

# BLACK SILICON ET IA POUR LA VISION À BAS NIVEAU DE LUMIÈRE

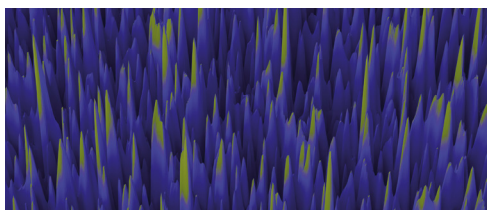
Esteban MONSALVO<sup>1,2</sup>, Léo RUEFF<sup>1,3</sup>, François ATTEIA<sup>1</sup>, Ludovic ESCOUBAS<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 3L-OPTRONICS, Marseille, France

<sup>2</sup> Aix Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, IM2NP, Marseille, France

<sup>3</sup> Aix Marseille Univ, Centrale Méditerranée, CNRS, Institut Fresnel, Marseille, France

\*ludovic.escoubas@3l-optronics.com



<https://doi.org/10.1051/photon/202613846>

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.

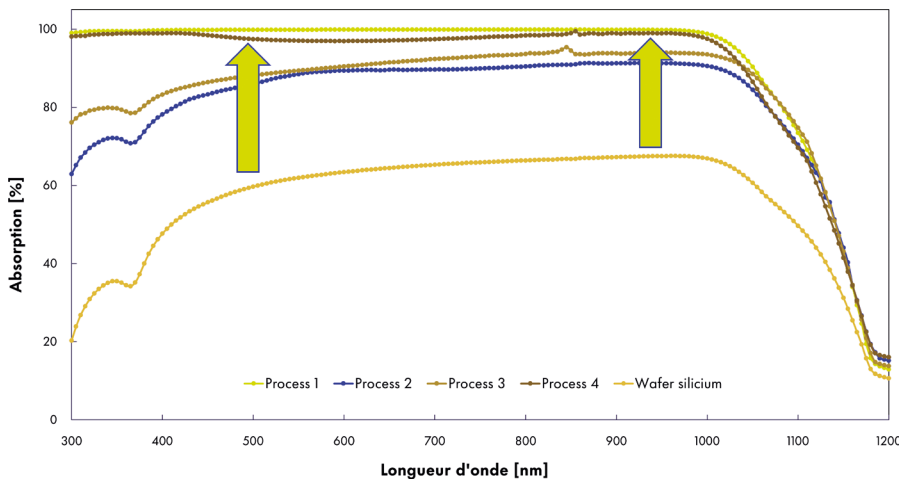
**La texturation de surface du silicium, sous forme de Black Silicon, couplée à du traitement d'images par IA, est utilisée pour pousser les performances des imageurs en silicium et permettre la vision numérique à bas niveau de lumière. Dans cet article, nous montrons comment le Black Silicon appliqué aux imageurs permet de mieux capter le spectre du visible jusqu'au proche infrarouge. L'article décrit les résultats de texturation Black Silicon, de modélisation et de traitement d'images par réseaux de neurones pour réhausser et débruiter en vision à bas niveau de lumière.**

**L**a vision de nuit ou plus généralement la vision à bas niveau de lumière repose sur un ensemble de technologies plus ou moins anciennes plus particulièrement développées pour le domaine de la défense. On peut citer entre autres les jumelles de vision de nuit qui utilisent un intensificateur de lumière mais restent analogiques, sans possibilité de transmission des images obtenues (seul le porteur des jumelles voit les images). Elles équipent une grande partie des forces armées de nos jours. Les détecteurs à base de matériaux semiconducteurs III-V tels que l'In-GaAs permettent de réaliser des capteurs d'images fonctionnant dans le SWIR (Short Wave InfraRed – entre 1

et 2 microns de longueur d'onde). Les détecteurs à base de HgCdTe sont, quant à eux, sensibles dans l'infrarouge thermique dans les bandes 3 – 5 microns (MWIR – Medium Wave InfraRed) et 8 - 12 microns (LWIR – Long Wave InfraRed). Ces technologies militaires très performantes restent onéreuses car complexes à mettre en œuvre industriellement et souffrent également de résolutions d'images faibles. C'est ce qui explique pourquoi elles restent principalement utilisées pour la défense et pour le spatial. Les matrices de microbolomètres (membranes sensibles de type MEMS – Micro-ElectroMechanical Systems) permettent aussi de réaliser de l'imagerie dans l'infrarouge thermique, à moindre coût, mais souffrent également d'une faible

résolution. Une partie de ces technologies trouve aussi des applications dans le domaine civil, par exemple dans le secteur automobile pour les microbolomètres avec l'ADAS (Advanced Driver Assistance System).

