

# LA PHOTONIQUE SILICIUM/GERMANIUM pour la spectroscopie moyen infrarouge

Delphine MARRIS-MORINI\*

Carlos ALONSO-RAMOS

Xavier LE ROUX

Laurent VIVIEN

Centre de Nanosciences

et de Nanotechnologies,

UMR CNRS /

Université Paris Sud /

Université Paris Saclay,

10 boulevard Thomas Gobert,

91120 Palaiseau, France

\*[delphine.morini@u-psud.fr](mailto:delphine.morini@u-psud.fr)

Le silicium est aujourd'hui le matériau de choix pour l'optique intégrée, bénéficiant de techniques de fabrication matures développées par l'industrie de la microélectronique. La photonique silicium propose ainsi des circuits intégrant de multiples fonctions, à coût réduit. À l'origine étudiée pour répondre aux limitations des circuits intégrés et principalement à la transmission du signal d'horloge à l'intérieur des circuits intégrés microélectroniques, la photonique silicium a finalement révolutionné les communications optiques courtes distances (datacom) dans les centres de données (data center). Les grands industriels de la microélectronique et d'Internet (Intel, STMicroelectronics, Cisco...) se sont intéressés à cette plateforme photonique, et des produits commerciaux sont aujourd'hui disponibles.

Récemment, de nouvelles applications ont vu le jour, en particulier autour des développements de systèmes spectroscopiques intégrés pour la réalisation de capteurs. En effet la spectroscopie dans le domaine spectral du moyen infrarouge (2-20  $\mu\text{m}$ ) permet l'identification et la quantification de nombreuses substances chimiques et biologiques, en sondant leurs raies d'absorption dans cette gamme de longueurs d'onde. On parle même de la *fingerprnt region* pour les longueurs d'onde allant de

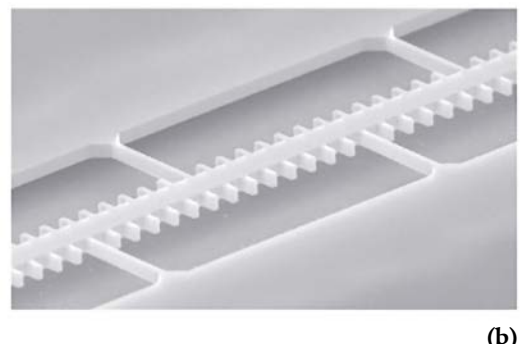
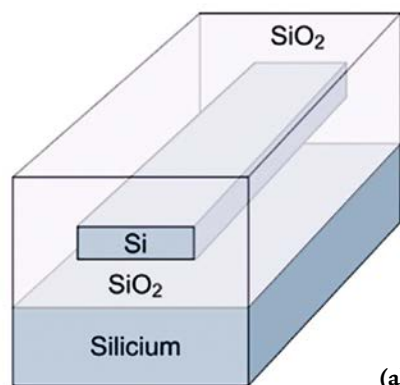
6 à 20  $\mu\text{m}$ . En effet, dans cette gamme spectrale les molécules ont des signatures d'absorption caractéristiques permettant ainsi une identification précise des espèces. Le développement de systèmes photoniques silicium pour la spectroscopie moyen infrarouge est actuellement un domaine de recherche en plein essor, avec des démonstrations de dispositifs de base nécessaires pour la réalisation de capteurs intégrés. Nous présentons ci-dessous des résultats récents obtenus sur les plateformes silicium-sur-isolant

(SOI pour *silicon on insulator*) et silicium germanium (SiGe).

## Circuits photoniques intégrés silicium

Les substrats SOI, classiquement utilisés en photonique silicium dans le proche infra-rouge (1,3-1,5  $\mu\text{m}$ ), exploitent la propagation de la lumière dans la couche supérieure de silicium ( $n_{\text{Si}} \approx 3,5$ ), d'épaisseur typique de 200 à 500 nm. Le confinement est obtenu par différence d'indice avec

**Figure 1.** (a) Vue schématique d'un guide d'onde SOI. La lumière est guidée dans le ruban de silicium, le confinement est obtenu par différence d'indice avec la silice qui entoure le cœur du guide Si. (b) Vue au microscope électronique à balayage (MEB) d'un guide d'onde membranaire à nanostructuration sub-longueur d'onde.



