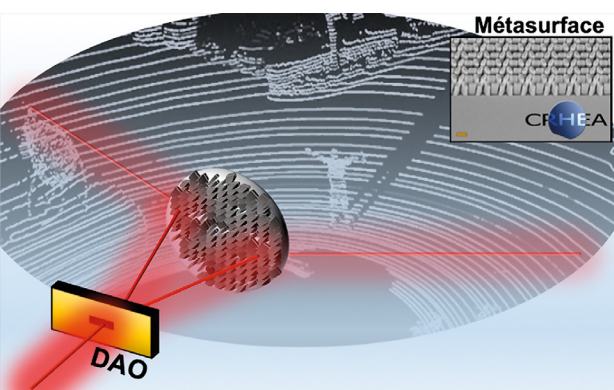


# LES MÉTASURFACES OPTIQUES POUR LES LIDARS À LARGE CHAMP ET À HAUTE CADENCE D'IMAGERIE

Renato JULIANO MARTINS<sup>1</sup>, Emil MARINOV<sup>1</sup>, M. Aziz Ben YOUSSEF<sup>1</sup>, Christina KYROU<sup>1</sup>, Patrice GENEVET<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Université Côte d'Azur, CNRS, CRHEA, rue Bernard Gregory, Sophia Antipolis 06560 Valbonne, France

\*pg@crhea.cnrs.fr



**Le déploiement de solutions d'imageries avancées, susceptibles de fournir aux systèmes robotiques une vision équivalente à celle de l'homme, nécessite l'acquisition rapide et précise d'images avec un large champ de vision. Etant particulièrement adaptées pour les systèmes optiques à grand champ, les métasurfaces offrent de nouvelles perspectives d'intégration et d'optimisation pour réaliser des LiDARs compacts, à bas coûts de production et à hautes performances.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202211541>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

**L**es systèmes mobiles autonomes tels que les voitures, les robots ou les drones utilisent plusieurs capteurs pour acquérir de l'information sur leur environnement, leur permettant ainsi de définir leur position, leur vitesse et leur accélération en temps réel. Au centre de l'automatisation des dispositifs et processus industriels, ces systèmes de mesures tels que le RADAR, les scanners à lumière structurée et les télémètres laser ou LiDAR, permettent d'acquérir des images 3D. Les LiDARs conventionnels reposent sur la mesure du temps de vol (TdV). Le principe de cette mesure est d'envoyer des pulses lasers vers un objet

réfléchissant distant, afin de mesurer le temps que met l'impulsion lumineuse pour parcourir la distance aller-retour entre la source et l'objet. En connaissant ce temps de vol, on peut calculer la distance des objets environnants. Pour reconstruire une image, il est donc nécessaire de balayer le faisceau pulsé sur un champ de vue le plus large possible. Les travaux sur les métasurfaces (MS) [1] et plus particulièrement ceux sur l'imagerie menés au Centre de Recherche sur l'Hétéro-Epitaxie et ses Applications (CRHEA, France), s'inscrivent dans cette logique. Les MS sont des composants photoniques capables de manipuler toutes les propriétés de la lumière telles que l'amplitude, la

phase, fréquence et/ou la polarisation et qui n'ont cessé, au cours de la dernière décennie, de susciter l'intérêt de l'ensemble de la communauté photonique. Ce sont des composants optiques ultra fins, constitués à partir d'agencements d'objet diffusants (ou méta-atomes) ayant des tailles et des périodicités inférieures à la longueur d'onde. Les fonctionnalités nouvelles apportées par les MS peuvent permettre de développer de nouvelles technologies photoniques, aux services des applications d'imageries telles que le LiDAR [2]. Dans nos recherches, nous exploitons ces propriétés optiques pour développer un système d'imagerie LiDAR ultra rapide et à large champ de vue [3].

