

# La photonique intégrée sur silicium

Laurent FULBERT, Sylvie MENEZO – CEA-Leti  
 Frédéric BŒUF, Jean-François CARPENTIER – STMicroelectronics  
 Delphine MARRIS-MORINI, Laurent VIVIEN – Université Paris-Sud  
 Guang-Hua DUAN – III-V Lab  
[laurent.fulbert@cea.fr](mailto:laurent.fulbert@cea.fr)

La photonique intégrée sur silicium, qui consiste à utiliser les procédés de fabrication de l'industrie microélectronique pour réaliser des composants photoniques, est considérée comme une technologie d'avenir critique pour les applications de communications et de calcul à très haute vitesse. Cet article traite des différentes avancées réalisées par les laboratoires et industriels du domaine, et présente les différents marchés visés.

## Une technologie incontournable qui doit encore relever plusieurs défis

La société fait actuellement face à une explosion des demandes de calcul, de stockage et de communication. Le trafic d'information progresse d'environ 50 % chaque année et devrait atteindre le seuil de 1 zettaoctet/an (c'est-à-dire  $10^{21}$  octets) en 2015. Dans ce contexte, la circulation de l'information numérique représente un goulot d'étranglement, depuis les liaisons à grande distance à travers le monde, les liens dans les datacenters, jusqu'aux interconnexions puce à puce et intra-puces. L'utilisation de liaisons optiques en remplacement des liaisons électriques permettrait un gain spectaculaire en termes de bande passante, de consommation énergétique et de densité.

Pour relever ce défi, l'idée d'appliquer les techniques de fabrication collective de l'industrie microélectronique à la fabrication de circuits photoniques a conduit à l'émergence de la photonique intégrée sur silicium, c'est-à-dire l'intégration des fonctions photoniques avec des circuits électroniques à l'échelle de la plaque de silicium. Ces dernières années, la photonique sur silicium a acquis un

intérêt croissant, poussée par les résultats obtenus par les scientifiques et les acteurs industriels.

De nombreux défis technologiques restent cependant à relever :

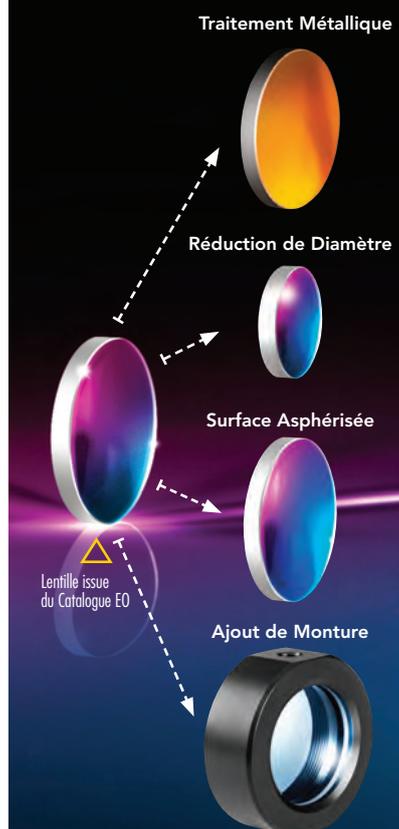
- construction d'un environnement de conception complet interfacé avec les outils de CAO (conception assistée par ordinateur) standards de la microélectronique ;
- développement de fonctions élémentaires génériques pouvant être utilisées pour un large éventail d'applications : sources laser, modulateurs optiques, photodétecteurs, guides d'ondes ;
- intégration des fonctions photoniques avec des fonctions électroniques pour fabriquer des dispositifs complexes ;
- mise en œuvre de moyens de test et de techniques de packaging à faible coût prenant en compte des contraintes optiques, électriques et thermiques.

## Les outils de conception

La réalisation de modules électro-optiques impose une rupture dans l'approche CAO commune en micro-électronique. On peut citer deux raisons essentielles du point de vue conception : la

## PROTOTYPAGE OPTIQUE

**MODIFICATIONS INFINIES**  
 Possibles sur plus de 19 400 Produits



**Service de Prototypage Optique**  
 Modifications sur les dimensions, les surfaces, les traitements, les bords et bien d'autres possibilités !

