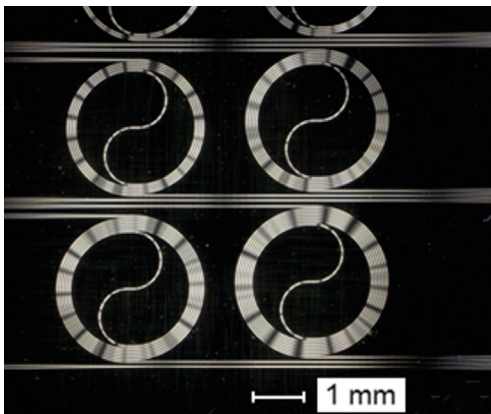


LES CIRCUITS PHOTONIQUES INTÉGRÉS DANS L'INFRAROUGE MOYEN: VERS DES SYSTÈMES ULTRA COMPACTS POUR LA SPECTROSCOPIE

Carlos ALONSO-RAMOS, Adel BOUSSEKSOU, Delphine MARRIS-MORINI*

C2N, Université Paris Saclay, CNRS, 10 boulevard Thomas Gobert 91120 Palaiseau, FRANCE

*delphine.morini@universite-paris-saclay.fr



La spectroscopie dans l'infrarouge moyen est un outil essentiel pour l'analyse et l'identification de composés chimiques. Par exemple la détection et la quantification de traces de gaz à effet de serre et de composés toxiques représentent un enjeu majeur pour la protection de l'environnement. Dans ce contexte, les circuits photoniques opérant dans l'infrarouge moyen, capables de manipuler et de façonner les faisceaux optiques de manière intégrée et miniaturisée, suscitent un intérêt croissant et ont connu des avancées significatives ces dernières années.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613835>

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 spectroscopie dans l'infrarouge moyen (au sens large, entre 2 et 20 μm de longueur d'onde) constitue une méthode universelle d'identification des substances chimiques et biologiques, ainsi qu'un outil de diagnostic non invasif. En effet, les molécules présentent des résonances caractéristiques, responsables de raies d'absorption dans cette gamme spectrale. Ces signatures peuvent être exploitées par exemple pour détecter des traces de substances dangereuses et toxiques pour l'environnement.

Les domaines d'application sont nombreux, et couvrent notamment

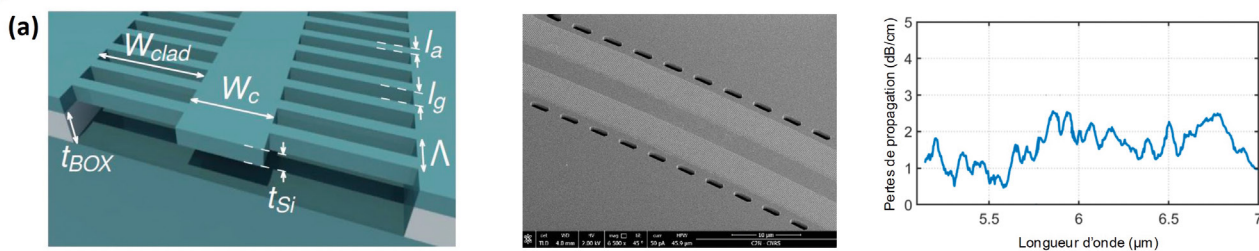
la surveillance environnementale, la sécurité et le contrôle des procédés industriels. Toutefois, démocratiser l'usage de la spectroscopie au-delà des laboratoires de recherche représente un défi majeur, qui stimule le développement de systèmes photoniques intégrés et compacts.

Dans ce contexte, la recherche sur les circuits photoniques opérant dans l'infrarouge moyen, capables de manipuler et de façonner les faisceaux optiques de manière intégrée et miniaturisée, a connu un essor considérable ces dernières années.

