guide des chaînes ayant une géométrie légèrement différente à chaque intersection. Ainsi, comme la longueur d'onde de résonance est dépendante de la géométrie, il sera possible d'adresser avec un même guide plusieurs chaînes différentes. La résonance plasmonique étant spectralement large, il est nécessaire de s'assurer qu'il est possible d'avoir des chaînes aux intersections dont l'excitation plasmonique est indépendante l'une de l'autre. C'est l'objet de cette partie.

Dans une première structure, deux chaînes identiques de nanoparticules d'or elliptiques (demi-axes 100 et 40nm) sont disposées sur les guides de manière à ce que les dernières nanoparticules des chaînes forment une croix à l'intersection des deux guides (Fig.1a). La résonance d'une chaîne seule a lieu pour la longueur d'onde $\lambda=1520$ nm, comme l'indique le minimum du spectre de transmission du guide Ox (Fig.1d et c, courbe bleue), qui correspond au maximum de transfert d'énergie du guide diélectrique vers la chaîne plasmonique. Si les deux chaînes sont présentes mais seule celle selon l'axe (Ox) est excitée (Fig.1 et c, courbe rouge), la transmission est légèrement plus faible à cause de l'absorption par l'interaction avec une plus grande surface de métal, même hors résonance. Enfin, lorsque les deux chaînes sont présentes et excitées (Fig. 1f et c, courbe jaune), la transmission est plus élevée que dans les deux cas précédents car une partie de l'énergie se propageant selon (Oy) est réfléchi/diffracté à l'intersection et une partie est transmise au guide selon (Ox). Néanmoins, la résonance de la chaîne sur l'axe (Ox) n'est pas (ou peu) influencée par la présence d'une chaîne excitée ou non sur le guide (Oy).

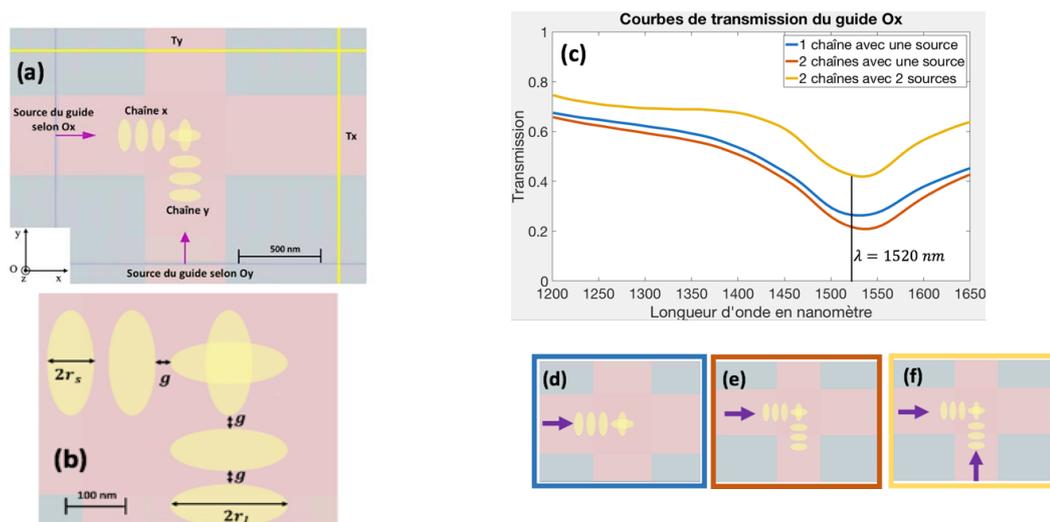


Figure 1 : (a) Schéma de la structure Tx et Ty sont les moniteurs permettant de calculer la transmission dans les guides. (b) Géométrie du croisement des chaînes. (c)-(f) En bleu, la courbe de transmission selon l'axe (Ox) pour la configuration représenté en (d) ; en orange celle pour (e) ; en jaune celle pour (f).