## Formation Continue Institut d'Optique

**L'Institut d'Optique Graduate School est le plus grand centre de formation et de recherche d'Europe en optique-photonique**

Le Service de Formation Continue (FC) de l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS) propose, en lien étroit avec l'industrie (TPE, PME, grands groupes) des formations dans tous les domaines de l'optique-photonique.

**Plus de 150 montages expérimentaux pour la formation plébiscités par 100% des stagiaires.**



Les formations s'appuient sur un parc unique au monde de démonstrations expérimentales. En 2018, 100 % des stagiaires interrogés estiment que les travaux pratiques permettent de mieux comprendre les notions abordées, et 99 % estiment que la formation répondait à leurs attentes.

**L'optique-photonique : notre cœur de métier, en constante évolution**

La FC de l'IOGS bénéficie d'une synergie unique entre l'école d'ingénieurs Supoptique et le tissu industriel issu des Anciens et des activités R&D et entrepreneuriales. Cette qualité d'interaction permet de proposer des formations de tous niveaux, en prise avec l'évolution technologique et les besoins des entreprises.

**Des stages sur catalogue ou sur-mesure, en français ou en anglais.**

### CONTACT

Émilie Ericher : +33 1 64 53 32 36  
 Annie Keller : +33 1 64 53 32 15  
[fc@institutoptique.fr](mailto:fc@institutoptique.fr)

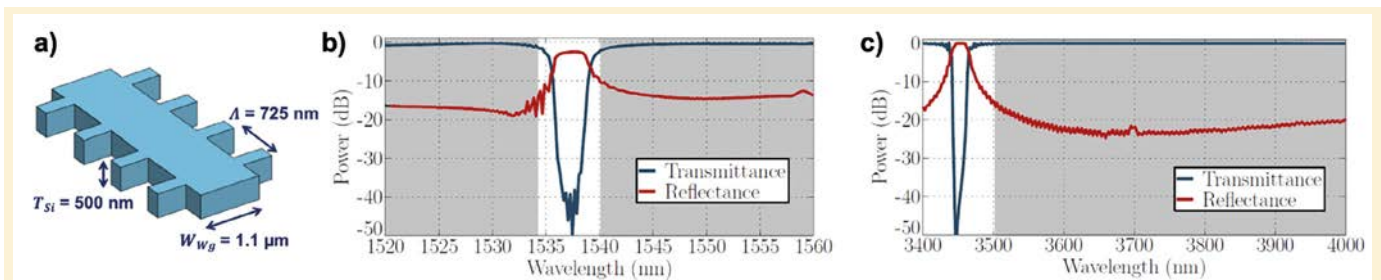
la couche de silice ( $\text{SiO}_2$ ) enterrée ( $n_{\text{SiO}_2} \approx 1.5$ ) (figure 1a). L'utilisation de ces guides à plus grande longueur d'onde est possible mais nécessite l'augmentation de l'épaisseur des couches de Si et  $\text{SiO}_2$  pour éviter les pertes optiques par effet tunnel vers le substrat Si. Cependant au-delà de la longueur d'onde de  $3,6 \mu\text{m}$ , les guides SOI sont peu exploitables à cause de la forte absorption de la silice. Pour exploiter la totalité de la gamme de transparence du silicium, de  $1,1$  à  $8 \mu\text{m}$ , des guides membranaires en silicium obtenus par gravure de la couche de silice enterrée ont été développés. Récemment, il a été montré que des guides membranaires utilisant des nanostructures sub-longueurs d'onde (période très petite devant la longueur d'onde considérée), permettent d'obtenir un guidage de l'onde optique avec de faibles pertes de propagation (figure 1b). De manière intéressante, le procédé de fabrication utilisé est robuste et permet l'obtention de structures membranaires avec une très bonne stabilité mécanique [1]. De plus, le degré de liberté lié à la nanostructuration sub-longueur d'onde donne une grande flexibilité en matière de conception, permettant ainsi d'ajuster le confinement de la lumière et la dispersion des guides. Ces nouvelles nanostructures silicium sont très prometteuses pour le développement de composants photoniques dans le proche et le moyen infrarouge.