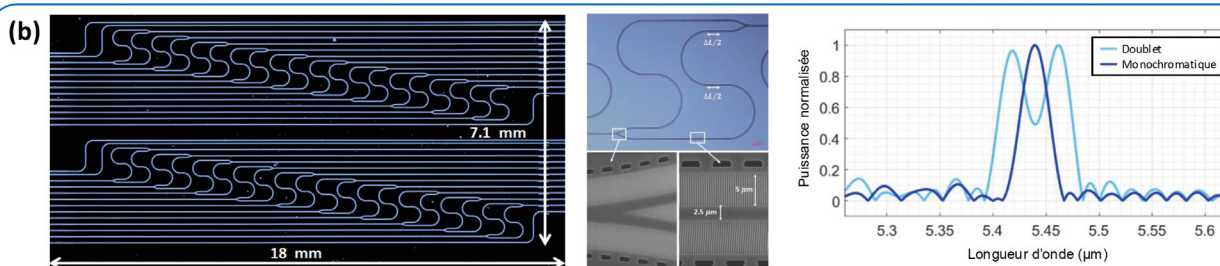
À l'heure actuelle, plusieurs approches sont explorées et seront

présentées dans la suite. Chacune offre des avantages spécifiques et répond à des enjeux technologiques distincts :

- La photonique silicium, notamment via l'utilisation des substrats silicium sur isolant (SOI) constitue une solution particulièrement attractive en raison de sa compatibilité avec les technologies de circuits photoniques déjà commercialisées pour les applications télécoms.
- Le recours au germanium permet quant à lui d'étendre le domaine spectral au-delà de 8 μm de longueur d'onde, qui correspond à la limite de transparence du silicium, ouvrant ainsi la voie à des dispositifs ●●●



Guides d'onde en silicium nanostructurés à l'échelle sub-longueur d'onde pour l'infrarouge moyen



Circuits photoniques complexes : spectromètre par transformée de Fourier

opérant à de plus grandes longueurs d'onde.

- Enfin le développement de circuits photoniques à base de matériaux III-V présente l'avantage d'une compatibilité naturelle avec les sources lasers à cascade quantique, facilitant l'intégration des sources dans les systèmes photoniques infrarouge moyen.

Pour chacune de ces plateformes photoniques intégrées, les enjeux actuels concernent le développement des fonctions optiques élémentaires, en tenant compte des contraintes spécifiques associées à la gamme spectrale de l'infrarouge moyen. Il est à noter qu'à ce stade, la détection du signal optique est généralement envisagée de manière externe. En effet les contraintes associées aux photodétecteurs, notamment en termes de refroidissement, rendent leur intégration directe sur les circuits photoniques difficiles.

À terme, différentes architectures pourront être envisagées pour la réalisation de systèmes spectroscopiques intégrés, en fonction des performances atteintes pour chacune des fonctions optiques élémentaires. Parmi les approches possibles figurent l'utilisation d'une source optique large bande couplée à un spectromètre intégré, le recours à

Figure 1. Circuits photoniques intégrés basés sur des guides d'onde en silicium nanostructurés à l'échelle sub-longueur d'onde. (a) Schéma d'un guide d'onde en membrane de silicium suspendue, dans lequel deux réseaux sub-longueur d'onde forment une gaine métamatériau assurant à la fois le confinement optique et l'accès à l'acide fluorhydrique pour le retrait de la couche d'oxyde enfouie. Image au microscope électronique à balayage (MEB) de la structure fabriquée, accompagnée de la caractérisation expérimentale des pertes de propagation, comprises entre 1 et 2 dB/cm dans la gamme de longueurs d'onde de 5 à 7 μm . (b) Circuit photonique complexe dans l'infrarouge moyen réalisé à l'aide de guides d'onde en silicium sub-longueur d'onde : spectromètre intégré à transformée de Fourier permettant une restitution spectrale autour de 5,5 μm , correspondant à une longueur d'onde record pour des circuits photoniques complexes en silicium dans l'infrarouge moyen [1].

une source optique accordable ou encore la mise en œuvre d'un système à double peigne de fréquence optiques.

LA PHOTONIQUE SILICIUM POUR L'INFRAROUGE MOYEN: UTILISATION DES TECHNOLOGIES CMOS

La photonique sur silicium (Si) basée sur la plateforme silicium-sur-isolant (SOI) s'est imposée comme la technologie dominante pour les télécommunications optiques, grâce à sa compatibilité avec des procédés de fabrication CMOS matures, son fort contraste d'indice et son potentiel pour une production à grande échelle à faible coût. Le contraste d'indice élevé entre le silicium ($n \approx 3,44$) et la silice ($n \approx 1,44$) permet un confinement optique important et une forte densité d'intégration, rendant la

plateforme SOI particulièrement adaptée à la réalisation de circuits photoniques complexes.

