



HAL
open science

La nanophotonique : des solutions pour des systèmes de visualisation améliorés et compactés

Béatrice Dagens, Gil Cardoso, Marius Crouzier, Vy Yam, Frédéric Hamouda, Giovanni Magno, Aloyse Degiron, Thomas Lopez

► To cite this version:

Béatrice Dagens, Gil Cardoso, Marius Crouzier, Vy Yam, Frédéric Hamouda, et al.. La nanophotonique : des solutions pour des systèmes de visualisation améliorés et compactés. *Photoniques*, 2022, 115, pp.34-40. 10.1051/photon/202211534 . hal-03757615

HAL Id: hal-03757615

<https://hal.science/hal-03757615>

Submitted on 22 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LA NANOPHOTONIQUE : DES SOLUTIONS POUR DES SYSTÈMES DE VISUALISATION AMÉLIORÉS ET COMPACTÉS

Béatrice DAGENS^{1,*}, Gil CARDOSO¹, Marius CROUZIER^{1,4}, Vy YAM¹, Frédéric HAMOUDA¹,
Giovanni MAGNO², Aloyse DEGIRON³, Thomas LOPEZ⁴

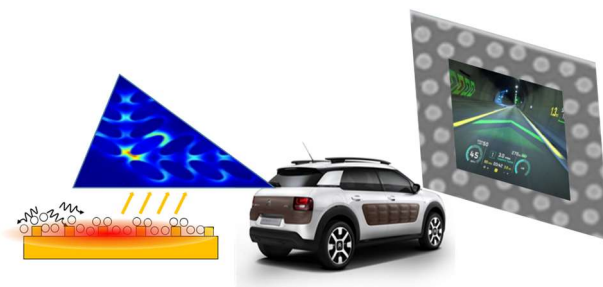
¹Université Paris-Saclay, CNRS, Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, Palaiseau, France

²Department of Electrical and Information Engineering, Polytechnic University of Bari, Bari, Italy

³Université Paris Cité, CNRS, Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Paris, France

⁴Stellantis, Direction Scientifique, Centre technique de Vélizy, Vélizy-Villacoublay, France

*beatrice.dagens@c2n.upsaclay.fr



La nanophotonique a un rôle à jouer pour compacter, alléger et améliorer les systèmes optiques pour les applications de mobilité. Elle offre des solutions non accessibles à l'optique réfractive du fait de son caractère modulaire et de sa compatibilité avec les technologies planaires. En retour, de nouvelles problématiques scientifiques et technologiques lui sont posées, dont nous présentons ici quelques exemples : fonctionnalisation plasmonique d'écrans transparents, émetteur cohérent planaire vectorisé par des plasmons, adressage matriciel de pixels submicroniques.

1. Introduction

Porté par l'évolution des besoins en mobilité, le véhicule est actuellement en pleine transition technologique et d'usage vis-à-vis de l'électrification, de la conduite autonome et des nouveaux rapports entre l'utilisateur et sa solution économique. Les composants optiques sont au cœur des nouvelles Interfaces Homme-Machine (IHM) à développer pour accompagner ces évolutions, comme illustré sur la Figure 1 : écrans 3D, Réalité Augmentée, communication avec l'éclairage/signalisation, vitrages intelligents, caméras/LIDAR pour aides à la conduite. Dans ce cadre, les progrès de l'holographie intéressent les acteurs automobiles mais souffrent actuellement d'une dépendance aux sources lasers et à des optiques de mise en forme du faisceau volumineuses. De manière générale, la multiplication des nouvelles fonctions optiques nécessite le compactage voire la miniaturisation des systèmes optiques et leur commande à bord du véhicule.

C'est ici qu'entre en scène la photonique : **combinant la structuration sub-longueur d'onde des matériaux avec l'approche de fabrication planaire de l'optoélectronique, des éléments optiques conformables et de très haute résolution peuvent être conçus pour façonner la lumière à la demande, avec des moyens technologiques potentiellement bas-coût.** De tels éléments répondent au besoin de compacité tout en permettant l'utilisation de nombreuses fonctions optiques dans les systèmes mobiles.