La distribution spatiale du champ électrique (Fig.2) quand une seule source est allumée, lors de la résonance, montre que seuls les points chauds relatifs à la chaîne excitée apparaissent. Dans le cas où les deux chaînes sont excitées, les points chauds des deux chaînes apparaissent et leur intensité est presque identique au cas où une seule chaîne est excitée. Cette structure permet donc la création de points chauds activables indépendamment.

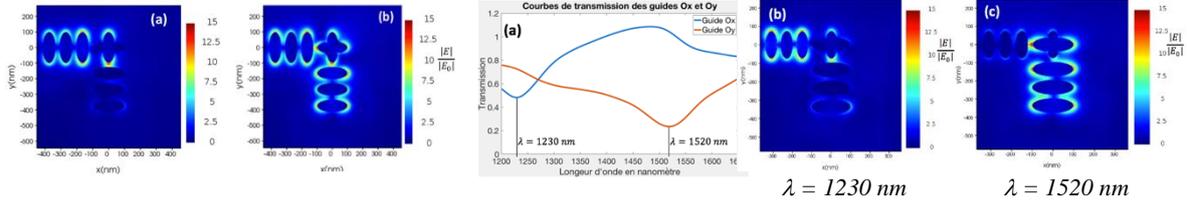


Figure 2 : Distribution spatiale du champ électrique à la résonance ($\lambda=1520 \text{ nm}$) dans le cas où seule la chaîne selon (Ox) est excitée (a) et dans le cas où les deux chaînes sont excitées (b).

Figure 3 : (a) Transmission dans le guide Ox en bleu et dans le guide Oy en orange. Distribution spatiale du champ électrique à la longueur d'onde $\lambda = 1230 \text{ nm}$ (b) et $\lambda = 1520 \text{ nm}$ (c).

Considérons maintenant une seconde structure où la géométrie des deux chaînes n'est pas identique en prenant pour la chaîne de l'axe (Ox) un demi-grand axe noté $r_{ix}=75 \text{ nm}$; les autres paramètres sont conservés. La longueur d'onde de résonance des deux chaînes est donc différente ce qui a pour effet de créer des points chauds à des longueurs d'onde différentes (Fig.3). Il est alors possible d'obtenir une structure, où sur un même guide d'onde, sont disposées des chaînes de nanoparticules elliptiques dont le demi-grand axe varie à chaque intersection et pouvant être excitée indépendamment les unes des autres. De plus, la fonctionnalité ON/OFF du pixel peut être obtenue en déterminant le nombre de points chauds présents à l'intersection : 4 pour l'état ON (deux chaînes identiques à l'intersection) et seulement 2 pour l'état OFF (deux chaînes différentes à l'intersection). L'étendue maximale de la zone allumée est alors de l'ordre de 250 nm.

3 Différentes configurations spatiales du champ plasmonique

Ce type de structure nous permet une certaine liberté sur la disposition des nanoparticules aux intersections des guides, pouvant conduire à différentes distributions du champ électromagnétique autour des nanoparticules. Nous présentons ici deux architectures différentes.

3.1 Un point chaud intense

L'indépendance de l'activation des points chauds de ces chaînes peut être utilisée afin de créer un point chaud intense. Pour cela, nous avons considéré deux chaînes de nanoparticules elliptiques en or placées sous forme de chevrons (Fig.4). Un chevron est composé de deux nanoparticules symétriques par rapport à l'axe du guide et forment chacune un angle de 45° avec l'axe du guide mais d'orientation opposée afin de rapprocher les extrémités de ces deux nanoparticules. La largeur totale des deux nanoparticules formant un chevron est $L=250 \text{ nm}$, l'écart entre les deux extrémités est $g=35 \text{ nm}$ et on fixe le rapport entre le demi-petit axe et le demi-grand axe des nanoparticules $a=0,4$. Cette structure est répétée 4 fois pour former une chaîne de période $d=100 \text{ nm}$. La résonance de cette structure apparaît à $\lambda=1280 \text{ nm}$.