Le silicium présente par ailleurs une large fenêtre de transparence s'étendant jusqu'à environ 8 μm , ce qui en fait une plateforme prometteuse pour la photonique dans l'infrarouge moyen. Toutefois, l'exploitation de la plateforme SOI dans ce domaine spectral est fondamentalement limitée par l'absorption de la couche d'oxyde enterrée (BOX), qui devient significative au-delà de longueurs d'onde de l'ordre de 3,5–3,6 μm . Les approches reposant sur l'augmentation des dimensions des guides d'onde permettent de réduire le recouvrement modal avec la silice absorbante, mais au prix d'une interaction diminuée avec le milieu environnant, ce qui limite leur pertinence pour les applications de détection.

Les plateformes de guides d'onde en silicium suspendus offrent une solution efficace à cette limitation en supprimant la couche de silice sous-jacente et en la remplaçant par de l'air. Cette approche permet d'exploiter pleinement la fenêtre de transparence du silicium tout en conservant la compatibilité avec des procédés de fabrication standard. En particulier, les guides d'onde conçus à base de réseaux sub-longueur d'onde (SWG) introduisent des régions en métamatériau assurant simultanément le confinement optique, la stabilité mécanique et l'accès nécessaire au retrait sélectif de la couche BOX (voir Fig. 1a). Les structures obtenues combinent ainsi un fort contraste d'indice (silicium/air), de faibles pertes de propagation et une grande flexibilité de conception.

Les guides d'onde en silicium suspendus à gaine SWG ont démontré de faibles pertes de propagation dans l'infrarouge moyen, avec des valeurs de l'ordre de 1-2,5 dB/cm dans la gamme de longueurs d'onde 5-7 μm . Ces performances constituent une avancée significative par rapport aux approches SOI conventionnelles dans ce domaine spectral et permettent la réalisation de systèmes photoniques fonctionnels et évolutifs dans l'infrarouge moyen.

En s'appuyant sur ces propriétés, des circuits photoniques complexes ont été réalisés sur cette plateforme pour des applications de spectroscopie. En particulier, un spectromètre à transformée de Fourier à hétérodyne spatiale (SHFSTS) a été démontré, opérant dans la gamme de longueurs d'onde 5-6 μm [1]. Le dispositif, basé sur un réseau d'interféromètres de Mach-Zehnder présentant des différences de chemin optique variables, illustré en Fig. 1b, atteint une résolution spectrale de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres sur une bande passante de plusieurs centaines de nanomètres. Cette démonstration met en évidence le potentiel de la photonique sur silicium suspendu sub-longueur d'onde pour la spectroscopie d'absorption intégrée, en combinant large bande spectrale, compacité et compatibilité avec des procédés de fabrication à grande échelle.

Dans l'ensemble, les guides d'onde en silicium suspendus nanostructurés à l'échelle sub-longueur d'onde constituent

une technologie clé pour la photonique intégrée dans l'infrarouge moyen, ouvrant de nouvelles perspectives en détection, imagerie et communications optiques en espace libre, tout en conservant les avantages d'une fabrication à grande échelle basée sur le silicium.

LES ALLIAGES SIGE POUR LES PLUS HAUTES LONGUEURS D'ONDE

Les circuits photoniques utilisant la plateforme SOI présentent un avantage indéniable lié à la compatibilité avec des technologies déjà industrialisées. Cependant une grande partie du spectre de l'infrarouge moyen est inaccessible quand la lumière est guidée dans le silicium, en raison de l'absorption multiphonon au-delà de 8 μm .

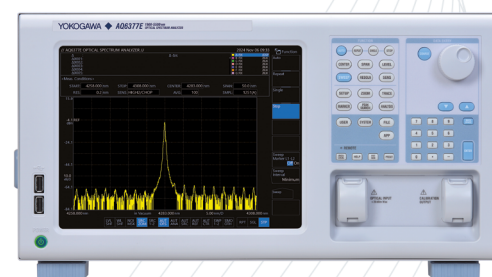
En parallèle il est intéressant de noter que le Germanium (Ge), un semi-conducteur largement utilisé en photonique silicium, notamment pour son absorption dans le proche infrarouge, est transparent sur une large gamme spectrale, de 1,9 à 15 μm de longueur d'onde. De nombreux travaux sont donc menés pour développer des structures intégrées photoniques à base de Ge ou d'alliages SiGe, en utilisant différentes plateformes : Ge sur Si, Ge sur SOI, SiGe sur Si, SiGe graduel, etc.... Parmi les avantages attendus, outre la gamme spectrale de transparence, on peut noter que le Ge possède un indice de réfraction élevé de l'ordre de 4 qui permet un confinement important du champ électromagnétique et un indice non linéaire Kerr élevé, de deux ordres de grandeur supérieur à celui du nitrure de silicium couramment utilisé pour des applications d'optique non linéaire.