L'industrie microélectronique, avec des acteurs majeurs comme Samsung, Sony, STMicroelectronics, TSMC, a développé depuis le début des années 2000 des imageurs à base de silicium en technologie CMOS. Ils présentent aujourd'hui les avantages d'une très grande résolution (plus de 200 Mpixels avec des tailles de pixels submicroniques) et de coûts de fabrication faibles et fiabilisés en raison de leur production en volume par exemple pour l'industrie du téléphone mobile avec plus d'1,3 milliards de téléphones vendus par an,



**Figure 1.** Courbes d'absorption spectrale du black silicon sur wafer avec 4 jeux de paramètres de process et comparaison à l'absorption d'un wafer de silicium nu [2].

comprenant chacun plusieurs imageurs en silicium.

Dans cet article, nous expliquons comment il est possible de donner des capacités de vision à bas niveau de lumière à des imageurs CMOS en silicium pour répondre à des besoins dans les domaines de la défense mais aussi civils dans l'automobile, le spatial, l'industrie, le médical, le scientifique, ...

### LE BLACK SILICON : L'ANTIREFLET ULTIME

Le Black Silicon (BS) est obtenu par une texturation aléatoire de la surface du silicium. La littérature est extrêmement fournie sur le BS car il peut être obtenu par différents procédés :

- tirs lasers dans une vapeur soufrée, lors de sa découverte, il y a plus de 25 ans, par l'équipe d'Eric Mazur à l'Université d'Harvard [1]
- gravure chimique humide avec catalyseur métallique
- gravure sèche par plasma à basse température ou même à température ambiante.

Chaque procédé conduit à un BS dont les nanostructures diffèrent en termes de morphologie, de densité et de caractéristiques géométriques. Du point de vue des propriétés optiques, le BS est un antireflet qui se comporte comme une couche homogène d'indice de réfraction graduellement

croissant entre celui de l'air et celui du silicium. Une de ses caractéristiques les plus importantes est son caractère aléatoire ce qui donne à cet antireflet des performances exceptionnelles :

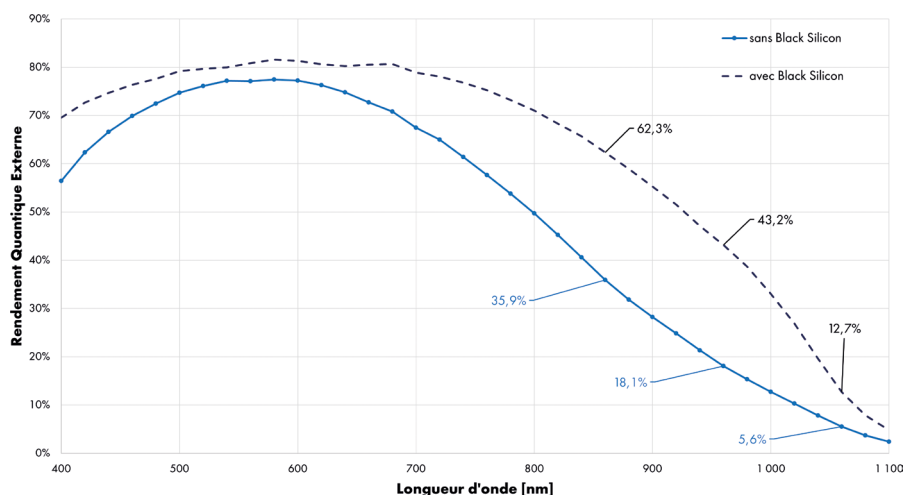
- à la fois efficace (généralement en dessous du pourcentage de réflexion) sur une très large gamme de longueurs d'onde : du visible au proche infrarouge (Near InfraRed – NIR et même jusqu'au SWIR, MWIR et LWIR en adaptant les tailles des nanostructures)
- et présentant une très large acceptation angulaire jusqu'à plus de 50° d'incidence.

Ce sont ces propriétés qui donnent au BS cette couleur noire si particulière, même en incidence ou en lumière diffuse.