## DÉFLECTION LIDAR À L'AIDE DE MÉTASURFACES

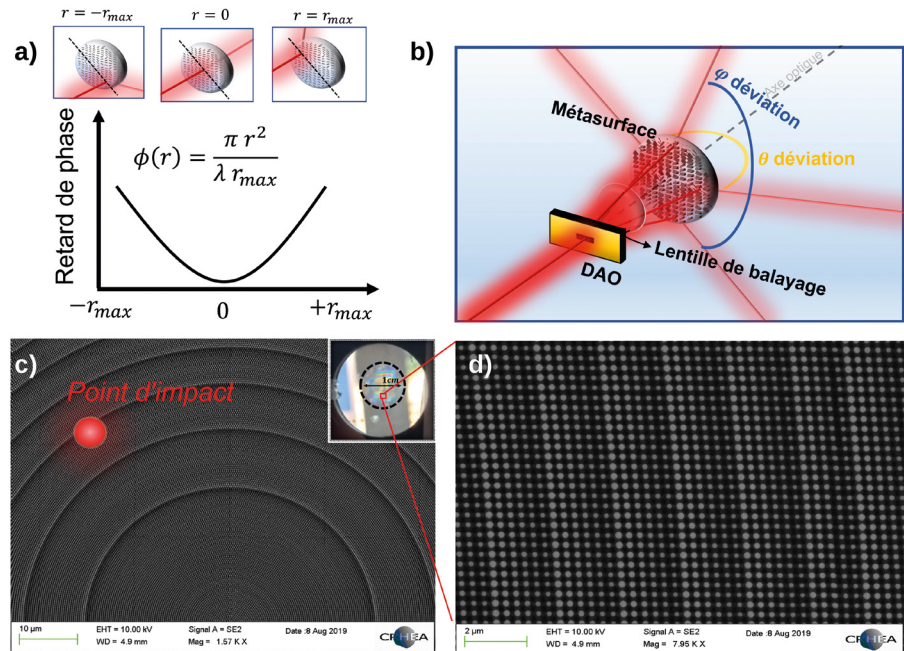
Plusieurs mécanismes permettent de contrôler le front d'onde d'un faisceau incident avec des métasurfaces. Les trois mécanismes connus actuellement utilisent i) la phase géométrique de Pancharatnam-Berry [4], ii) les nanostructures à indice de réfraction effectif [5], iii) la réponse résonnante des nanostructures conçues pour fonctionner dans un régime contraint par des propriétés dites de « photonique topologique » particulières [6]. De façon générale, les structures prennent la forme de piliers nanostructurés ayant des paramètres géométriques et des arrangements périodiques de taille sous-longueur d'onde. Le principe de modulation de phase, par indice effectif par exemple, se base sur le retard de phase induit par la propagation de l'onde incidente dans le méta-atome. Si l'on considère un pilier fait à partir d'un matériau d'indice optique élevé, plus son diamètre est grand, plus son indice de réfraction effectif est important et plus le retard de phase induit est élevé. En modifiant progressivement l'indice de réfraction des éléments adjacents, *i.e.* en modifiant le diamètre des nanostructures, on peut établir un retard de phase qui varie entre  $0-2\pi$ , permettant ainsi de façonner le front d'onde arbitrairement et localement. Pour définir la fonctionnalité réalisée par la métasurface, il suffit de choisir et de positionner les méta-atomes de sorte à former un profil de retard de phase adapté à la réponse optique voulue. Par exemple, pour focaliser la lumière à la façon d'une lentille classique, le profil de phase varie spatialement entraînant un retard hyperbolique. Ou encore, en distribuant les différents éléments pour induire un retard variant graduellement *-i.e.* linéairement- entre 0 et  $2\pi$ , la modification locale du front d'onde permet de dévier un faisceau incident avec un angle proportionnel au gradient de retard de phase

local. Cette méthode permet d'obtenir un déflecteur de faisceau simple, qui dévie le faisceau à un seul angle fixe. Toutefois, en construisant un profil de phase présentant une variation linéaire du gradient de phase dans la direction radiale, l'angle de déviation du faisceau de sortie sera défini par le point d'impact du faisceau incident sur la métasurface (Fig 1a-c). En effet, en fonction du point d'impact du faisceau laser sur la métasurface, un gradient de retard différent sera appliqué au front d'onde. Le profil de phase correspondant est donc un profil parabolique, et l'effet induit sur le faisceau incident est une augmentation de la déviation du faisceau de sortie à mesure que le faisceau se rapproche des bords du composant MS, pour explorer des angles de déviation compris entre  $0^\circ$  au centre et  $\pm 75^\circ$  sur les bords du composant. La fabrication d'une

telle métasurface se fait à l'aide de processus de nanofabrication, incluant une étape de gravure des nanostructures (Fig 1d) sur un substrat de nitrure de Gallium.