Cependant un défi majeur est lié à la différence de paramètre de maille entre le Ge et le Si, couramment utilisé comme substrat. C'est cette raison qui a poussé au développement des structures graduelles à base d'alliage SiGe, comme représenté sur la Figure 2a. Sur un substrat Si, une croissance épitaxiale de SiGe, dont la concentration en Ge augmente progressivement lors de la croissance, permet une adaptation progressive du paramètre de maille, et l'obtention d'une couche supérieure en Ge ou en SiGe riche en Ge, de bonne qualité cristalline. Par ailleurs, l'indice de réfraction du SiGe étant ●●●

Caractérisation avancée des sources laser IR & QCL

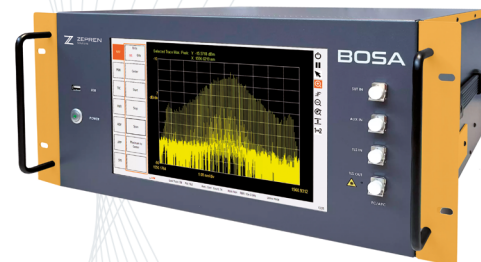
Analyse spectrale MWIR, cohérence et mesure de phase

YOKOGAWA 



AQ6377E : Analyse spectrale MWIR jusqu'à 5,5 μm .

 **ZEPREN**
Solutions



BOSA : Mesure haute résolution, phase et polarisation.



INFOS 

www.wavetel.fr
about@wavetel.fr

 ARAGON PHOTONICS

YOKOGAWA 

QUANTIFI PHOTONICS

 ZEPREN Solutions

 ACTIVE TECHNOLOGIES

FIBERPRO

etsc

 LIGHTEL

 FBG KOREA

 SHINHU
SHINHU - CONNECTING FUTURE

 LOFIN

 Bktel
photonics

croissant avec la concentration en Ge, la structure graduelle permet également une variation graduelle de l'indice de réfraction, et un confinement optique en haut du guide, là où la teneur en Ge est la plus grande.