**Livraison sous 2 SEMAINES minimum seulement**

Venez nous rendre visite au Salon Enova (Opto) 2014 à Paris, 16-18 Septembre, Hall 7.2, Stand E16



## BESOIN D'UN PROTOTYPAGE OPTIQUE?

1. Sélectionnez une optique standard en stock.
2. Définissez votre modification.
3. Contactez-nous pour la réalisation de l'optique.

**EO** Edmund optics | worldwide

+33 (0)8 20 20 75 55  
[www.edmundoptics.fr/prototyping](http://www.edmundoptics.fr/prototyping)

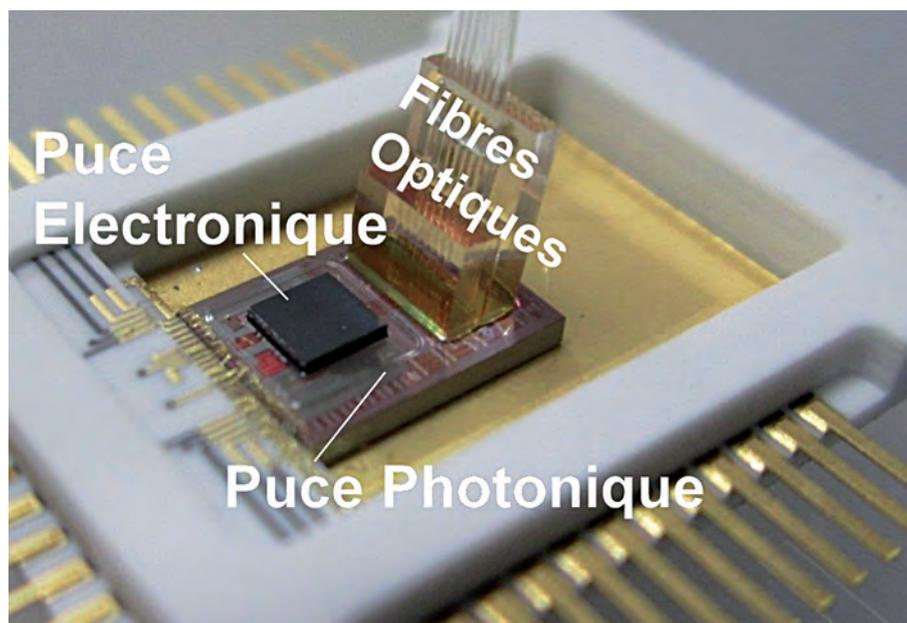


Figure 1. Exemple d'assemblage 3D d'une puce électronique sur une puce photonique.

première concerne les composants photoniques pour lesquels la tolérance aux procédés technologiques est exacerbée ; suivie de l'association nécessaire d'un circuit électronique *a minima* analogique à haute fréquence. Ceci impose de disposer de logiciels de calcul résolvant les équations de Maxwell et du semiconducteur afin de développer des modèles fiables des composants.

La co-conception grâce à deux PDKs (*process design kits*) regroupant sous forme de bibliothèques les composants photoniques et électroniques est d'ores et déjà réalisée par STMicroelectronics dans le cas d'une approche hybride, c'est-à-dire une puce photonique et une puce électronique assemblées en 3 dimensions [1], comme montré à la figure 1.

Cette plateforme de co-conception doit évoluer pour prendre en compte

des modèles ou fonctionnalités plus complexes (comme les effets non-linéaires ou le multiplexage en longueur d'onde), ainsi que les contraintes spécifiques liées à la co-intégration des deux puces dans le même boîtier.

### Les fonctions élémentaires

Le substrat utilisé en photonique silicium est le silicium-sur-isolant (SOI), le confinement de la lumière étant assuré par le fort écart d'indice entre le silicium et la silice. Les longueurs d'ondes utilisées sont les mêmes que dans les télécoms, autour de  $1,31 \mu\text{m}$  et  $1,55 \mu\text{m}$ .