Cependant, à l'heure actuelle, pour une application à large bande spectrale, la limitation majeure des guides d'onde réside dans le maintien des conditions monomodales dans toute la gamme de transparence du Si ( $1,1$ - $8 \mu\text{m}$ ). Nous avons ainsi développé un nouveau concept de guides d'onde périodiques nanostructurés exploitant une ingénierie de la dispersion pour supprimer les effets de diffraction. L'originalité est d'utiliser des nanostructures périodiques permettant une suppression de la diffraction de manière sélective en longueur d'onde (figure 2a). Ce contrôle flexible de la diffraction permet d'assurer une

propagation monomode dans des guides d'onde qui seraient normalement largement multimodes sans cette nanostructuration. Cette nouvelle approche d'ingénierie de guides d'onde permet la mise en œuvre de guides membranaires monomodes à la fois dans le proche et le moyen infrarouge. À titre d'exemple, les figures 2b et 2c présentent le spectre de transmission d'un tel guide Si dans les gammes de longueurs d'onde du proche et du moyen infrarouge, respectivement. Ces résultats illustrent le potentiel des structures sub-longueurs d'onde proposées pour guider simultanément la lumière dans toute la gamme de transparence du Si.

### Circuits photoniques intégrés SiGe

Durant les 15 dernières années, les composants optoélectroniques à base de germanium (Ge) ont été développés pour étendre le potentiel des circuits photoniques Si. Ainsi, des photodétecteurs, modulateurs et lasers Ge sur Si ont été démontrés dans le proche infrarouge. Dans le domaine spectral du moyen infrarouge, l'atout principal du Ge est sa grande fenêtre de transparence, de  $1,6$  à  $15 \mu\text{m}$  de longueur d'onde. Le Ge et les alliages SiGe ont donc été rapidement considérés comme des matériaux de choix pour le développement de systèmes spectroscopiques intégrés. Les acteurs majeurs dans ce domaine sont l'université de Southampton (UK), l'université de Gand (B), le C2N, l'INL-École Centrale de Lyon, mirSense et le CEA-Leti. Un ensemble de fonctions passives ont ainsi été démontrées, comme des multiplexeurs en longueurs d'onde, des coupleurs et des résonateurs. L'utilisation de ces structures intégrées comme capteurs optiques a également pu être évaluée en exploitant l'absorption de la composante évanescence du mode optique par un milieu absorbant se situant à l'extérieur du guide d'onde [3]. À l'heure actuelle, l'interrogation de ces capteurs est un point essentiel pour la démonstration de systèmes



**Figure 2.** (a) Vue schématique du guide d'onde nanostructuré optimisé pour un fonctionnement monomode dans le proche et le moyen infrarouge. Transmission et réflexion du guide d'onde (calcul FDTD 3D) décrit en (a) ; dans (b) le proche infrarouge et (c) le moyen infrarouge.

compacts. Un des points clés pour la spectroscopie optique est en effet la possibilité de reconstruire le spectre du signal après interaction avec la substance à détecter, pour mettre en évidence l'absorption spécifique des espèces. Plusieurs approches sont considérées. La première s'appuie sur l'utilisation d'un laser accordable, à faible largeur de raie, dont la longueur d'onde balaye le spectre à détecter. La transmission est ensuite mesurée avec un détecteur large bande, en fonction de la longueur d'onde du laser incident. Ainsi une très bonne résolution fréquentielle peut être obtenue, en contrepartie d'une limitation de la largeur spectrale atteignable gouvernée par l'accordabilité du laser. L'autre approche consiste à utiliser une source optique large bande (supercontinuum) et à placer un spectromètre en longueur d'onde en amont du photodétecteur pour mesurer la transmission en fonction de la longueur d'onde. Une grande variété de spectromètres intégrés a été proposée, basés sur des réseaux de guides