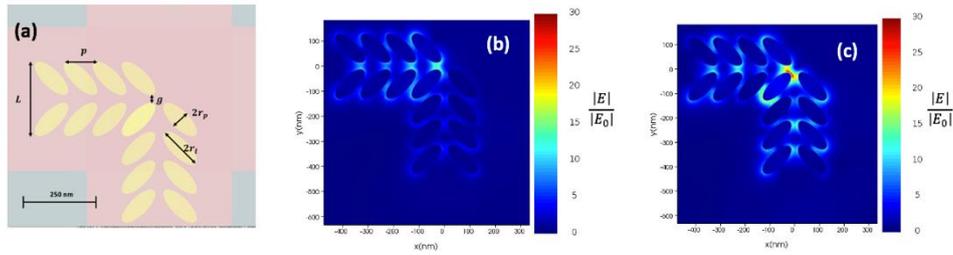


Figure 4 : (a) Schéma de la structure avec les chevrons Représentation de la distribution spatiale du champ électrique à la résonance ($\lambda=1280 \text{ nm}$) dans le cas où seule la chaîne selon (Ox) est excitée (b) et dans le cas où les deux chaînes sont excitées (c).

Cette géométrie permet au dernier chevron de chaque chaîne de partager une nanoparticule commune. Cette caractéristique va permettre de créer deux points chauds au même endroit générant ainsi un unique point chaud d'intensité plus élevée. En effet, les simulations réalisées avec une seule chaîne excitée montrent un point chaud ayant une intensité électrique d'environ 17 fois supérieure à celle du signal d'entrée, et lorsque les deux sources sont allumées l'intensité du point chaud est supérieure de 29 fois. On peut se servir de l'intensité du champ électrique pour définir une fonction ON/OFF du pixel. En choisissant judicieusement une valeur d'intensité seuil, l'état ON est obtenu quand on est au-dessus de cette valeur et l'état OFF en-dessous. L'étendue maximale de la zone allumée est de l'ordre de 100 nm.

3.2 Un champ plasmonique étendu

Il est également possible d'organiser les nanoparticules afin d'obtenir une distribution du champ électromagnétique plus étendue. Dans cet exemple, nous avons placé sur chaque guide, quatre nanoparticules d'or dont les demi-axes sont de 100 et 40 nm respectivement, et qui sont espacées de 100 nm sauf entre la deuxième et troisième nanoparticule où l'espacement est de 200 nm pour les deux chaînes. Cet espace permet de créer un cercle centré sur l'intersection, au centre duquel nous avons ajouté une nanoparticule d'or sous la forme d'un disque de rayon 40 nm (Fig.5). La longueur d'onde de résonance de cette configuration est $\lambda = 1375 \text{ nm}$.