#### Guides, fonctions passives

La brique de base élémentaire est le guide d'onde, qui peut avoir différentes

géométries comme le montre la figure 2. Les dimensions sont submicroniques (section typique de  $300 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$ ), et les pertes de propagation varient de  $0,3 \text{ dB/cm}$  à plusieurs  $\text{dB/cm}$  pour un guide à structuration plus complexe comme les guides à cristaux photoniques. De nombreuses fonctions ont pu être réalisées pour la distribution de la lumière [2], le multiplexage en longueurs d'onde [3], le contrôle de la polarisation de la lumière [4].

#### Coupleurs d'entrée/sortie

Le circuit photonique devant en général communiquer avec le monde extérieur, il est nécessaire de pouvoir injecter la lumière provenant d'une fibre optique vers le circuit et vice-versa. Le composant le plus utilisé est le réseau de couplage surfacique, qui permet d'une part d'adapter la taille du mode optique se propageant dans les guides du circuit à la taille du mode se propageant dans les fibres monomodes standards, et d'autre part de passer d'une propagation guidée dans le plan de la plaque à une propagation en espace libre verticale ou quasi-verticale.

L'injection ou la collection de lumière par la surface facilitent grandement le test automatisé des composants sur plaque.

#### Modulateurs

Les effets d'électro-réfraction classiquement exploités pour réaliser la fonction de modulation sont soit peu efficaces (effet Kerr), soit inexistant (effet Pockels) dans le silicium. La solution alternative la plus couramment exploitée repose sur la variation locale de la densité de porteurs libres dans le silicium (par accumulation, injection ou déplétion) pour créer une

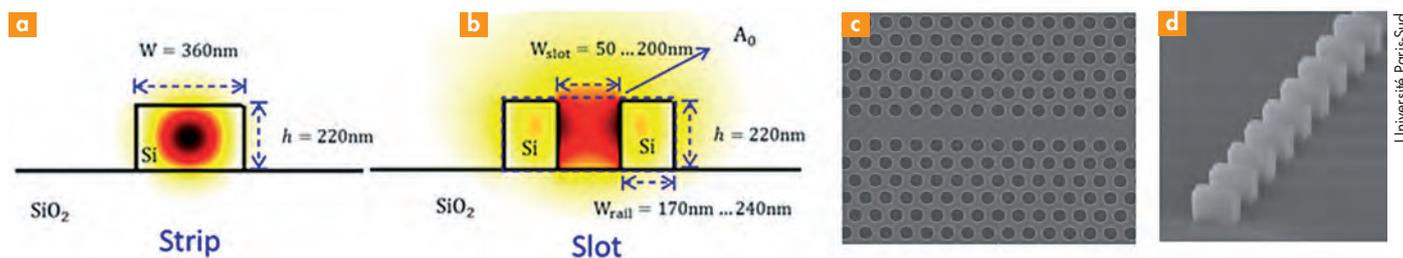


Figure 2. Exemples de guides d'onde silicium. (a) Guide d'onde ruban pour le mode TE. (b) Guide d'onde à fente. (c) Guide à cristaux photoniques. (d) Guide d'onde sub-longueur d'onde.