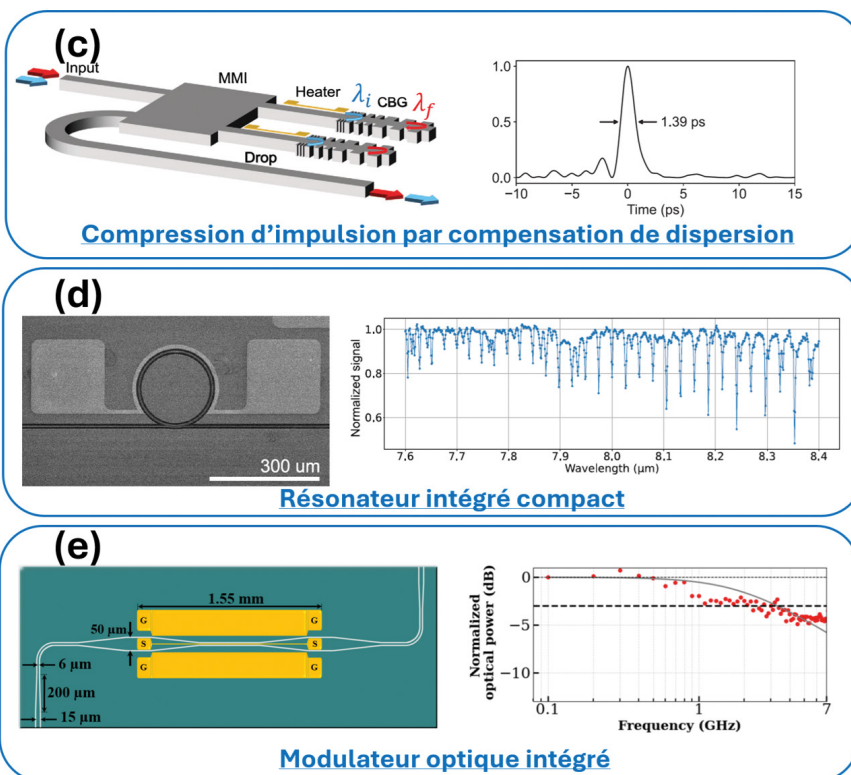
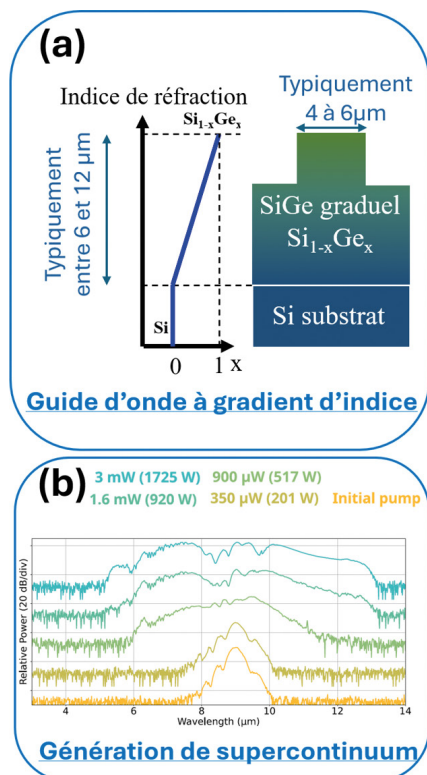
Ce type de circuits photoniques est développé depuis plusieurs années et un ensemble de composants a été démontré, montrant les performances de ces guides d'onde pour la photonique dans l'infrarouge moyen, principalement pour les longueurs d'onde au-delà de 7-8 μm où les plateformes Si ne sont plus adaptées. À titre d'exemple il a été montré que le fort coefficient non linéaire permet un élargissement spectral d'un train d'impulsion (génération de supercontinuum) et qu'une puissance moyenne de l'ordre du milliwatt était suffisante pour générer un signal couvrant plus d'une octave, de 6 à 12 μm de longueur d'onde (Figure 2b) [2]. Par ailleurs, l'ingénierie des guides et de la dispersion dans des miroirs de Bragg « chirpés » a permis de compenser la dispersion de source laser QCL à peigne de fréquence, permettant la génération d'impulsions temporelles (Figure 2c) [3]. Des résonateurs

compacts (anneaux de rayon 100 μm) ont également démontré de bonnes performances au-delà de 8 μm de longueur d'onde (Figure 2d) [4]. Finalement des modulateurs optiques ont été développés, et une bande passante de plus de 3 GHz a pu être obtenue (Figure 2e) [5]. Ces modulateurs utilisent la variation du coefficient d'absorption par variation de densité de porteurs libres dans des diodes intégrées dans les guides d'onde.

Ces exemples montrent la versatilité et les performances de la plateforme photonique à base d'alliages SiGe pour l'infrarouge moyen. Différents blocs de base ont pu être démontrés ces dernières années et chacune de

ces fonctions pourra être utile pour la réalisation de systèmes spectroscopiques. Les sources à supercontinuum sont des sources large bande permettant l'analyse simultanée de plusieurs molécules ayant des raies d'absorption à différentes longueurs d'onde dans l'infrarouge moyen. La compression temporelle d'impulsion optique permet d'envisager dans le futur le pompage de ces sources à supercontinuum par des lasers à cascades quantiques compacts. Quand aux résonateurs en anneau et aux modulateurs optiques, ce sont deux éléments clés pour la réalisation de peignes de fréquence optiques, qu'il soient obtenus par effet Kerr ou par génération électro-optique.