Cela concerne d'ailleurs aussi bien le secteur de l'automobile, de l'aviation et même de la mobilité individuelle (défense, santé), pour lesquels les systèmes visés reposent sur plusieurs éléments optiques clés similaires :

- les systèmes de Réalité Augmentée nécessitent un support grande surface tel qu'un pare-brise, une visière de casque ou des verres de lunettes, a priori courbés, à la fois hautement réfléchissants pour certaines longueurs d'onde et transparents sur l'ensemble du spectre visible ;
- les systèmes d'affichage holographique, fixes ou reconfigurables, doivent être entièrement planarisés, et de préférence transparents. Ils nécessitent une source planaire de lumière cohérente et émettant sur une

grande surface, afin de révéler l'hologramme. La réalisation d'hologrammes numériques reconfigurables et haute résolution, est également un moyen d'améliorer considérablement la qualité du rendu visuel ;

- les sources d'éclairage directionnelles nécessitent une lumière cohérente pour la compatibilité à l'holographie, mais non lasante pour des raisons de sécurité oculaire.

La nanophotonique offre des solutions versatiles pour ces systèmes : la plasmonique localisée permet de moduler la réflectance d'un substrat fonctionnalisé ; l'optique guidée planaire permet de distribuer la lumière sur une surface avant sa réémission ou bien d'adresser individuellement des pixels, contrôlés et miniaturisés par des structures plasmoniques ; enfin, les approches technologiques d'auto-organisation et de nanoimpression ouvrent la possibilité d'une fabrication grande surface et bas-coût de ces composants nanostructurés.

Si la démonstration complète de ces systèmes reste encore au niveau de la recherche, les concepts élémentaires sous-jacents et leurs premières réalisations en montrent déjà le potentiel. En retour, les verrous rencontrés permettent de poser de nouvelles problématiques pour la photonique.

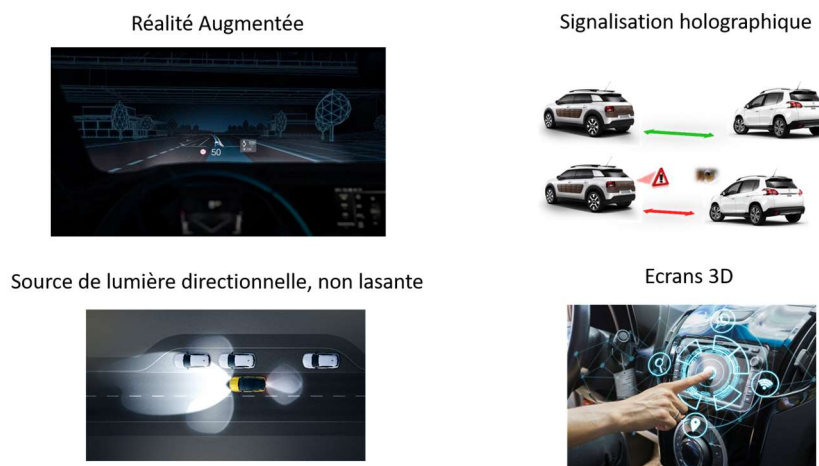


Figure 1. Principaux systèmes optiques développés pour les IHM de demain (réalité augmentée, holographie, source directionnelle, écrans 3D)

2. Écran transparent pour systèmes de réalité augmentée

Le principe de la Réalité Augmentée consiste à permettre à un observateur de voir simultanément l'ensemble de la scène dans laquelle il évolue et l'affichage d'informations virtuelles, sans effort d'accommodation. En d'autres termes, la position de l'image virtuelle doit être dans son champ de vision lointaine. Ainsi dans les systèmes de Vision Tête Haute (VTH) le support de l'image est une lame de verre transparente sur laquelle se réfléchit l'image d'un écran lumineux positionné à une distance assez grande de la lame et dans une zone du tableau de bord non visible directement par le conducteur. Cette lame est soit escamotable soit insérée dans le pare-brise, et en général non plane. Sans traitement de surface, la réflectivité du verre reste limitée à quelques pourcents, ce qui ne permet pas un bon rendu visuel dans toutes les situations (temps ensoleillé, lumière diffusante), ou alors nécessite d'augmenter considérablement la luminosité de l'écran. Un objectif important est donc d'augmenter le taux de réflectivité de la lame pour certaines longueurs d'onde (idéalement les trois couleurs RVB) sans dégrader ses qualités de transparence. Celle-ci sera préservée non seulement en maximisant la transmission de la lumière mais également en évitant des effets de diffusion ou de diffraction. Par ailleurs, le rendu visuel ne doit pas dépendre de l'angle d'observation, le conducteur étant susceptible de bouger dans un secteur de +/- 60° autour d'une direction spéculaire 'centrale'. Bénéficiant de nombreux degrés de liberté de conception et d'agencement, **les nanostructures à plasmons localisés peuvent répondre à l'ensemble de ces caractéristiques (génération d'un ou plusieurs pics de réflectivité, indépendance à l'angle d'observation, préservation de la transparence)** avec un procédé technologique potentiellement grande surface et bas-coût.