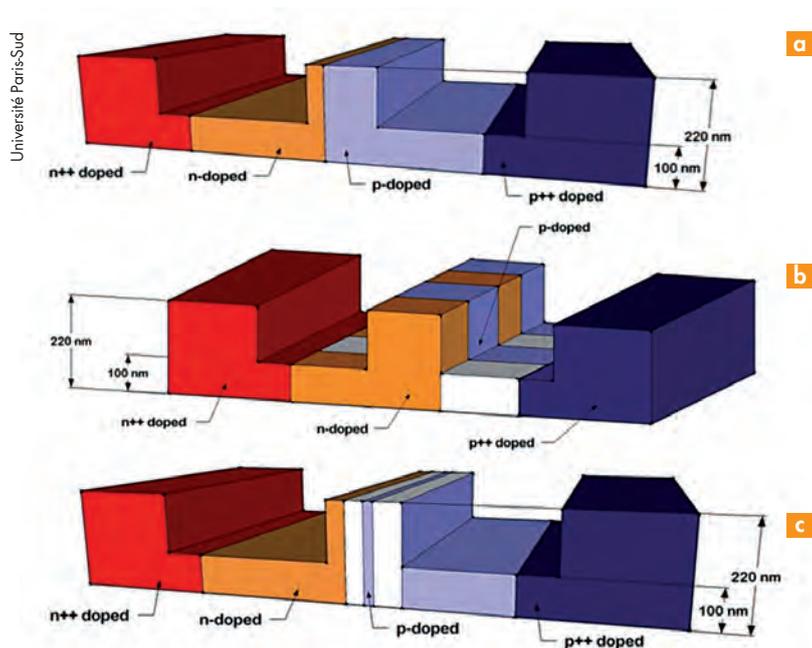


Figure 3. Exemples de diodes utilisées pour réaliser la déplétion de porteurs dans le silicium : (a) diode pn latérale, (b) pn interdigitée et (c) p-i-n intégrées.

variation de la phase de l'onde guidée (figure 3). La diode choisie pour créer le déphasage est insérée dans un interféromètre de Mach-Zehnder (insensible à la température, peu sensible à la longueur d'onde mais de plusieurs millimètres de long) ou dans un résonateur en anneau (sensible à la longueur d'onde et la température mais très compact). Les performances atteignent des valeurs proches des modulateurs optiques en niobate de lithium avec des bandes passantes de plus de 40 Gbit/s, des pertes d'insertion d'environ 6 dB et des taux d'extinction dynamiques de l'ordre de 8 dB [5].

Les tendances aujourd'hui portent sur la réduction drastique de la puissance consommée et de la tension de commande, soit en optimisant à l'extrême des effets de variation de porteurs en utilisant de nouvelles géométries de guide d'onde, soit en utilisant d'autres effets physiques comme l'électro-absorption dans les alliages de germanium [6] ou l'utilisation du silicium contraint pour exploiter l'effet Pockels.

### Photodétecteurs

Le matériau de référence pour la détection de la lumière sur la plateforme silicium est le germanium grâce à son fort

coefficient d'absorption. Aujourd'hui, les performances des photodétecteurs germanium sont très proches des photodétecteurs à base de semiconducteurs III-V. En effet, des bandes passantes au-delà de 100 GHz ont été démontrées avec des sensibilités de plus de 0,5 A/W [7] (figure 4). Afin d'améliorer la sensibilité, des photodiodes germanium à avalanche sont aussi en cours de développement et ont donné lieu à des résultats prometteurs en termes de produit gain-bande passante.

### Lasers

La source laser représente l'un des premiers postes de l'énergie consommée pour établir une transmission optique de données [8]. Il est donc important de bénéficier de sources laser à rendement à la prise élevée (rapport de la puissance optique fournie sur la puissance électrique requise).

Le silicium ne permettant pas d'émettre de la lumière de manière efficace, il faut faire appel aux matériaux III-V (alliages d'éléments des colonnes III et V du tableau périodique, de type InP ou GaAs). Il existe aujourd'hui trois approches différentes pour réaliser une source laser dans un circuit photonique sur silicium (PIC) : source externe, intégration hétérogène de

## Symétrie METROLOGIE ET POSITIONNEMENT

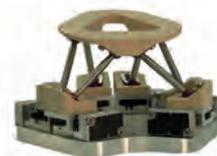
### HEXAPODE

- 6 degrés de liberté
- haute précision
- configuration du centre de rotation dans le logiciel

Hautes performances pour vos positionnements de précision :  
optique, instrumentation, spatial, synchrotron...

