

PHOTONIQUE SUR SILICIUM : des réseaux à fibres au traitement optique de données

Christophe KOPP^{1*}
Stéphane BERNABE¹
Mohand ACHOUCHE²
Sébastien LE BEUX³

¹Univ. Grenoble Alpes, CEA LETI,
38000 Grenoble, France

²III-V Lab, 91767 Palaiseau, France

³Dept. of Electrical and Computer
Engineering Concordia University
Montreal, Quebec, Canada

*christophe.kopp@cea.fr

La technologie photonique intégrée sur silicium s'est développée depuis les années 2000 avec comme objectif principal de répondre au besoin croissant du réseau internet en composants d'émission et de réception à très haut débit sur fibre optique. Aujourd'hui, plusieurs fonderies proposent des plateformes matures et des produits sont commercialisés. Une nouvelle génération technologique est développée afin d'élargir les domaines d'application de la transmission au traitement optique de données.

La photonique sur silicium regroupe l'ensemble des technologies visant à intégrer des circuits en optique guidée sur une plateforme (wafer) de silicium en utilisant les moyens de fabrication de la microélectronique. Ainsi, ces circuits peuvent regrouper et connecter plusieurs dizaines, centaines, milliers de composants passifs (guide, filtre, multiplexeur...) et actifs (photodétecteur, modulateur...)

sur une même puce de quelques cm² (figure 1). Aujourd'hui, la plateforme la plus utilisée est le SOI (*silicon on insulator*) qui permet d'obtenir un très fort niveau d'intégration grâce à des guides ayant un cœur de dimension submicronique. Par ailleurs, une telle plateforme bénéficie du développement des équipements et procédés dans les fonderies microélectroniques, avec notamment la possibilité d'intégrer de nouveaux

matériaux et la réduction des dimensions critiques réalisables. Ce potentiel d'évolution technologique permet à la fois d'améliorer les performances des circuits utilisés pour les réseaux à fibres optiques, mais également d'adresser de nouvelles applications. Cet article présente l'offre actuelle disponible à travers le monde, les axes d'innovation technologique, et les applications visées.

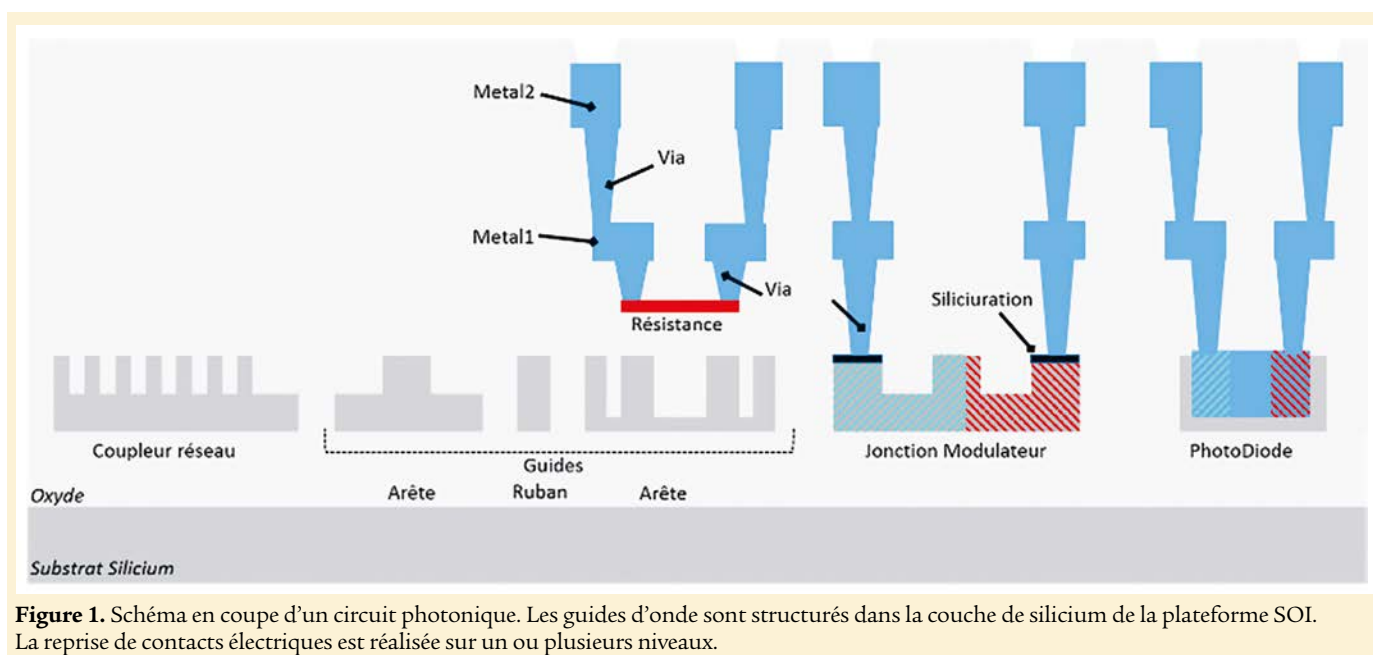


Figure 1. Schéma en coupe d'un circuit photonique. Les guides d'onde sont structurés dans la couche de silicium de la plateforme SOI. La reprise de contacts électriques est réalisée sur un ou plusieurs niveaux.

