

Soutenance de thèse

Elie COBO soutiendra sa thèse de doctorat préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA OLIMPES et intitulée «*Capteur d'images CMOS à sensibilité améliorée dans le proche infrarouge par des nanostructures optiques*»

Le 25 mai 2022 à 10h00, Salle des thèses - ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

M. Jean-Luc PELOUARD	Directeur de recherche C2N	Directeur de thèse
M. Fabien MANDORLO	Maître de conférences INSA Lyon	Rapporteur
M. Gilles LERONDEL	Professeur Université de Technologie de Troyes	Rapporteur
M. Gabriel MUGNY	Ingénieur de recherche STMicroelectronics	
M. Sébastien MASSENOT	Maître de conférences ISAE-SUPAERO	Co-directeur de thèse
Mme Isabelle SCHANEN	Professeure Grenoble INP-UGA	

Résumé : Les capteurs d'images occupent presque la moitié du marché des composants optoélectroniques avec une taille de \$19.1 milliards. Leurs performances et leur faible coût de production en font la technologie majoritaire pour l'imagerie dans le visible (400 nm – 700 nm). D'un autre côté, l'imagerie dans le proche infrarouge (700 nm – 1400 nm) est aussi en pleine croissance. Appliquée dans le domaine médical elle permet la visualisation d'agent fluorescent *in vivo*, en temps réel et de façon non invasive pour aider à la chirurgie, à l'étude de maladies et au diagnostic. L'imagerie médicale proche infrarouge représente \$216 million de dollars en 2021 avec une projection de \$405 million de dollars en 2028. Mais en dehors du médical, les applications du proche infrarouge sont aussi nombreuses : Le suivi du regard, la reconnaissance gestuelle et faciale, une meilleure visibilité dans la nuit, sont autant de fonctionnalités que l'on peut mettre à profit pour une vision assistée par ordinateur plus performante, si bien qu'il est prévu une augmentation annuelle du marché des détecteurs proche infrarouge de presque 10% de 2020 et 2025. Malheureusement, la croissance conjointe du marché des capteurs d'images CMOS et du marché de l'imagerie dans le proche infrarouge se heurte à une problématique de taille : les imageurs fabriqués par le procédé CMOS sont conçus à partir de silicium qui est certes un très bon candidat pour l'absorption visible mais beaucoup moins pour les longueurs d'onde dépassant les 800 nm. En effet, si seulement quelques centaines de nanomètres de silicium suffisent pour absorber la lumière à 400 nm, il faut compter des dizaines voire des centaines de micromètres pour les longueurs d'onde supérieures à 800 nm. Pour faire face à cette problématique, les fondeurs ont commencé à proposer des capteurs avec une zone sensible plus profonde, passant par exemple de 3 μm d'épaisseur optimisée pour le visible à 12 μm . Si ce procédé permet effectivement une amélioration de la sensibilité, il détériore par la même occasion la résolution spatiale de l'imageur induite par l'augmentation de la diaphonie. D'autres solutions mettant en jeu des pièges à photons notamment par la texturation du silicium sont récemment investiguées mais nécessitent l'ajout de nouvelles étapes de fabrication au procédé standard. Nous avons démontré dans ces travaux, par simulations opto-électriques, la conception d'un réseau diffractant directement à partir de la couche de fabrication de la grille des transistors en poly-silicium, déjà présente dans la fabrication standard d'un capteur d'image CMOS. Ce réseau a la double fonction d'augmenter la longueur de propagation effective dans le silicium et de couche antireflet. Cette implémentation d'un réseau dans le capteur d'image avec l'ajout de tranchées d'isolation profondes pour confiner à l'intérieur du pixel la lumière diffractée, a permis une amélioration relative de l'efficacité quantique externe de 35.5% à une longueur d'onde de 850 nm ainsi qu'une amélioration de la diaphonie de 6.9%. Cette architecture avec une épaisseur active de 3 μm permet d'obtenir une amélioration équivalente à celle d'une augmentation de la couche active par un facteur 3 sans détérioration de la diaphonie qui vient avec. Pour aller plus loin, nous avons étudié l'intégration de ce réseau conçu à partir de la couche des grilles de transistors à un capteur d'images CMOS à illumination par la face arrière. Ainsi en utilisant le réseau non plus en transmission mais en réflexion, nous avons montré une significative amélioration de l'absorption dans le proche infrarouge sur une large bande spectrale (de

650 nm à 1100 nm). En effet, l'absorption d'un capteur d'image avec miroir en face arrière conçu à partir d'un réseau en poly-silicium et de la première couche de métallisation en aluminium est plus que deux fois supérieure à l'absorption d'un capteur d'images standard à une longueur d'onde de 850 nm.

Mots-clés : Infrarouge, Nano-optique, CMOS, Réseau, Diffraction, Qualité d'image

Summary: The advantages of CMOS image sensors (low power consumption, low manufacturing cost, high read rate, pixel-by-pixel addressing in particular) have allowed them to address many applications, either in the general public (smartphones ...) or in civilian or military scientific fields (spatial imaging, 3D imaging, laser ecartometry for example). For a conventional frontside image sensor, each pixel consists in a silicon photodiode lying under a metallo-dielectric stack used for bringing and extracting electrical signals. This results in two limitations: each of these pixels is encumbered by metallizations that can potentially disturb / degrade the collection of incident photons and the low quantum efficiency of silicon in the near infrared will also strongly limit the performance of photodiodes in this band having several potential applications, either in the medical or military field. The aim of this thesis is to address the two aspects that are the photons collection and the optical response of CMOS image sensor photodiode in the visible and the near infrared by proposing alternative solutions of performance improvement based on of sub-wavelength optical nanostructures. By shaping the electromagnetic field distribution within the pixel, these allow (1) to realize at lower cost the usual functions of photons collection and filtering, (2) to exalt the response of the photodiodes and (3) introduce new features such as polarization sensitivity. Thus, this project will concern as well the problems of collection as those concerning the improvement of the responsivity of the photodiode. These two aspects are directly related to the decrease of the volume of photodetection (while preserving a maximum absorption), significant of the improvement in noise or crosstalk performance of image sensors. The collection structures targeted in this project will be nanostructured planar microlenses and the ideal phase profile will be realized using an effective index gradient medium. These lenses, achievable in one lithography step, will be potentially adaptable to any type of pixel (spherical or cylindrical microlenses, for example). The exaltation of the response of the photodiode will require the joint design of a silicon detector coupled to an optical nanoresonator structure. The proof of this concept will be tested in particular on a SOI (Silicon On Insulator) type substrate which makes it possible to control the detector parameters. These last structures of exaltation will be especially intended for the near infrared spectral band (800 nm-1100 nm) where the silicon is the least efficient in terms of internal quantum efficiency and where the constraints of spatial resolution for the lithographies can be released.

Keywords: CMOS, Nano-optics, Infrared, Grating, Diffraction, Image quality