Figure 2. Circuits photoniques intégrés utilisant les alliages SiGe. (a) Vue schématique des guides d'onde utilisés : une couche graduelle de SiGe à partir du substrat Si permet le confinement optique dans la région supérieure du guide ; (b) Génération de supercontinuum optique par effet non-linéaire dans le guide. Un signal couvrant plus d'une octave, de 6 à 12 μm de longueur d'onde est obtenu pour une pompe d'entrée à 9 μm de longueur d'onde, de puissance moyenne de l'ordre de 1 mW [2]; (c) La compensation de dispersion dans des miroirs de Bragg « chirpés » est utilisée pour comprimer temporellement des signaux optiques issus de sources QCL [3]; (d) des résonateurs intégrés compacts fonctionnent sur une large bande spectrale, de 7.6 à 8.4 μm de longueur d'onde [4]; (e) des modulateurs optiques utilisant la variation de coefficient d'absorption par variation de densité de porteurs libres fonctionnent avec une bande passante supérieure à 3 GHz [5].



Par ailleurs au fur et à mesure de ces travaux, différents challenges scientifiques et techniques ont été mis en évidence et surmontés. A titre d'exemple, les composants commerciaux existants pour les bancs de caractérisation sont bien moins développés dans l'infrarouge moyen que dans l'infrarouge proche, ce qui limite les possibilités pour faire des mesures à haute résolution spectrale sur une large gamme spectrale. Pour surmonter ce défi, des techniques innovantes ont été proposées et développées, permettant par exemple, dans le cas des résonateurs compacts, de faire varier la phase de l'onde dans l'anneau et non la longueur d'onde du laser incident pour décrire et caractériser les pics de résonance. Cette technique est maintenant largement utilisée [4].

LES CIRCUITS PHOTONIQUES À BASE DE MATÉRIAUX III-V ET LA COMPATIBILITÉ AVEC LES SOURCES LASER QCL

Les circuits photoniques utilisant la plateforme à base de matériaux semiconducteurs à gap direct (III-V) présentent, quant à eux, l'avantage d'être compatible en termes de filière technologique avec les composants optoélectroniques développés dans l'infrarouge moyen comme des sources que sont les lasers à cascade quantique ou encore des détecteurs photoniques que sont les QWIP ou QCD. Ces matériaux offrent aussi des fenêtres de transparences couvrant la quasi-totalité de l'infrarouge moyen. Ils offrent aussi des coefficients non-linéaires comparables à d'autres plateformes. Par ailleurs les composants optoélectroniques opérant dans l'infrarouge moyen, en contraste aux composants existants aux plus courtes longueurs d'onde étaient, jusqu'il y a quelques années, essentiellement développés dans des systèmes en espace libre. Il y a un effort récent de la communauté scientifique pour proposer des versions intégrées/intégrables offrant ainsi des solutions plus compactes, plus simples et moins chères à produire pour répondre aux nouveaux enjeux dans les domaines de la détection et de la spectroscopie pour l'environnement et la santé.

La figure 3a présente les résultats récents [6] concernant des guides d'onde à faibles

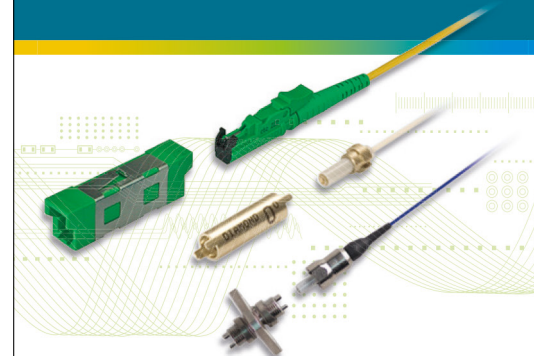
pertes dans l'infrarouge moyen formés de matériaux $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ sur InP, développés par épitaxie en phase vapeur métal-organique (MOCVD/MOVPE). Ce résultat est confirmé par une caractérisation complète des pertes de propagation optique dans ce système à des longueurs d'onde représentatives des deux fenêtres atmosphériques ($4,6 \mu\text{m}$ et $8,5 \mu\text{m}$). Nos résultats suggèrent que la plateforme $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ sur InP constitue un système prometteur pour démontrer des peignes de fréquences Kerr dans l'infrarouge moyen, avec à long terme l'avantage supplémentaire d'une intégration complète avec des composants actifs tels que les lasers et détecteurs à cascade quantique. La conception des guides passifs a été optimisée avec un empilement offrant un confinement optimal et un fonctionnement monomode. Aussi, une attention particulière est faite pour minimiser les sources de pertes liées aux absorptions intrinsèques des matériaux utilisés mais aussi aux sources de pertes liées aux paramètres géométriques des guides. Pour évaluer les performances de cette plateforme InP, des mesures de pertes ont été réalisées sur des guides d'onde diélectriques en spirale de différentes longueurs ($1,77 \text{ cm}$, $3,77 \text{ cm}$ et $5,22 \text{ cm}$, répétés trois fois sur la même puce).