Nous avons développé un procédé breveté qui permet de réaliser du BS par un procédé de gravure sèche par plasma. Ce procédé a été conçu pour pouvoir traiter industriellement à vitesse élevée de grandes surfaces de silicium - jusqu'à des wafers de 8 pouces dans nos installations et 12 pouces chez des fondeurs en microélectronique - sur lesquels ont préalablement été fabriqués des imageurs CMOS. Le traitement BS est exclusivement réalisé sur la matrice de pixels, en remplacement des couches antireflet qui sont habituellement déposées en surface. Il est optimisé en termes de paramètres statistiques des nanostructures (longueur de corrélation, distribution des hauteurs) pour que la performance de l'antireflet soit maximale pour les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge et pour toutes les incidences. Dans le NIR, le BS diffuse la lumière dans le volume du pixel maximisant ainsi l'interaction optique avec le matériau et donc son absorption. Ainsi l'ensemble de ces rayonnements est absorbé à plus de 99% dans le silicium (Figure 1).

La texturation de la surface du silicium par gravure plasma ●●●

**Figure 2.** Efficacité quantique d'un imageur CMOS traité black silicon comparée à celle de l'imageur identique de référence sans black silicon.



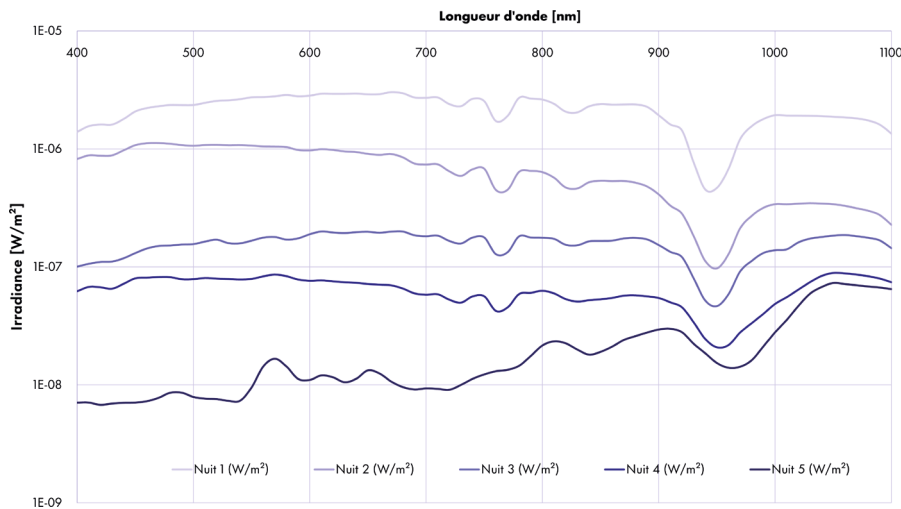


Figure 3. Courbes d'éclairement spectral en niveau de nuit [3]

peut cependant créer des défauts (défauts d'interfaces recombinants) pour les charges photogénérées par absorption des photons et conduire à augmenter les bruits électroniques dans les imageurs traités BS. Le courant d'obscurité de l'imageur peut ainsi être affecté négativement. Nous avons cependant développé un savoir-faire breveté qui permet de passiver électroniquement la surface du BS et de conserver un faible courant d'obscurité.

Le BS, en permettant une absorption maximale des photons dans le visible et le NIR et leur conversion particulièrement efficace en charges

collectées dans l'imageur, accroît très fortement l'efficacité quantique de l'imageur (Figure 2), jusqu'à plus de  $\times 2$  dans le NIR.

Comme le rayonnement de la nuit est constitué d'une partie du spectre visible, certes faible, et d'une partie relativement importante dans le NIR (Figure 3), le BS confère ainsi des capacités d'imagerie de nuit, à bas niveau de lumière, aux imageurs en silicium.

Dans la suite de l'article, nous précisons comment nous modélisons les

propriétés optoélectroniques du BS pour affiner les paramètres de procédé de réalisation. La dernière partie de l'article montrera comment il est possible de coupler aux imageurs des codes de rehaussement et de débruitage des images pour permettre l'imagerie à des niveaux de lumière encore plus bas.

### LA MODÉLISATION OPTOÉLECTRONIQUE : UNE MÉTHODE PRÉDICTIVE DES PERFORMANCES D'UN IMAGEUR

Au sein de l'industrie microélectronique, les coûts prohibitifs de développement et d'intégration de nouveaux procédés tendent à figer les architectures de pixels, privilégiant la rentabilité des lignes de production. Toutefois, cette contrainte stratégique se révèle comme un atout majeur dans la démocratisation du BS pour la vision à bas niveau de lumière puisqu'il ne nécessite aucune modification du procédé de fabrication de base des imageurs. Dans cette optique, la modélisation des performances optoélectroniques devient un levier primordial permettant d'évaluer la compatibilité technologique avec l'architecture du pixel et estimer le gain de performance apporté par la texturation de surface aléatoire du silicium.