Surfaces transparentes et réfléchissantes à base de résonateurs plasmoniques

Les résonances dans des structures métalliques plasmoniques résultent du couplage entre une onde électromagnétique et les électrons de conduction de surface du métal (en argent, ici). Dans le cas de nanostructures, le plasmon de surface reste localisé et sa fréquence de résonance dépend principalement des dimensions, du facteur de forme et de l'environnement de la particule métallique. Avec ses dimensions sub-longueurs d'onde, le résonateur a un impact négligeable sur les ondes électromagnétiques loin de sa résonance et il apparaît comme quasi-transparent. Au contraire, à la résonance, il induit une augmentation significative de la réflectivité, qui combinée aux pertes ohmiques réduit fortement la transmission de la fréquence optique correspondante. Ainsi une assemblée de nanostructures plasmoniques (NP) identiques réparties sur un substrat transparent modifie la réflectance et la transmittance spectrales de l'objet, et en conséquence sa couleur lorsque la résonance se produit dans la gamme du visible.

L'agencement spatial de cette assemblée a également un impact sur les propriétés optiques globales du substrat fonctionnalisé : une organisation périodique non sub-longueur d'onde diffracte la lumière à certaines combinaisons angle d'incidence - fréquence ; une organisation aléatoire évite ces effets de diffraction mais génère une apparence 'laiteuse' par effet de diffusion lumineuse. Entre les deux, l'agencement en désordre corrélé, comme dans le cas de structures hyperuniformes, permet de définir des gammes angulo-spectrales de fonctionnement sans diffraction ni diffusion de la lumière, même dans le cas d'organisations non sub-longueurs d'onde [1].

La géométrie des nanostructures et leur agencement sont ainsi deux paramètres indépendants pour le contrôle des propriétés optiques globales de la lame fonctionnalisée [2]. Pour une résonance donnée, seule la densité surfacique des résonateurs modifie ces propriétés. Par exemple, une densité de 16 NP/ μm^2 de structures plasmoniques résonnantes à 590 nm (couleur orange), agencées suivant un désordre corrélé, permet d'augmenter la réflectivité à cette fréquence à plus de 70 % (pour une polarisation linéaire), tout en gardant une transmittance sur l'ensemble du visible (et les deux polarisations linéaires) au-dessus de 60 %, avec un angle d'incidence de 45°. Cela correspond à un niveau de fonctionnement compatible avec les systèmes VTH de l'automobile, et ce malgré la largeur des résonances plasmoniques. Le rendu visuel est illustré en Figure 2(a) sur un système VTH de laboratoire : l'image transmise reste nette, et l'image réfléchie apparaît plus lumineuse sur la zone fonctionnalisée (traits pointillés blancs).

Fabrication grande surface d'une assemblée de résonateurs plasmoniques

La démonstration de la Figure 2(a) a été faite pour des nanostructures définies par lithographie électronique, sur une surface à la limite des capacités actuelles de cette technique (1 cm^2). Afin d'être viable pour les applications de visualisation mentionnées précédemment, la méthode de fabrication doit évoluer vers une technique bas-coût permettant la nanostructuration sur des grandes surfaces. Les dimensions visées à terme sont typiquement des assemblées de nanocylindres métalliques de 30 nm d'épaisseur et 100 nm de diamètre, avec une densité spatiale moyenne de 16 NP/ μm^2 sur une surface de plusieurs dizaines de cm^2 . Les techniques de nanofabrication grande surface les plus prometteuses sont celles à base d'auto-assemblage de nanostructures (en général des nanosphères) ou celles utilisant la réplique d'un motif par nanoimpression.