### NanoPos New hexapode miniature

- résolution 10 nm
- courses ± 5 mm
- charge max. 1 kg
- hauteur 65 mm



### BREVA

parfait pour des courses et charges plus importantes

- résolution 0,5 µm
- courses ± 75 mm
- charge max. 200 kg
- hauteur 350 mm



Contact : +33 (0)4 66 29 43 88  
info@symetrie.fr www.symetrie.fr

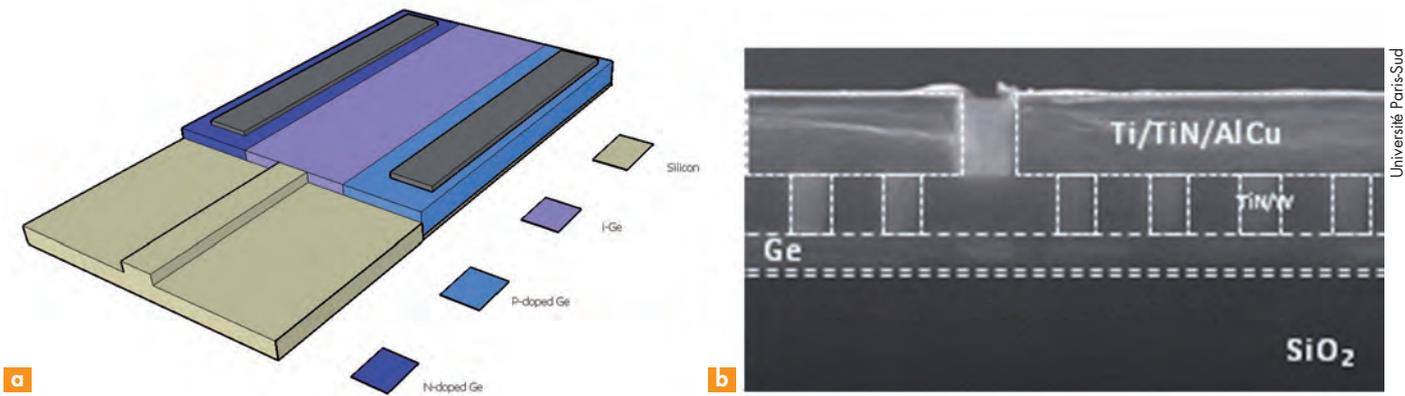


Figure 4. (a) Vue schématique d'un photodétecteur germanium intégré en bout d'un guide d'onde silicium. (b) Image en coupe du photodétecteur obtenue par microscopie électronique.

matériau III-V sur silicium et croissance de matériau émetteur sur silicium.

- Dans la première approche, le faisceau provenant d'un laser classique III-V est injecté dans le PIC silicium. Cette approche utilise des lasers dont la technologie de fabrication est mature, mais le coût de réalisation est élevé en raison de la précision d'alignement requise.
- L'intégration hétérogène consiste à intégrer par collage direct (ou collage moléculaire) un matériau III-V non structuré sur une plaque de silicium dans laquelle les guides optiques sont déjà gravés. Le procédé technologique de réalisation des sources lasers est ensuite poursuivi, de telle sorte que la lumière émise par ces matériaux III-V soit couplée vers les guides sur silicium. L'alignement étant réalisé de manière collective et avec une précision excellente lors de l'étape de photolithographie, le coût de fabrication unitaire est par conséquent réduit par rapport à la première approche. La figure 5 montre une vue en coupe d'un laser III-V sur silicium [9, 10]. Nous observons au centre de ce schéma un guide III-V, servant uniquement à générer et amplifier la lumière, alors que la cavité est formée dans le silicium.
- La troisième approche, encore en voie d'exploration, utilise la croissance directe sur silicium de matériau de type germanium contraint ou de type III-V. Bien que de premiers résultats prometteurs aient été obtenus en laboratoire, le défi à relever pour obtenir des lasers de performance suffisante est encore énorme.