## ARCHITECTURE LIDAR ET PERFORMANCES

La métasurface utilisée dans ce dispositif LiDAR est passive, c'est-à-dire qu'elle ne permet pas à elle seule de réaliser un balayage du champ de vue. De ce fait, nous avons placé en amont un dispositif actif de balayage de faisceau laser qui nous permet d'obtenir différents points d'impacts sur la MS. Le résultat, en sortie de la MS, offre un balayage du milieu environnant sur une très large plage angulaire ( $\approx \pm 75^\circ$ ). Pour obtenir une image 3D, il est nécessaire de balayer le faisceau horizontalement et verticalement sur la MS, permettant ainsi de défléchir la lumière suivant les



**Figure 1.** Déflecteur de faisceau de métasurface. a) Fonction de phase correspondant à une métasurface capable de défléchir la lumière à différents angles. Le profil de phase parabolique permet de dévier le faisceau à différents angles, en fonction du point d'impact sur le composant. b) Concept expérimental du système LiDAR utilisant un déflecteur de faisceau rapide (DAO) et une lentille de balayage pointant le faisceau incident sur une zone spécifique de la métasurface, déviant ainsi la lumière dans des angles radiaux et azimutaux. c) Imagerie MEB de l'échantillon - insert - Image de l'échantillon fabriqué. d) MEB détaillé montrant les piliers de taille variable de tailles variables dans chacune des zones de Fresnel.

angles d'azimut et d'élévation ( $\theta$  et  $\phi$ ). Ce balayage 2D du faisceau est réalisé en cascade perpendiculairement deux DAO. La résolution angulaire de ce système est définie par un compromis entre la taille du spot laser incident et le diamètre de la métasurface. Le dispositif DAOs est construit autour d'un milieu solide transparent qui supporte la propagation d'ondes élastiques se propageant à des fréquences de quelques centaines de MHz, et que l'on ajuste à l'aide d'une valeur de tension appliquée au dispositif. Les ondes élastiques permettent de diffracter la lumière à différents angles et à très haute fréquence (de l'ordre du MHz). Ce type de composant offre des fréquences de balayage point-par-point de l'ordre de ~6 MHz, mais présente néanmoins un très faible champ de vue, de l'ordre de  $2^\circ$  par  $2^\circ$  et ne permet pas de satisfaire

les exigences de l'industrie LiDAR. La métasurface sert donc à élargir le champ de vue à  $150^\circ$  par  $150^\circ$ , tout en profitant de la haute fréquence de balayage du DAO. Cette combinaison de composants permet d'acquérir des images LiDAR 3D fortement résolues avec une vitesse d'imagerie de l'ordre de la centaine voire des milliers d'images par seconde, voir vidéos disponibles sur notre Youtube channel <https://www.youtube.com/channel/UCmezaBH-xOxMjqk3bvqnlAg>. Pour piloter électroniquement l'ensemble du système LiDAR, nous avons utilisé un système PXIe synchronisé qui se compose de différents contrôleurs intégrés dans un châssis. Les modules utilisés pour le développement du LiDAR présenté ici sont : (i) un contrôleur - contenant la partie logique (processeur, mémoire RAM, disque dur), (ii) deux cartes

de générateur de fréquence (FGEN) - une servant à contrôler le balayage, et l'autre pour contrôler le laser, et (iii) un oscilloscope (SCOPE) doté d'un convertisseur analogique-numérique (ADC) pour extraire les données de tension du photodétecteur. Un schéma d'architecture détaillé résumant les caractéristiques et les modèles de tous les éléments du LiDAR est fourni à la Fig 2a). Le prototype développé au laboratoire utilise comme source lumineuse une diode laser émettant dans le visible (633nm). Cette longueur d'onde n'est généralement pas utilisée dans les systèmes LiDAR commerciaux, du fait de la forte absorption atmosphérique et du bruit de fond important. Cependant, elle est très utile pour réaliser un démonstrateur car elle permet de directement visualiser la déviation du faisceau à la ●●●

## Nobel-winning physics

from the *Journal de Physique* digital archives



Researchers seek the highest quality physics regardless of where or when it was published. The *Journal de Physique* archives are full of the biggest names in physics including Curie, Planck, Rutherford, Becquerel and, more recently, Giorgio Parisi. This bi-lingual e-resource spans 1872-1997 – undoubtedly, one of the most exciting and influential periods in physics research.