Avec ces techniques, qui peuvent être combinées, la transparence de la lame fonctionnalisée peut être affectée par les défauts de fabrication. Pour caractériser leur influence sur le rendu optique, on peut utiliser le facteur de structure de l'agencement spatial qui décrit le niveau d'ordre partiel et renseigne sur les propriétés angulo-spectrales de diffusion et/ou de diffraction de la métasurface [1]. La zone d'intérêt correspond ici à la gamme du visible (400-800nm) et aux angles d'observation de $\sim 15^\circ$ à 60° , angles limites déterminés respectivement par la zone superposée au spéculaire et par les mouvements supposés de l'observateur par rapport à la lame. Pour cette zone d'observation, le facteur de structure doit présenter des valeurs typiquement inférieures à $\sim 0,05$ pour un rendu visuel acceptable.

Le procédé de fabrication comporte une étape d'auto-assemblage de nanosphères de polystyrène pour définir le futur agencement spatial des nanostructures plasmoniques, suivi d'un transfert du motif élémentaire dans un timbre de PDMS, et enfin sa réplique par nanoimpression suivie d'un lift-off d'argent [3]. Sur une surface plane, ce

procédé conduit à une structure hexagonale compacte : afin d'éviter des effets de diffraction dans le visible, des nanosphères de 200 nm de diamètre sont utilisées. Sans optimisation spécifique de l'auto-assemblage, les défauts d'organisation génèrent des ruptures d'orientation de la structure hexagonale compacte qui rendent le facteur de structure globalement isotrope en 2D. D'autres défauts de fabrication, comme des 'fragmentations', peuvent générer quelques nanostructures plus petites que celles visées. Cela affecte principalement le spectre de réflectivité qui devient alors très élargi (Figure 2(b)). Sur la Figure 2(c), la gamme d'utilisation angulo-spectrale de la métasurface est représentée par la zone comprise entre les deux traits verticaux pointillés noirs: la **métasurface fabriquée par auto-assemblage et nanoimpression** apparait exempte d'effet de diffusion et de diffraction sur cette gamme, et avec une réponse optique isotrope.

La structure hexagonale compacte fabriquée conduit néanmoins à une densité de nanostructures plasmoniques de plus de 22 NP/μm², très supérieure au bon compromis réflectivité/transmittance établi précédemment avec une densité de 16 NP/μm². Si le rendu visuel est similaire à celui de la métasurface fabriquée par lithographie électronique, la transmittance est plus faible. Un niveau de densité spatiale de 16 NP/cm² pourrait être atteint en supprimant une proportion choisie par lithographie optique de nanostructures lors du procédé de nanoimpression. Ce second motif, de dimensions sup-longueurs d'onde, peut être conçu pour ne générer ni diffraction ni diffusion sur la gamme d'observation, en prenant un arrangement basé sur un désordre corrélé comme l'illustre la Figure 2(c).