d'onde (*array waveguide grating - AWG*) ou des réseaux échelles. Des spectromètres hétérodynes à transformée de Fourier (SHFT) intégrés et basés sur un réseau d'interféromètres de Mach Zehnder asymétriques ont également démontré des performances très prometteuses. Ils présentent des avantages par rapport aux spectromètres diffractifs classiques principalement liés à l'utilisation d'une matrice de calibration mesurée au préalable pour s'affranchir des erreurs de phase liées aux variations technologiques lors de la fabrication des composants.

Dans ce contexte, un SHFT à base de guides d'onde SiGe a été démontré dans la gamme de longueurs d'onde allant de 5,5 à 8,5  $\mu\text{m}$  (1170 à 2000  $\text{cm}^{-1}$ ) et fonctionnant pour les deux polarisations de la lumière TE et TM. Les guides d'onde utilisés reposent sur une structure épitaxiale formée d'une couche de SiGe de 11  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, où la concentration en Ge augmente linéairement de 0 à 79 %, suivie d'une couche homogène de  $\text{Si}_{0,2}\text{Ge}_{0,8}$  de 2  $\mu\text{m}$  d'épaisseur

(figure 3a). L'augmentation de l'indice de réfraction avec la concentration en Ge permet un confinement de la lumière dans la partie supérieure de la structure épitaxiée. Le SHFT est basé sur un ensemble de 19 interféromètres de Mach Zehnder asymétriques (figure 3b), dont la différence de longueur entre les deux bras varie de 9,4 à 178,6  $\mu\text{m}$ . Après une phase de calibration, la transmission de chaque Mach Zehnder est mesurée, et un algorithme de reconstruction est appliqué pour remonter au spectre du signal incident. À titre d'exemple on peut voir sur la figure 3c la reconstruction de différents signaux dont la longueur d'onde varie entre 5,5 et 8,5  $\mu\text{m}$ . La différence entre le signal incident et le signal reconstruit est liée à la résolution de l'interféromètre, qui est mesurée via la largeur à mi-hauteur des pics après reconstruction. Des largeurs à mi-hauteur de 12  $\text{cm}^{-1}$  en TE et 14,5  $\text{cm}^{-1}$  en TM ont ainsi été obtenues. Ce résultat prometteur est la première démonstration d'un spectromètre intégré fonctionnant