La fabrication commence par le dépôt d'un masque dur SixNy par PECVD. Les guides sont ensuite définis par lithographie électronique (EBL), puis le motif est transféré dans le masque par gravure ionique réactive (RIE). La structure semi-conductrice est gravée par ICP-RIE utilisant une chimie HBr/O_2 . Enfin, le masque est retiré dans de l'acide fluorhydrique pur, puis l'échantillon est clivé pour obtenir des facettes propres. Les pertes ont été mesurées à l'aide de deux lasers à cascade quantique (DFB-QCL) émettant à $8,5 \mu\text{m}$ et $4,6 \mu\text{m}$. La longueur d'onde est ajustée en modifiant finement le courant du laser.

Les pertes sont déterminées à partir des oscillations Fabry-Perot dues aux facettes clivées. Elles sont reliées aux maxima et minima de transmission [6]. À une longueur d'onde de $8,5 \mu\text{m}$, on obtient des valeurs de pertes de l'ordre du dB/cm et des pertes de moins de $0,3 \text{ dB/cm}$ à une longueur d'onde de $4,6 \mu\text{m}$. Ces résultats valident la plateforme InP gravée ●●●

2BLighting Technologies

High performance and reliable fiber optic assemblies



PM+

Ultra high Polarization Extinction Ratio (PER)

- Up to +4dB higher PER
- State-of-the-art insertion Loss (IL) and Return Loss (RL) values
- Best connector type and tolerance E-2000®, DMI, Mini AVIM® and Micro AVIM®
- Available on homologated fibres and cables

16W



E-2000® PS+

Contact expanded beam

- Low loss
- Interlock solution optional
- 1310-1550nm or 980-1060nm

100W



E-2000® PSm

Contact pump laser connector

- Low loss
- Interlock solution optional
- MM 105 0.22NA (MM 200 0.22NA optional)