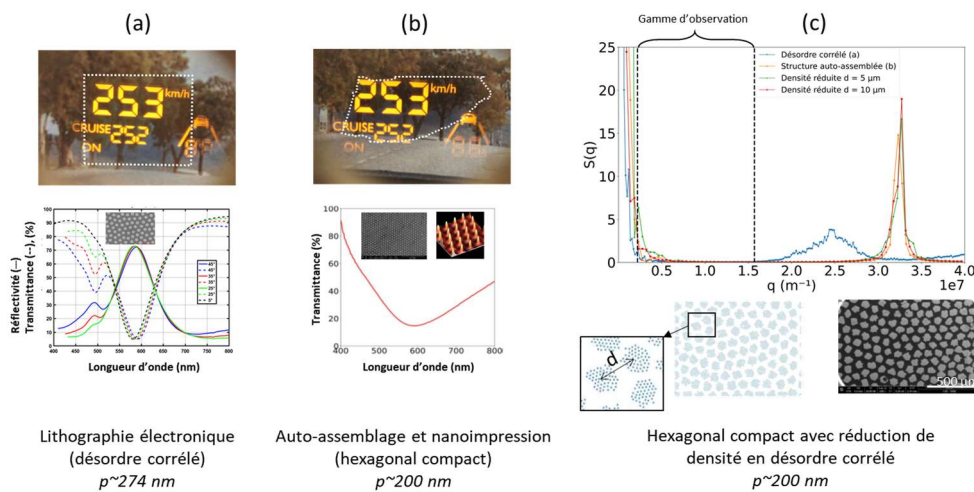


Figure 2. (a) Métasurface plasmonique à désordre corrélé avec une densité de 16 NP/μm², fabriquée par lithographie électronique sur 1 cm² : (de bas en haut) spectres de transmittance et de réflectivité en polarisation S pour différents angles d'incidence, image MEB de la structure (insert) et rendu visuel sur système VTH. (b) Métasurface plasmonique hexagonale compacte (~22 NP/μm²) fabriquée par auto-assemblage et nanoimpression sur une surface de 0,67 cm² : (de bas en haut) spectre de transmittance en incidence normale, image MEB de la structure et image AFM du timbre de nanoimpression (insert) et rendu visuel sur système VTH. L'auto-assemblage entraîne une multitude d'orientations par domaines de la structure hexagonale compacte qui est macroscopiquement quasi-isotrope. (c) Impact de l'organisation spatiale des NP sur le facteur de structure 1D (moyenne sur 360° du facteur de structure 2D) de la métasurface dans le cas d'un désordre corrélé (a), de l'hexagonal compact à multi-orientations (b), et de ce même hexagonal compact avec réduction de densité suivant un désordre corrélé : la densité est réduite de 50%, avec une granularité définie par la distance d (d = 5 ou 10 μm). p désigne la distance moyenne interparticules.

Ces résultats montrent que le **caractère discret des nanostructures plasmoniques permet une grande diversité de conception en jouant sur les résonances à l'échelle nano et sur l'agencement à l'échelle macro**. Cette approche, qui reste à confirmer sur des plus grandes surfaces, peut être généralisée pour l'obtention de plusieurs couleurs, par exemple en utilisant la polarisation de la lumière ou en modifiant localement par lithographie optique les dimensions des nanostructures. Ce type de structures peut être aisément fabriqué sur des surfaces non planes, voire sur des substrats souples et repositionnables.

3. Concepts pour systèmes holographiques planaires

L'holographie est une technique d'imagerie 3D qui permet d'accéder à la phase de l'onde que l'on souhaite recomposer. Pour restituer une image visible de qualité, les systèmes holographiques nécessitent un hologramme à *résolution submicronique* et une source *cohérente* pour illuminer cet hologramme *sur toute sa surface*. Ces deux objectifs restent aujourd'hui de véritables défis si on considère que le système doit être compact et léger, et donc se présenter sous forme d'un système quasi-2D.

Source cohérente distribuée

La source cohérente grande surface, à base d'éléments d'optique réfractive, est l'élément le plus volumineux des systèmes holographiques actuels. Sa planarisation peut être réalisée grâce à un **répartiteur de lumière à base de guides d'onde, différentes portions de ces guides étant couplées à des réseaux de diffraction répartis sur l'ensemble de la surface**. Pour compacter le répartiteur, sa géométrie est constituée de deux boucles imbriquées dans lesquelles un même train d'onde d'une source laser se propage de manière contra-directionnelle, comme illustré sur la Figure 3(a). Un même signal adressant les réseaux de diffraction positionnés en série, ceux-ci doivent présenter une efficacité de couplage croissante afin d'assurer une émission de puissance uniforme sur l'ensemble de la surface. Il faut donc contrôler indépendamment l'angle de diffraction et la force de couplage entre le guide et chaque réseau, avec une technologie planaire raisonnablement accessible. Cela est possible en considérant des réseaux de chaînes plasmoniques dont la force de couplage est modulable par la résonance plasmonique et la distance au guide [5], et l'angle de diffraction par la période de la chaîne. Chaque chaîne se comportant à la résonance comme un guide d'onde, le taux de transfert de la puissance optique peut être ajusté entre 0 et presque 100 % [4] en contrôlant la position de la résonance, par exemple en modifiant la taille des nanoparticules de chaque chaîne. Typiquement deux séries de 8 chaînes, positionnées à côté d'un réseau de guides en SiN/SiO₂, et constituées chacune d'une dizaine de nanoparticules d'argent cylindriques à section elliptique de diamètres a_y et 80 nm, avec $80 \text{ nm} < a_y < 120 \text{ nm}$, peuvent réaliser la fonction d'émetteur de lumière cohérente sur une surface de 1 cm². Une surface de plaque éclairante plus grande peut être obtenue en juxtaposant ces répartiteurs élémentaires.