## Sous la lumière, les hommes

Par Riad Haïdar et préfacé par Pierre Chavel

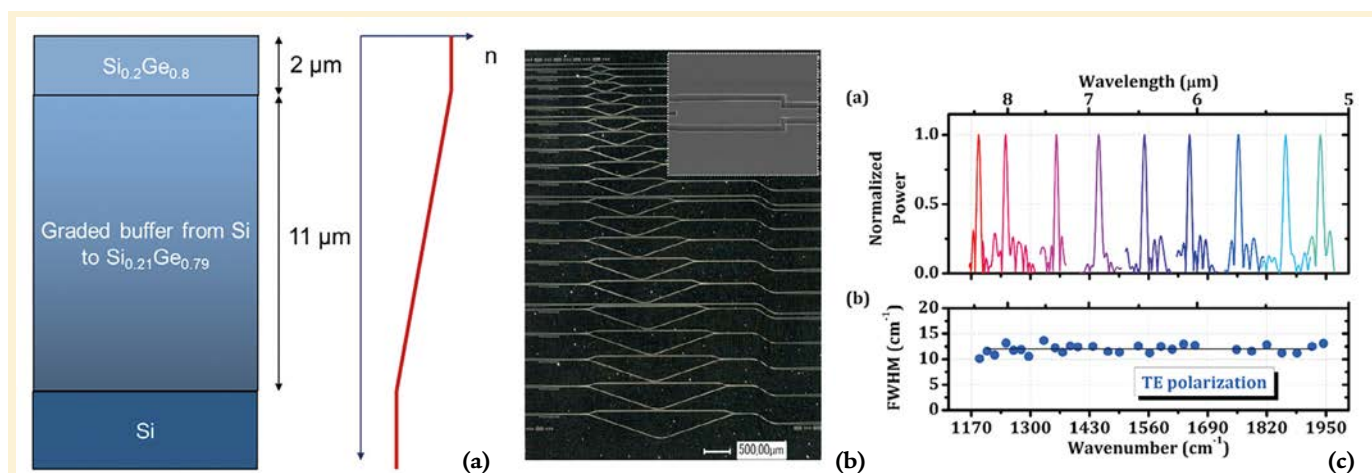
edpsciences

On imagine mal aujourd'hui le parcours de ces savants, grands esprits audacieux, caractères courageux et trempés, fins politologues, qui ont construit la science que nous pratiquons et imaginé le monde tel que nous le connaissons aujourd'hui. Ce livre reprend, à travers une sélection de biographies, comme autant de trajectoires symboliques, les grandes lignes de cette aventure millénaire.

laboutique.edpsciences.fr

ISBN : 978-2-7598-1082-6  
19 € TTC





**Figure 3.** Spectromètre à transformée de Fourier intégré sur circuit photonique SiGe. (a) Vue en coupe du guide d'onde SiGe et profil d'indice de réfraction permettant le confinement optique dans la région supérieure ( $\text{Si}_{0.2}\text{Ge}_{0.8}$ ). (b) Vue au microscope optique du SHFT comportant 19 interféromètres de Mach Zehnder asymétriques. (c) Spectres des signaux reconstitués, pour différents lasers placés à l'entrée du spectromètre, illustrant le bon fonctionnement du spectromètre de 5,5 à 8,5  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde.

dans une bande spectrale aussi large dans le moyen infrarouge.

## Conclusion

La photonique silicium est une solution aujourd'hui largement étudiée pour le développement de systèmes photoniques dans le moyen infrarouge. Parmi les applications visées, la réalisation de systèmes spectroscopiques intégrés pourra avoir un impact dans le domaine des capteurs pour le grand public. À l'heure actuelle, les travaux portent principalement sur la démonstration des différents

composants élémentaires, mais à terme l'intégration des différents éléments sera un point clef pour la démonstration de systèmes complexes. Les prochains challenges porteront

sur la réalisation de composants optoélectroniques, passant par exemple par l'intégration avec d'autres matériaux pour la réalisation de sources et de photodétecteurs.

### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] J. Soler Penadés et al., Suspended SOI waveguide with sub-wavelength grating cladding for mid-infrared, *Optics Letters*, 39, 5661 (2014)
- [2] C. Alonso-Ramos et al., Diffraction-less propagation beyond the sub-wavelength regime: a new type of nanophotonic waveguide, *Scientific Reports*, 9, 5347 (2019)
- [3] Q. Liu et al., Mid-infrared sensing between 5.2 and 6.6  $\mu\text{m}$  wavelengths using Ge-rich SiGe waveguides, *Optical Materials Express*, 8, 1305 (2018)
- [4] Q. Liu et al., Integrated broadband dual-polarization Ge-rich SiGe mid-infrared Fourier-Transform spectrometer, *Optics Letters*, 43, 5021 (2018)

# THIN FILM TECHNOLOGIES

# KERDRY.COM

- ▶ METALLIC COATING
- ▶ OPTICAL COATING
- ▶ PHOTOLITHOGRAPHY up to 200 mm
- ▶ OPTICAL FIBER COATING
- ▶ COMBINAISON OF METALLIC AND OPTICAL COATING ON THE SAME SUBSTRATE

commercial@kerdry.com  
www.kerdry.com