- More than 300,000 pages in over 49,500 articles digitised to the highest quality
- Unique English and French content
- Available for outright purchase or as a subscription
- Fairly priced with flexible solutions

The *Journal de Physique* was created in 1872 by Charles d'Almeida "to invigorate teaching, to stimulate the spirit of research and provoke new discoveries". Pioneering physicists Marie, Pierre and Irène Curie published several articles in the journal *Le Radium* and these remain preserved within the *Journal de Physique* archives.

### Why are archives important?

- They provide historical context for current research
- They inspire researchers to explore new research ideas
- They broaden the resources available to library users
- They secure academic knowledge for future generations

**"There is undoubtedly educational value to reading 'legacy papers', and this holds true for articles written in any language."**

Gaia Donati, *Discovery through multi-lingual science archives*, Research Information

We believe that preserving legacy journal content and ensuring it remains discoverable for future generations is vital to the advancement of science. Visit *our archives* to read some original articles and modern commentaries.

“*Nothing in life is to be feared, it is only to be understood.*”



Marie Curie

Journal  
de Physique  
archives

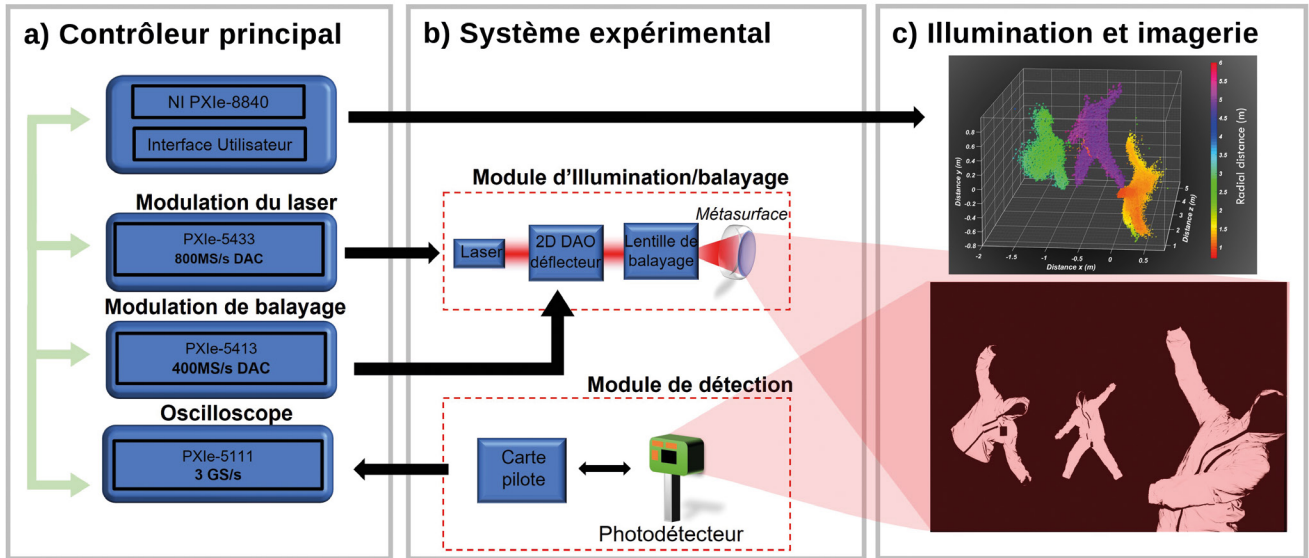
### For more information

Contact:

Anne Simoneau,  
Director of Business Development  
[anne.simoneau@edpsciences.org](mailto:anne.simoneau@edpsciences.org)

Browse: [edpsciences.org/archives](https://edpsciences.org/archives)