Nanoémetteurs synchronisés

Une autre solution pour réaliser une plaque émettrice à lumière cohérente consiste à contrôler la phase d'une assemblée de nanoémetteurs tels que des boîtes quantiques ou des molécules actives réparties sur un substrat. Le contrôle le plus simple consiste à **forcer les émetteurs à rayonner dans une structure monomode (guide d'onde, plasmon de surface propagatif...)**, ce qui équivaut à réaliser une sélection en fréquences de Fourier qui augmente fortement le degré de cohérence spatiale de l'émission. Cette approche repose sur plusieurs axes de recherche fondamentale qui incluent l'étude de ces matériaux actifs, leur couplage faible ou fort à des modes guidés et les stratégies pour manipuler leur rayonnement dans l'espace libre et structurer des fronts d'onde complexes à la demande [6]. Sur le plus long terme, il serait également souhaitable d'exalter la cohérence temporelle des émetteurs, ce qui équivaut à les synchroniser. Des pistes prometteuses ont déjà été explorées dans le moyen-infrarouge, en tirant parti du comportement collectif (gaz 2D) de certains matériaux actifs fortement dopés [7]. L'intérêt majeur de cette solution est de permettre la réalisation bas-coût d'une **source grande surface, cohérente mais non lasante**, pouvant servir aussi bien à l'éclairage directionnel qu'aux systèmes d'holographie planaire.

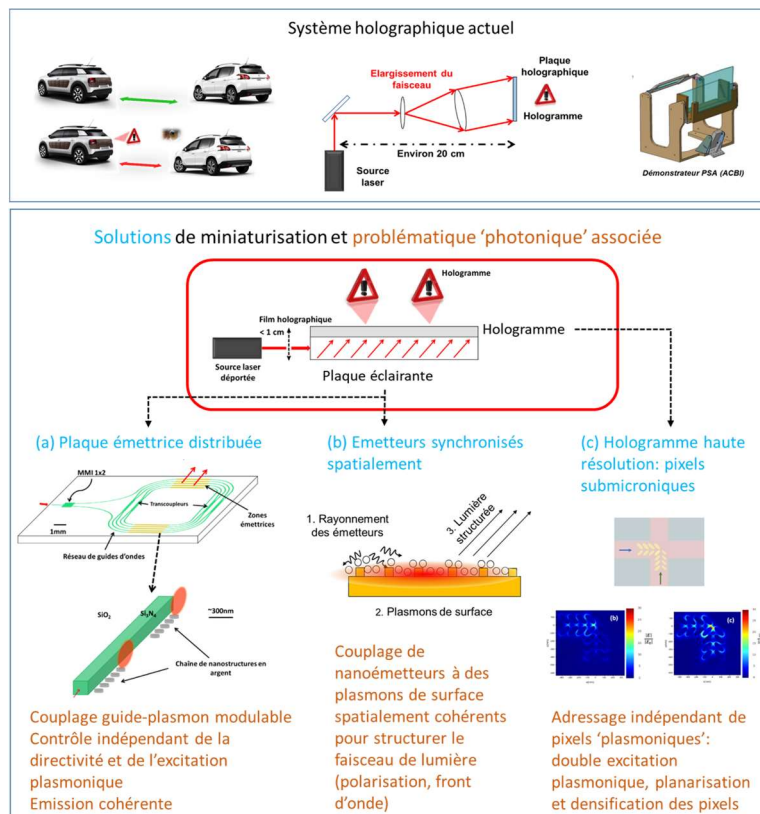


Figure 3. Haut : illustration de systèmes holographiques pour l'automobile à base d'optique réfractive. Bas : solutions de miniaturisation ou d'amélioration de ces systèmes, et problématique photonique associée : (a) plaque émettrice composée d'un répartiteur de lumière à guides d'onde couplés à des réseaux de chaînes plasmoniques en série pour diffracter uniformément la lumière cohérente dans une direction donnée ; (b) source de lumière à polarisation et/ou front d'onde contrôlé, basée sur le couplage préférentiel de nanoémetteurs à des plasmons de surface spatialement cohérents ; (c) génération et adressage de pixels submicroniques basés sur l'excitation de plasmons localisés à l'intersection de guides d'onde.