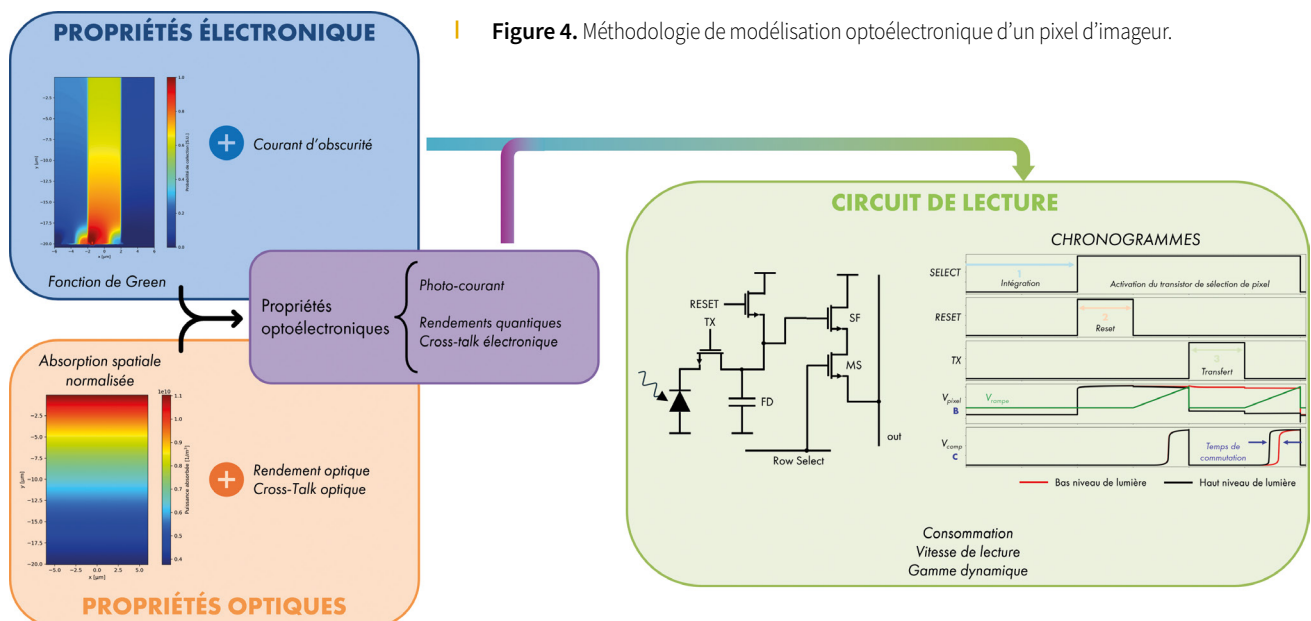
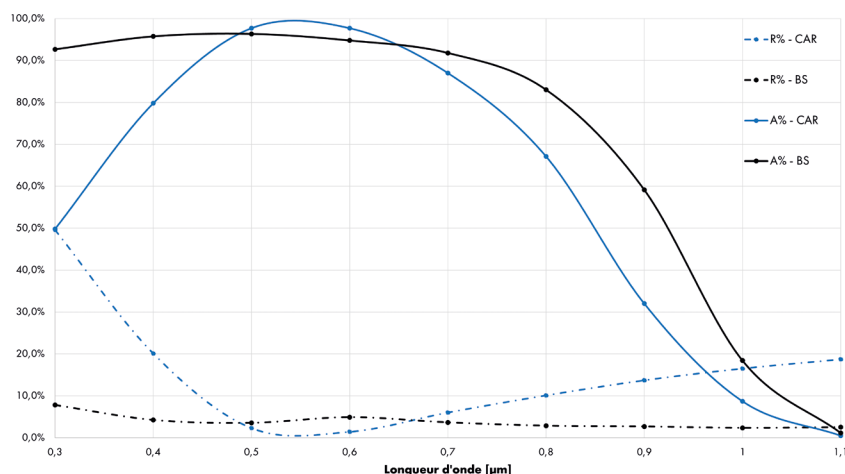


Figure 4. Méthodologie de modélisation optoélectronique d'un pixel d'imageur.