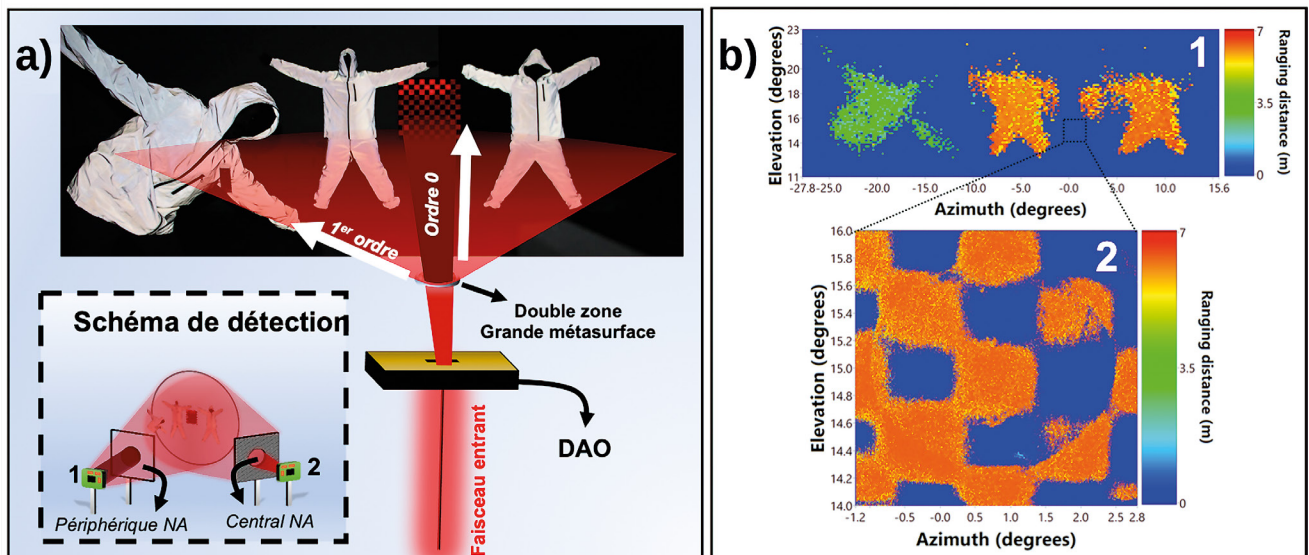




sortie de la MS. La distance maximale du démonstrateur LiDAR est donc limitée à la dizaine de mètres. En changeant la longueur d'onde des sources lumineuses du visible vers l'infrarouge (905 nm ou 1550nm) et en ajustant le design des MS à la bonne longueur d'onde, il est possible d'augmenter cette distance d'au moins un ordre de grandeur. Sur la Fig 2b) nous illustrons le concept expérimental du LiDAR développé dans notre laboratoire. Le détecteur utilisé pour cette démonstration est un « Single Photon Avalanche Photodiode » (SPAD), qui permet une détection de lumière ultra-sensible, atteignant

**Figure 2.** Schémas du chemin logique pour récupérer l'image de télémétrie. a) Un système PXI synchrone assisté par une interface utilisateur graphique dans LabView contrôle les différents modules pour effectuer diverses tâches. b) Les modules de balayage se composent d'un système de modulation laser et d'une modulation de balayage à 2 canaux pour créer respectivement des impulsions ToF uniques et des directions de balayage. Le module de détection est couplé à un module d'oscilloscope qui acquiert, stocke et récupère les données utilisées pour la reconstruction d'image comme illustré en c).

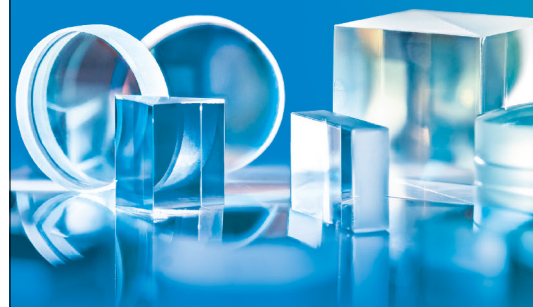
**Figure 3.** a) Schémas représentant une scène constituée de trois personnes positionnées à trois positions dans l'espace 3D, que l'on illumine avec deux faisceaux simultanément diffractés par la métasurface de façon à acquérir des images multizones. Les deux zones sont obtenues en scannant i) l'ordre zéro transmis par la métasurface fournissant ainsi une image hautement résolue mais avec un petit champ de vue et ii) le premier ordre de déflexion, moins résolue mais avec un grand champ de vue. Les deux images sont obtenues en simultanément en recueillant les signaux réfléchis depuis la scène (b) en utilisant deux détecteurs, chacun observant un champ de vue sélectionné à l'aide d'un filtre en transmission.