Hologramme numérique reconfigurable : adressage individuel de pixels sub-longueurs d'onde

Aujourd'hui, les hologrammes reconfigurables sont réalisés à l'aide d'un modulateur spatial de lumière (SLM) reposant sur la technologie LCOS ayant des tailles de pixels limités à quelques micromètres. Cependant, réaliser un hologramme reconfigurable de haute qualité et avec un angle de vue important demande d'avoir des pixels de quelques centaines de nanomètres. Pour s'affranchir de cette limite, nous nous penchons sur un nouveau principe d'adressage, tout-optique, et basé sur l'optique guidée sur silicium pour de potentiels futurs pixels. La structure est composée d'une matrice de guides d'onde monomodes rectangulaires en silicium. Cette matrice est encapsulée dans du SiO₂. Chaque intersection, de taille sub-micrométrique, est fonctionnalisée par des chaînes de nanoparticules d'or elliptiques perpendiculaires situées sur leur surface où chaque couple de chaînes perpendiculaires forme la base d'un pixel. Les modes TE propagés dans ces guides (de hauteur $h=220$ nm et de largeur $l=500$ nm) peuvent se coupler aux chaînes plasmoniques et générer des points chauds sub-longueurs d'onde sur certaines nanoparticules. **Un pixel est adressé uniquement si une des nanoparticules est excitée par deux signaux injectés par deux guides perpendiculaires.** En variant la taille et la forme des nanoparticules de chaque intersection, les pixels peuvent être adressés indépendamment. Le concept a été validé numériquement pour différentes formes de nanostructures plasmoniques, comme illustré sur la Figure 3 dans le cas de structures en chevron. L'étape suivante consistera à exploiter cette concentration sub-micronique de la lumière pour modifier localement les propriétés optiques de la surface (matériau à changement de phase, cristal liquide, piégeage optique, ...).

4. Conclusion

La nanophotonique, qui par définition utilise des quantités réduites de matière, est particulièrement bien positionnée pour offrir des solutions versatiles, compactes et légères aux systèmes de mobilité. Le caractère discrétisé des nanostructures photoniques ou plasmoniques permet la réalisation de fonctions optiques façonnées à la demande. Les technologies de fabrication évoluent simultanément pour permettre d'utiliser ces nouveaux nanoobjets à l'échelle macroscopique. La nanophotonique à grande échelle enrichit ainsi les fonctionnalités des systèmes de visualisation, pour des applications qui couvrent non seulement les transports mais aussi le secteur de la défense ou de la santé. Si les démonstrateurs actuels se basent sur des nanostructures plasmoniques, les concepts peuvent être généralisés ou transposés à d'autres filières, comme les métasurfaces à base de nanorésonateurs diélectriques à haut indice et conduire ainsi à un panel encore plus large de fonctions optiques intégrées et planarisées.

Les travaux présentés dans cet article ont été en partie soutenus par le réseau national des centrales de technologie RENATECH, par l'agence française de l'innovation de la Défense, et par l'OpenLab PhOVéA.

Références

- [1] R. Carminati *et al*, Photoniques 111, 47-50 (2022)
- [2] H. Bertin *et al.*, ACS Photonics **5**, 2661–2668 (2018)
- [3] G. Cardoso *et al*, Microelectron. Eng. **258**, 111755 (2022)
- [4] M. Février *et al*, Nano Lett. **12**, 1032–1037 (2012)
- [5] G. Magno *et al*, Opt. Express **30**, 5835-5847 (2022)
- [6] D. Schanne *et al.*, Phys. Rev. Appl. **14**, 064077 (2020)
- [7] T. Laurent *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, 187492 (2015)