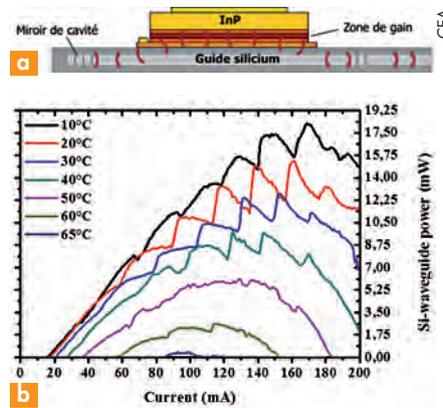


Figure 5. (a) Laser III-V sur silicium réalisé par collage moléculaire. (b) Puissance optique dans le guide en fonction du courant injecté pour un laser DBR (distributed Bragg reflector).

### Le test sur plaque

Les testeurs sous pointes sont largement utilisés dans l'industrie microélectronique pour mesurer les caractéristiques électriques des circuits intégrés sur plaque, avant découpe en puce et mise en boîtier. Ces testeurs automatisés permettent de caractériser dans un temps très court plusieurs milliers de composants et d'identifier éventuellement ceux qui ne répondent pas aux spécifications.

Des testeurs spécifiques ont été développés pour la photonique silicium (figure 6), en ajoutant des « pointes optiques » (en réalité des fibres optiques qui permettent d'injecter ou de collecter la lumière) aux testeurs conventionnels, qui permettent de mesurer les paramètres optiques (pertes, propriétés spectrales, dépendance en polarisation...) ou

électro-optiques (seuil et rendement laser, sensibilité et courant d'obscurité de photodétecteurs, bande passante...).

### Applications industrielles

Le passage de la recherche vers le développement d'une plateforme industrielle en photonique sur silicium s'appuie sur la qualification de la technologie suivant un schéma de maturité démontrant successivement la faisabilité, la reproductibilité et la fiabilité des procédés et des composants optoélectroniques.

### Datacoms

Le domaine des Datacoms décrit l'échange de données numériques entre deux ordinateurs. En raison des spécifications de qualité de transmission et de puissance consommée, ces échanges se font généralement sur des distances plus courtes qu'en télécommunications.

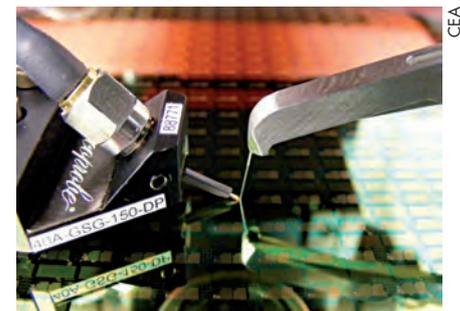


Figure 6. Test sous pointes d'une plaque de photodiodes. Un signal optique est injecté par l'intermédiaire de la fibre optique à droite et la mesure est faite par les pointes électriques à gauche.

Le développement du « Cloud », des réseaux sociaux et de la diffusion de vidéo sur Internet, conjugué à la généralisation des dispositifs mobiles connectés, tels que les Smartphones, ont pour conséquence l'augmentation du nombre de données numériques stockées et échangées à travers le monde.

De manière à pouvoir adresser ce marché en plein essor, une technologie adaptée à la production de forts volumes est développée par STMicroelectronics. Une intégration de type 3D (voir *figure 1*) est retenue : la puce électronique contenant les circuits de contrôle digitaux et analogiques est assemblée sur la puce photonique en utilisant la technologie d'assemblage par micro piliers de cuivre. Ceci permet d'utiliser un large choix de technologies CMOS et BiCMOS pour la partie électronique sans avoir à redévelopper la partie photonique.

### Télécommunications

Les applications en télécommunications concernent surtout les *transceivers* (émetteurs et récepteurs) à l'extrémité de liaisons à fibres optiques. Tous les segments du marché des télécommunications peuvent bénéficier de la technologie de la photonique sur silicium : accès, métropolitain et longue distance. La photonique sur silicium semble bien adaptée pour pénétrer le marché des réseaux d'accès, caractérisé par un volume important et une forte exigence sur le coût des *transceivers* côté client. Les réseaux métropolitain et longue distance sont aujourd'hui dominés par la modulation multi-niveaux de format du type QPSK ou QAM et la réception cohérente. Des *transceivers* en photonique sur silicium sont également en train d'être développés pour ces segments de marché.