# OPTIQUES LASER ET SYSTÈMES OPTIQUES

POUR LES APPLICATIONS LASER  
HAUTE ENERGIE

- Lentilles sphériques et asphériques de précision
- Traitement IBS haute tenue au flux
- Expanseurs de faisceaux et systèmes optiques de focalisation
- Cristaux laser et non linéaires
- Cellules de Pockels et drivers haute tension



[www.eksmaoptics.com](http://www.eksmaoptics.com)

Représenté par:

**ARDOP**  
INDUSTRIE

05.40.25.05.36 | [sales@ardop.com](mailto:sales@ardop.com)  
[www.ardop.com](http://www.ardop.com)

le niveau du photon unique afin de détecter des niveaux de signaux de retour très faibles. Une image 3D obtenue avec notre système est présentée en Fig 2c). La flexibilité sur la réponse optique qu'offre l'approche MS nous permet par exemple de défléchir plusieurs faisceaux afin d'imager plusieurs zones simultanément. Dans cette démonstration, la métasurface est conçue de façon à ce qu'une partie de la lumière soit directement transmise, correspondant à l'ordre de diffraction zéro, et une deuxième partie soit défléchie à des angles variables définis comme indiqué précédemment en Fig 1. Le faisceau d'ordre zéro est utilisé pour obtenir des images fortement résolues, avec un champ de vue réduit. Le faisceau diffracté au premier ordre est utilisé pour identifier des objets d'intérêt sur un champ plus large (Fig3a). Les résultats obtenus avec ce système d'imagerie sont présentés en Fig 3b. Cette démonstration s'inspire de notre propre vision. En effet, la vision humaine dispose de plusieurs zones d'observations distinctes, avec une zone fortement résolue (ou zone de fovéale), ainsi qu'une zone périphérique faiblement résolue.

## CONCLUSION

Nous avons réalisé un système LiDAR à très hautes performances, notamment en termes de vitesse d'imagerie et de champ de vue. En comparaison des systèmes actuellement commercialisés, notre prototype est exempt de parties mobiles, telles que des moteurs rotatifs ou des pièces micromécaniques, ce qui augmente sa fiabilité et sa résistance aux

vibrations, ainsi qu'aux changements de l'environnement du dispositif. Parmi les améliorations à venir, en termes de choix des composants d'émission laser et de détection, nous envisageons d'intégrer l'ensemble du traitement de données sur une puce FPGA afin d'améliorer la vitesse d'imagerie. Malgré les performances très prometteuses de ce système, l'utilisation du défecteur acousto-optique utilisé comme module de balayage actif est une limitation majeure. Les DAO nécessitent des cristaux complexes, extrêmement coûteux, avec une électronique de contrôle lourde et volumineuse, et qui ne sont pas fabricables à grand volume. Afin de s'affranchir du modulateur externe DAO, nous travaillons actuellement sur le développement d'une seconde génération de système LiDAR qui met en jeu des « Métasurfaces Actives », avec lesquelles il est possible de dévier le faisceau en sortie de façon dynamique, *i.e.* directement avec la métasurface. Ce type de composant intégré permet de réduire la taille des systèmes LiDAR tout en garantissant d'excellentes performances. La démonstration d'un dispositif faisant usage de ces métasurfaces actives pourra avoir un impact majeur dans les industries qui cherchent une automatisation des systèmes robotiques ou des systèmes de production. On peut notamment penser aux industries automobile, robotique, logistique et du bâtiment qui attendent l'arrivée de capteurs LiDAR compacts, performants, intégrables à bas coût et exempts de pièces mécaniques pour atteindre des volumes et des niveaux d'automatisation plus élevés. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] N. Yu *et al.*, *Science* **334**, 333–337 (2011).
- [2] R.J. Martins *et al.* Metasurface-enhanced Light Detection and Ranging Technology. arXiv: 2204.04208 (2022)
- [3] I. Kim *et al.*, *Nat. Nanotechnol.* **16**, 508–524 (2021).
- [4] M.V. Berry, *Journal of Modern Optics* **34**, **11**, 1401-1407 (1987).
- [5] P. Lalanne and D. Lemerrier-Lalanne, *Journal of Modern Optics* **43** (10), 2063-2085 (1996)
- [6] Q. Song, M. Odeh, J. Zúñiga-Pérez, B. Kanté & P. Genevet, *Science* **373**, 1133–1137 (2021)