**Figure 5.** Comparaison des absorptions et réflexions spectrales d'un pixel d'imageur (épaisseur de Si = 10 μm) recouvert soit d'un anti-reflet couches minces (CAR), soit de black silicon (BS).

De la même manière que pour concevoir un pixel d'imageur, la modélisation optoélectronique se décompose en deux champs d'expertise : une expertise photonique par l'étude de la propagation de la lumière dans le dispositif et une expertise électronique par l'analyse de l'acquisition du signal électrique. En effet, les simulations photoniques permettent d'observer l'interaction entre la lumière et la matière, et en particulier la génération d'électrons par effet photo-électrique, alors que les simulations électroniques examinent la probabilité de collection de ces charges par le dispositif. La modélisation optoélectronique consiste alors à coupler les propriétés optiques, comme l'absorption et le cross-talk optique, avec les propriétés électroniques, en particulier la probabilité de collection des charges, afin de déterminer les propriétés optoélectroniques, comme les rendements quantiques internes et externes et le cross-talk électronique.

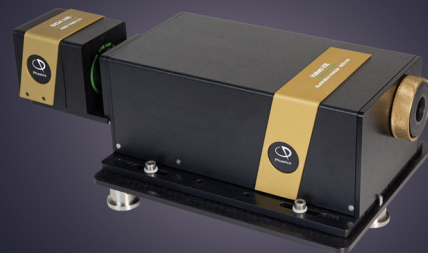
Nous avons développé nos propres modèles à l'aide d'outils commerciaux de simulation et évalué la valeur ajoutée du BS dans différentes architectures de pixels au travers des nombreuses métriques explicitées (Figure 4).

La base de ces modèles repose sur la capacité à modéliser des surfaces rugueuses aléatoires fidèles aux caractéristiques de rugosité du BS. Bien que la gravure permettant d'obtenir le BS

soit aléatoire, la texturation résultante répond à des statistiques de rugosité en termes de hauteur  $H$  et de longueur de corrélation  $L_c$ . Le logiciel de simulation photonique utilisé dans la méthode de modélisation optoélectronique permet de générer des surfaces rugueuses aléatoires selon trois paramètres [4]:  $\sigma_{RMS}$  qui représente l'écart-type moyen de la hauteur des structures,  $L_c$  qui est la longueur de corrélation spatiale, et  $\delta$  pour l'échantillonnage spatial numérique de la surface. En jouant sur ces réglages, il est possible d'obtenir une surface ayant des propriétés optiques semblables au BS intégré dans des capteurs d'images et de comparer ses propriétés de réflexion et d'absorption spectrales à d'autres technologies d'anti-reflet, comme les couches minces (Figure 5).

En cohérence avec les résultats expérimentaux obtenus, le développement de cette méthodologie de modélisation optoélectronique montre que le BS permet d'améliorer le rendement quantique externe d'un pixel d'imageur, c'est-à-dire sa capacité à convertir les photons en électrons et à collecter ces charges, de l'ultraviolet jusqu'au proche infrarouge.

Le circuit de lecture de l'imageur permet de restituer l'image à l'utilisateur. À partir des résultats issus des simulations photoniques et électroniques, il est possible de déterminer l'amélioration des caractéristiques de fonctionnement ●●●



## MWIR & LWIR wavefront sensing for optics testing



**Wavefront and MTF  
for any optical system**



**Tailored modules for  
your requirements**



**Factory & workshop-  
ready solutions**

de ce circuit, pour l'imageur intégrant du BS, en termes de vitesse de lecture, de consommation et de gamme dynamique.

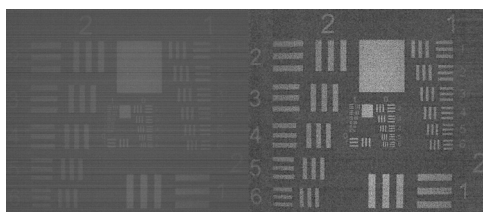
### QUAND L'IA ENTRE EN JEU

Nous avons développé des architectures de réseaux de neurones optimisés, capables de traiter les flux de données brutes en temps réel, en s'adaptant aux contraintes strictes des supports embarqués (NVIDIA Jetson, Raspberry Pi, FPGA, etc.). Pour les besoins des marchés adresses - défense, spatial et automobile en particulier - cette démarche s'inscrit dans la thématique d'« IA frugale », qui vise à concevoir des modèles d'intelligence artificielle sobres en termes de données, de calcul et de consommation énergétique, tout en conservant des performances adaptées à une application donnée.