Ces applications sont motivées par les avantages potentiels que peut offrir la photonique sur silicium : i) la compacité, ii) la diminution de la consommation, iii) la possibilité d'intégration avec l'électronique, et iv) la réduction du coût de fabrication. Cependant, la photonique sur silicium ne peut s'imposer véritablement comme une technologie de rupture que si les performances sont conformes aux spécifications et si le coût est compétitif

face aux autres technologies (l'intégration III-V ou l'association des composants discrets).

### Recherche collaborative pour préparer les futures générations

La photonique intégrée sur silicium, étudiée depuis longtemps dans les laboratoires de recherche, a pris depuis peu son essor industriel. L'Europe et la France ont d'excellents atouts dans ce domaine, grâce aux collaborations étroites entre laboratoires académiques, instituts de recherche et entreprises. Parmi les projets majeurs, on peut citer l'Institut de Recherche Technologique (IRT) Nanoelec [11], dont les partenaires principaux sont le CEA-Leti, STMicroelectronics, Mentor Graphics et le CNRS, ainsi que le projet Européen PLAT4M [12], qui regroupe 16 partenaires dont le CEA-Leti, STMicroelectronics, Mentor Graphics, III-V lab et l'université Paris-Sud.

#### Références

- [1] F. Boeuf *et al.*, *S13P3*, in Proceedings of the International Electron Device Meeting (2013)
- [2] L. Vivien *et al.*, *Applied Physics Letters* **85**, 701-703 (2004)
- [3] D. Bernier *et al.*, *Optics Express* **16**, 17209-17214 (2008)
- [4] C. Alonso-Ramos *et al.*, *Optics Letters* **37**, 3534-3536 (2012)
- [5] D. Marris-Morini *et al.*, *Optics Express* **22**, 6674-6679 (2014)
- [6] P. Chaisakul *et al.*, *Nature Photonics* **8**, 482-488 (2014)
- [7] L. Vivien *et al.*, *Optics Express* **20**, 1096-1101 (2012)
- [8] S. Menezo *et al.*, Evaluation of optical interconnects built up from a complete CMOS-Photonics-devices-library, OIC 2013
- [9] G.-H. Duan *et al.*, Hybrid III-V on Silicon lasers for photonic integrated circuits on Silicon, IEEE JSTQE 20(4) (2014)
- [10] A. Descos *et al.*, Heterogeneously integrated III-V/Si distributed Bragg reflector laser with adiabatic coupling, Proc. ECOC 2013
- [11] <http://www.giant-grenoble.org/fr/recherche-et-technologie-sitemap/irt/92-irt-nanoelectronique/483-a-propos-de-lirt-nanoelec>
- [12] <http://plat4m-fp7.eu/>

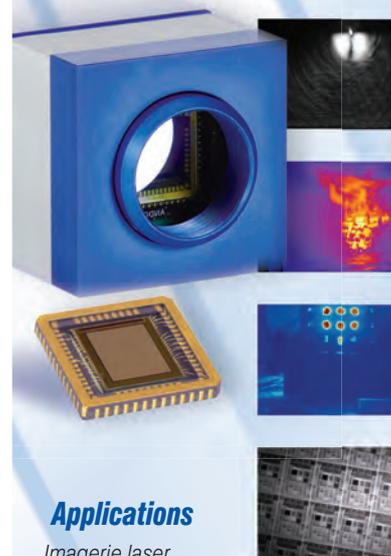
## WiDy SWIR 640

Votre solution  
InGaAs HDR pour  
le proche Infrarouge  
(900 nm - 1700 nm)



### Spécifications

- Dynamique scène >140 dB
- Sans refroidissement
- Résolution VGA et pixel de 15 µm
- USB 2.0 ou sortie Analogique TV



### Applications

- Imagerie laser  
(Télécommunication, Industriel)
- Imagerie Industrielle proche Infrarouge  
(soudage, thermographie)
- Surveillance côtière
- Caméras aéroportées



[www.new-imaging-technologies.com](http://www.new-imaging-technologies.com)