www.2blighting.fr

info@2blighting.com

+33 1 64 59 21 30

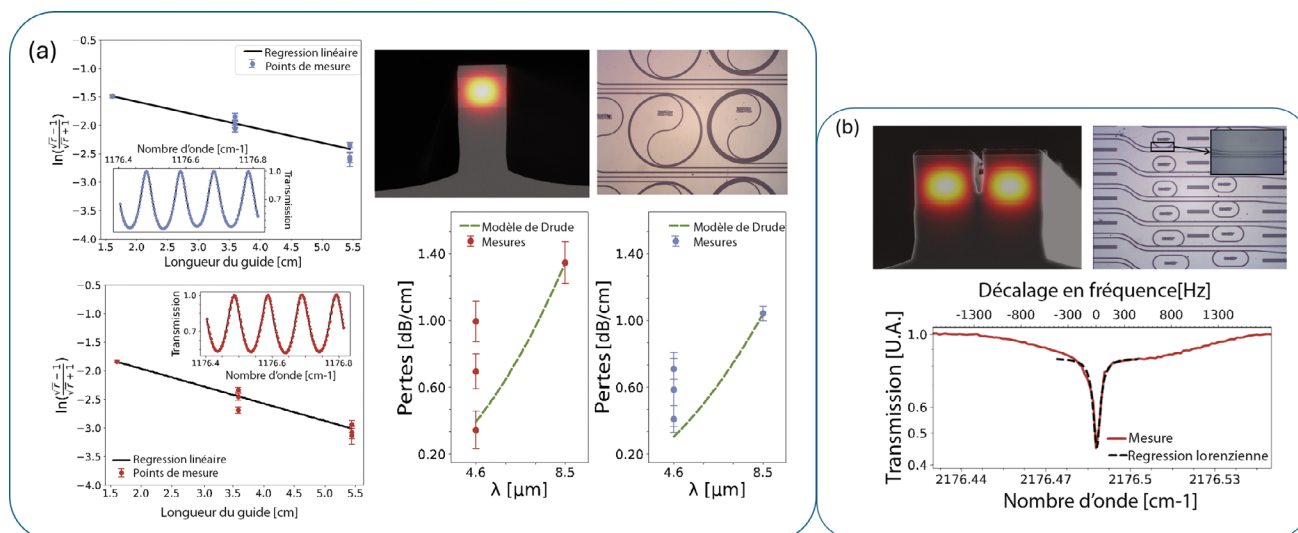


Figure 3. Circuits photoniques intégrés utilisant des matériaux semiconducteurs III-V, le système de matériaux InGaAs/InP sur un substrat d'InP. (a) Résultats obtenus sur des guides passifs pour la mesure des pertes de propagation linéaire à des longueurs de 8.5 μm et 4.6 μm. (b) Résultats des cavités en anneaux avec des hauts facteurs de qualité utilisant des coupleurs évanescentiels.

ICP comme système à faibles pertes pour les circuits photoniques mid-IR. Les étapes de désoxydation jouent un rôle clé, notamment pour la polarisation TE.

La figure 3b montre les mesures des facteurs de qualité des résonateurs de type « racetrack » à une longueur d'onde de 4,6 μm, obtenues à partir de mesures de transmission de guides d'onde couplés aux résonateurs, en polarisation TM. Les mesures ont été réalisées en ajustant spectralement l'émission d'un laser à cascade quantique DFB par le courant d'injection. La largeur à mi-hauteur (FWHM) de la résonance mesurée n'est que de 101 MHz, ce qui correspond à un facteur de qualité chargé de $6,4 \times 10^5$ (ce qui correspond à un facteur de qualité intrinsèque de $7,4 \times 10^5$).

Il s'agit d'une valeur record pour des résonateurs à ultra-haut facteur de qualité sur une plateforme semi-conductrice III-V. De plus, cela correspond à des pertes dans le guide d'onde de 0,24 dB/cm, en excellent accord avec les mesures obtenues par la méthode de Fabry-Perot.

Des marges d'amélioration existent encore pour réduire les pertes de propagation, notamment via un dopage au fer. En effet, contrairement à d'autres travaux de la littérature, la gaine supérieure en InP et le cœur en InGaAs n'ont pas été dopés au fer dans cette étude, ce qui laisse entrevoir un potentiel d'optimisation supplémentaire.

CONCLUSION

Trois approches complémentaires pour le développement de circuits photoniques dans l'infrarouge moyen ont été présentées. La photonique silicium « classique » utilise les techniques déjà développées industriellement pour couvrir la bande spectrale jusqu'à 7 μm de longueur d'onde. L'utilisation du germanium et des alliages SiGe permet d'étendre la plage de fonctionnement jusque 10-12 μm, et notamment de couvrir les gammes spectrales autour de 8 μm où les lasers QCL sont très performants. Enfin les circuits photoniques à base de matériaux III-V fonctionnent dans la même gamme de longueur d'onde et présentent une compatibilité naturelle avec les sources QCL.

Ces trois approches sont actuellement développées dans les laboratoires, avec de très bonnes performances en terme de pertes de propagation et de développement de fonctions optiques. L'application principale de cette gamme spectrale concerne la spectroscopie optique. Parmi les challenges à résoudre avant de voir le développement de solutions commerciales, on peut retenir des challenges techniques

et technologiques (intégration des sources lasers, développement d'outils de caractérisation dans ces gammes de longueur d'onde, etc...), mais on peut aussi noter un challenge plus applicatif, lié à la diversité des applications potentielles (détection de gaz, analyse de polluants dans des liquides, etc...), avec chacune des spécifications différentes en terme de longueur d'onde, gamme spectrale ou résolution. Il est probable que de grandes applications « phares » doivent être définies pour diriger le développement de futurs systèmes intégrés pour la spectroscopie dans l'infrarouge moyen. ●

RÉFÉRENCES

- [1] T. T. D. Dinh *et al.*, *Opt. Lett.* **47**, 810 (2022)
- [2] V. Turpaud *et al.*, *APL Photonics* **10**, 090804 (2025)
- [3] H. Dely *et al.*, *Opt. Express* **33**, 39715 (2025)
- [4] A. Bricout *et al.*, *Laser Photon. Rev.* **20**, e01485 (2025)
- [5] J. Huertas-Pedroche *et al.*, *Opt. Express* **33**, 42408 (2025)
- [6] L. Lucia *et al.*, *APL Photonics* **11**, 036108 (2026)