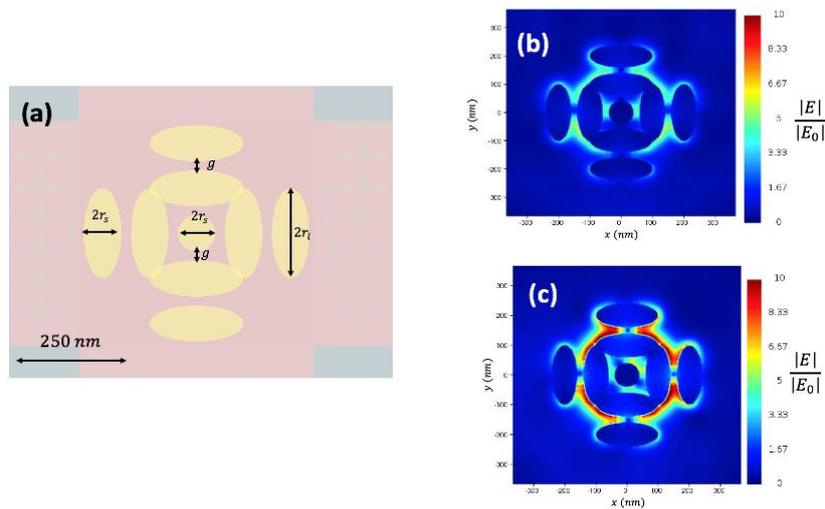


Figure 5 : (a) Schéma de la disposition des nanoparticules à l'intersection. Représentation de la distribution spatiale du champ électrique à la résonance ($\lambda=1375 \text{ nm}$) dans le cas où seule la chaîne selon (Ox) est excitée (b) et dans le cas où les deux chaînes sont excitées (c).

Lors de la résonance, le champ plasmonique s'étend le long des quatre nanoparticules formant le cercle. L'intensité du champ électrique est relativement uniforme à l'extérieur de ces nanoparticules. On remarque des points, entre les nanoparticules de la chaîne et celles du cercle, où l'intensité du champ électrique diminue fortement. Nous avons également étudié l'excitation de cette structure par une seule source selon l'axe Ox (Fig.5b).

Dans ce cas, le champ plasmonique ne se répartit pas uniformément autour de la structure, on note même une dissymétrie entre les nanoparticules de la chaîne selon Oy : la nanoparticule située au-dessus du cercle semble être plus excitée que celle en-dessous du cercle. De plus, dans le cas où les deux sources sont allumées, l'intensité maximale autour des nanoparticules est environ deux fois supérieure à celle où une seule source est allumée. Ainsi, comme avec l'architecture de la partie 3.1 on peut définir une fonction ON/OFF à l'aide de l'intensité du champ électrique. L'étendue de la zone allumée est de l'ordre de 250 nm.

4 Conclusion

Nous avons montré qu'il était possible d'adresser des pixels sub-micrométriques à l'aide d'une matrice de guides d'onde en silicium sur lesquels sont déposées aux intersections deux chaînes de nanoparticules d'or dont chacune est excitable uniquement par un des guides du croisement. La dépendance entre la longueur d'onde de résonance plasmonique et la géométrie des nanoparticules permet de s'assurer que chaque guide peut exciter uniquement une des chaînes sur les différentes intersections qu'il croise. Enfin, la possibilité de jouer sur l'organisation des nanoparticules peut conduire à des distributions spatiales différentes du champ électromagnétique.

Le confinement du champ plasmonique permet de s'affranchir des fuites électriques rencontrées dans la technologie LCOS. L'étape suivante consistera à étudier une méthode de modulation localisée de la phase, adressable par ces structures plasmoniques, pour parvenir à réaliser un SLM à très haute résolution.

Références bibliographiques

- [1] Zhang, Z., You, Z. & Chu, D. "Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices". *Light Sci Appl* **3**, e213 (2014).
- [2] Choi, J. H., Pi, J. E., Hwang, C. Y., Yang, J. H., Kim, Y. H., Kim, G. H., ... & Hwang, C. S. Evolution of spatial light modulator for high-definition digital holography. *ETRI Journal*, 41(1), 23-31, 2019.
- [3] Y. Isomae, T. Ishinabe, Y. Shibata, and H. Fujikake, « Alignment control of liquid crystals in a 1.0- μm -pitch spatial light modulator by lattice-shaped dielectric wall structure », *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 27, n° 4, p. 251-258, 2019.
- [4] M. Février *et al.*, « Giant Coupling Effect between Metal Nanoparticle Chain and Optical Waveguide », *Nano Lett.*, vol. 12, n° 2, p. 1032-1037, févr. 2012.
- [5] G. Magno *et al.*, « Strong coupling and vortexes assisted slow light in plasmonic chain-SOI waveguide systems », *Sci. Rep.*, vol. 7, n° 1, p. 7228, déc. 2017.