

## Summary.

Metasurfaces are an established class of devices based on the phenomenon of wave scattering on antennas with sizes comparable to the wavelength or smaller. They allow locally controlling various parameters of waves such as their amplitude, phase, and polarization separately or integrating multiple functions into one device. Metasurfaces were developed for waves of different nature and scale, and in particular, for the optical domain (from 100 nm to 1 mm). Although in optics there are many metallic metasurface implementations that are the subject of plasmonics, most metasurfaces suggested for practical applications are all-dielectric due to their lower absorption losses. For example, there are metasurfaces proposed for integrated devices such as microscopes, spectrometers, camera objectives, or holograms for optical encryption.

One of the main challenges related to optical metasurfaces and, in particular, to the once operating in visible (from 400 nm to 800 nm) and near-infrared (from 800 nm to 2  $\mu$ m) range is their fabrication: the scale of nano-structuring is quite challenging for current technologies. Dielectric metasurfaces are mostly made of high refractive index dielectrics with low absorption losses, the choice of such materials in the visible and near-infrared ranges for metasurfaces production is limited, so, there is an active search for more suited materials. Moreover, even with the existing materials and techniques, the fabrication of large-scale metasurfaces is an important issue that is to be solved for metasurfaces potential industrialization and mass-production. Besides, as metasurfaces in optics begin to be integrated into the devices and setups, there are still many fields that could profit from using them.

The first part of this thesis is devoted to expanding the range of metasurfaces applications: we design and manufacture a polarization-independent broadband efficient metalens aiming at improving the properties of an integrated device: photodetector arrays. We optimize the design of the lens for the particular sizes and geometry, fabricate it with CMOS-compatible technology, and characterize it with optical microscopy. Our results show that metasurface transmits and focuses light with high efficiency ensuring the high intensity enhancement in the focal spot. Produced metalens can be used for silicon photomultipliers - efficient and ultrafast single-photon detectors. By producing highly confined optical fields it has a potential for improving single-photon detection time resolution and photodetection efficiency.

The second part responds to the quest for improved fabrication techniques and new materials: we demonstrate a novel idea of using photosensitive material  $As_2S_3$  for all-dielectric efficient metasurfaces design and production. We implement it for two different designs, fabricate them with electron-beam lithography, and characterized them with several techniques: with the conventional spectroscopic transmittance measurement, and a phase microscopy technique performed in a broad wavelength range. In both cases, our results are in an excellent match with numerical simulations. We also show numerically, that using this technology would allow creating an optical component with high transmission and sufficient phase-variation. With our method, the phase profile required for a certain application can be recorded on the uniform metasurface as a post-fabrication step which is advantageous for the mass-production of integrated devices.

Overall, we propose new avenues in the field of metasurfaces with new materials ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), fabrication, and characterization methods. Finally, we suggest a metasurface design fulfilling requirements for a new application: improving the operation of photodetector arrays, and in particular, silicon photomultipliers. Our results promote metasurfaces mass-production, simplification, and compactness and contribute to their integration into more complex devices.

## Résumé.

Les métasurfaces sont une classe établie de dispositifs basés sur le phénomène de diffusion des ondes par les antennes. Elles permettent de contrôler localement divers paramètres d'ondes tels que leur amplitude, leur phase et leur polarisation. Nous nous concentrons sur les structures opérant des ondes électromagnétiques de gamme de longueurs d'onde visible (de 400 nm à 800 nm) et proche infrarouge (de 800 nm à 2  $\mu\text{m}$ ). Même si dans ces gammes spectrales il existe de nombreux exemples de métasurface métallique (domaine de la plasmonique), la plupart des métasurfaces suggérées pour des applications pratiques sont entièrement diélectriques en raison de leurs pertes par absorption plus faibles. Par exemple, il existe des métasurfaces proposées pour des dispositifs intégrés tels que des microscopes, des spectromètres, des objectifs de caméra ou des hologrammes pour le cryptage optique.

L'une des principales difficultés liées aux métasurfaces optiques est leur fabrication : l'échelle et la précision requise pour la nanostructuration est possible avec les techniques actuelles mais demeure un challenge du fait de plusieurs difficultés. Tout d'abord, les métasurfaces diélectriques sont principalement constituées de matériaux diélectriques à indice de réfraction élevé associés de faibles pertes par absorption. Dans le domaine visible, le nombre de matériaux présentant ces propriétés étant limités, il y a donc une recherche ouverte pour les matériaux appropriés. De plus, même avec les matériaux et les techniques existants, la fabrication de métasurfaces à grande échelle est un problème qui doit être résolu pour compatibilité avec une production de masse. En outre, alors que les métasurfaces en optique commencent à être intégrées dans les appareils et les systèmes optiques, de nombreux domaines pourraient encore profiter de leur utilisation.

Dans la première partie de cette thèse, nous proposons une nouvelle application de métasurfaces : nous réalisons une méta-lentille à large bande passante spectrale, indépendante de la polarisation, compacte et efficace visant à améliorer les propriétés d'un autre dispositif intégré : les matrices de photodétecteurs. Nous optimisons la conception d'une lentille pour les tailles et des géométries particulières, la fabriquons et la caractérisons par microscopie optique. Nos résultats montrent que la métasurface transmet et focalise la lumière avec un rendement élevé assurant une haute distribution d'intensité dans le point focal.

La deuxième partie répond à la recherche de techniques de fabrication et de matériaux améliorés : nous démontrons une nouvelle idée d'utilisation des couches de matériau photosensible à base d' $\text{As}_2\text{S}_3$  pour la conception et la production de métasurfaces efficaces. Nous les avons implémentées pour deux conceptions différentes, les avons fabriquées avec une technique de lithographie par faisceau d'électrons et les avons caractérisées avec plusieurs techniques. Nous montrons aussi numériquement que l'utilisation de cette technologie permettrait de créer un composant optique à haut rendement et à

variation de phase suffisante. Ces méthodes permettent de fabriquer des métasurfaces uniformes et d'enregistrer la fonctionnalité souhaitée en tant qu'étape de post-fabrication, en la combinant avec des méthodes de fabrication à grande échelle à faible coût de surfaces uniformes.

En résumé, nous avons proposé de nouveaux concepts pour les métasurfaces avec de nouveaux matériaux ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), des méthodes et de caractérisation originale. Enfin, nous avons proposé une méthode de conception de métalentille répondant aux exigences d'une nouvelle application : l'amélioration du fonctionnement des réseaux de photodétecteurs, et en particulier des photomultiplicateurs en silicium. Nos résultats constituent une avancée vers la production de masse, la simplification et la compacité de ces composants et contribuent à leur intégration dans des dispositifs plus complexes tels que des matrices de détecteurs.