En injectant une image dans un réseau profond optimisé, l'architecture du modèle permet d'isoler l'information pertinente avec précision, garantissant une restauration du signal brut supérieure aux méthodes de filtrage conventionnelles. In fine, l'algorithme ajuste le rendu ou applique les corrections nécessaires en s'appuyant sur un ensemble de paramètres — les poids — rigoureusement calibrés durant la phase d'apprentissage.

Les performances des réseaux de neurones, particulièrement en vision par ordinateur, reposent essentiellement sur la qualité des images et des vidéos utilisées lors de l'entraînement. Ces données doivent être acquises en très grande quantité (plusieurs milliers d'images/trames vidéos) et représenter des scénarios réalistes d'utilisation d'une caméra.

Afin de guider un entraînement supervisé de réseau de neurones de rehaussement ou de débruitage, il est nécessaire d'avoir des images ou vidéos sous forme de paires (*paired data*). Chaque image « Nuit » (scène nocturne, bruitée) doit être associée à une image « Jour » de référence, dite « vérité terrain » (*ground truth*). C'est



**Figure 6.** Comparaison entre une image d'une mire USAF 1951 d'un capteur de référence (gauche) et celle d'un capteur BS avec traitement d'image (droite).

ce couplage qui permet de guider le réseau durant l'entraînement ; il apprendra à passer d'une image sombre et/ou bruitée à une image claire et/ou débruitée. Ces données sont organisées en bases de données (ou *data-sets*), en libre accès ou non et nous avons fait le choix de construire nos propres bases de données.

Un dispositif adapté d'enregistrement de bases de données garantit une parfaite cohérence entre les données d'acquisition et les conditions opérationnelles réelles. En respectant la physique du bruit propre à l'imageur en basse luminosité, le jeu de données ainsi constitué permet une calibration spécifique de l'apprentissage des réseaux de neurones, assurant ainsi des performances optimales. L'association de la technologie BS et du traitement d'image permet d'étendre les capacités d'un capteur en conditions de très faible luminosité. Les images traitées (Figure 6) présentent un meilleur rapport signal sur bruit (19,72dB pour l'image du capteur de référence contre 21,19dB

pour l'image traitée du capteur BS) et une meilleure qualité d'image au global.

Ce couplage hardware et software permet d'optimiser le signal à chaque étape de la chaîne d'acquisition. Cette approche hybride augmente à la fois la qualité de la visualisation et accroît l'efficacité des traitements d'image additionnels pour la détection, la reconnaissance ou la segmentation. Les enjeux technologiques sont donc majeurs, et ouvrent la voie à un large éventail d'applications.

### CONCLUSION

Disposer de capacités numériques de vision à bas niveau de lumière, reposant sur des technologies que l'on peut positionner à l'échelle industrielle et pour lesquelles des perspectives de production en volume existent, est un enjeu majeur pour nombre de domaines civils – automobile, médical, industrie, spatial – et pour la défense. Nous avons fait le choix de combiner un procédé qui transforme, à l'échelle nanométrique, le matériau de choix de l'industrie microélectronique – le silicium – avec du traitement d'image pour répondre à cette demande. Dans le futur, l'embarquabilité des algorithmes permettant le rehaussement de contraste, le débruitage et des fonctions plus évoluées de détection, reconnaissance et identification, au plus près du capteur d'image ou directement dans les circuits CMOS (« Edge computing ») permettront d'accroître les performances et l'autonomie énergétique des systèmes d'imagerie. ●

### RÉFÉRENCES

- [1] C. Wu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **78**, 1850 (2001), doi:10.1063/1.1358846
- [2] F. Atteia *et al.*, Mater. Res. Bull. **131**, 110973 (2020), doi:10.1016/j.materresbull.2020.110973
- [3] T. Midavaine, Imagerie à bas niveau de lumière - Fondamentaux et perspectives, Opt. Photonique (2012), doi:10.51257/a-v1-e6570
- [4] S. Ma *et al.*, AIP Adv. **8**(3), 035010 (2018), doi:10.1063/1.5018642
- [5] Bao, *et al.*, Nature **619.7971**, 743 (2023)



# Make it EPIC!

In Photonics We Unite,  
In Europe We Thrive