Laser Accordable à Haute Performance



L'innovation depuis 1979

Lasers accordables disponibles de 1260 à 1680nm, pour vos applications de guides d'ondes et de caractérisation de composants optiques.

SANTEC EUROPE LIMITED

Tel: +44-20-3176-1550

Grand Union Studios,
332 Ladbroke Grove,
London, W10 5AD, UK

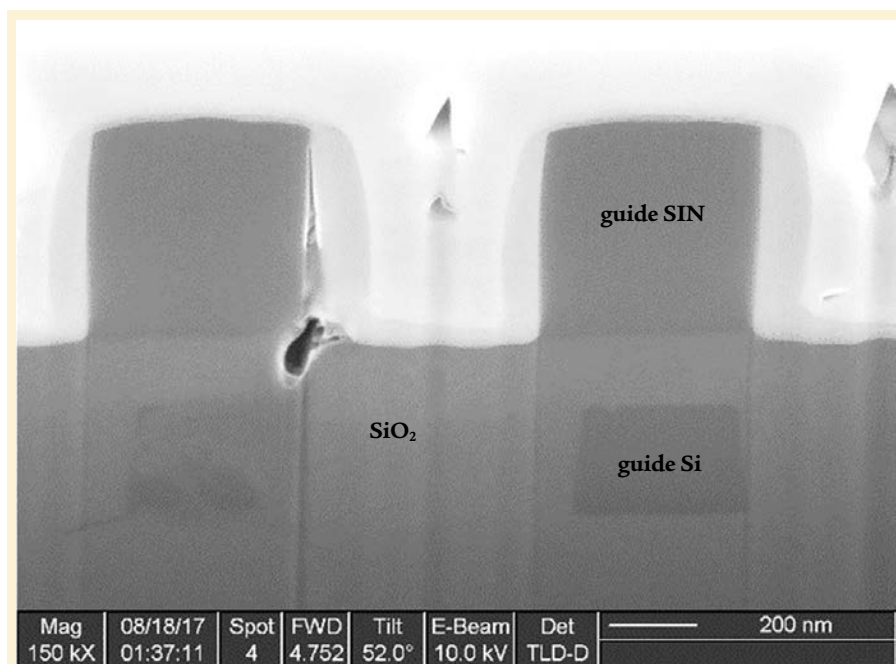


Figure 2. Vue en coupe d'un guide en nitrure de silicium au-dessus d'un guide en silicium.

Un réel niveau de maturité

Large offre de fonderies

Initiée dans les années 1980, puis utilisée dans des produits commerciaux au tournant du siècle (Bookham, puis Luxtera), la fabrication de circuits photoniques s'est largement diffusée : des piliers des hautes technologies, tels Intel et Cisco, utilisent cette technologie pour réaliser des composants de transmission de données optiques dans les data centers. D'autres industriels proposent des services de fonderie permettant de faire fabriquer des circuits photoniques sur wafers 8 pouces (Towerjazz, Advanced Micro Foundry, IHP) ou 12 pouces (GlobalFoundries). Les acteurs de la R&D proposent également ce type de service : c'est le cas du CEA-Leti en France (offre commercialisée par CMP), de l'Imec en Belgique, ou d'AIM aux États-Unis. Dans tous les cas, plusieurs fabrications de type Multiprojet (MPW pour *multi project wafer*) ont lieu chaque année, chaque wafer comprenant les contributions de plusieurs clients. Ces derniers achètent les circuits à un prix calculé au prorata de la surface occupée sur le wafer.

Des PDK performants

Chaque fondeur met à disposition de ses clients un *process design kit* (PDK) : « boîte à outils » avec un manuel d'aide à la conception (DRM - *design rule manual*) et une librairie de composants existants, éventuellement paramétrables par l'utilisateur, et de modèles associés permettant de réaliser de la simulation haut niveau de circuits complexes. Évidemment, chaque PDK proposé est spécifique au fondeur et aux particularités de son procédé de fabrication. Les PDK proposés se déclinent en plusieurs versions utilisables dans les environnements de conception proposés par les grands noms de l'automatisation et de la conception électronique (par exemple Mentor Graphics). Ces éditeurs de logiciels dits EDA (*electronic design automation*) ont ainsi modifié leurs outils de dessin et de diagnostic d'erreurs pour les adapter aux spécificités géométriques des composants photoniques. La plupart d'entre eux travaillent actuellement en symbiose avec des éditeurs de logiciels de simulation optique (par exemple Lumerical) afin de proposer conjointement des modèles électro-optiques fiables de chaque

composant, relatifs à une fondere donnée.

Le contenu des PDK proposés contient généralement les composants passifs nécessaires au routage optique et à la connexion des circuits photoniques (guides, transitions, croisements, coupleurs, filtres...) ou à des opérations sur la longueur d'onde, la phase ou la polarisation de la lumière (multiplexeurs, interféromètres, séparateurs de polarisation) ; ainsi que des composants dits « actifs » : modulateurs, photodiodes, etc. Ces bibliothèques de composants se déclinent généralement sur les deux bandes de longueur d'onde traditionnelles des transmissions sur fibres optiques : bande O (1260–1360 nm) et bande C (1530–1565 nm).

Vers un plus haut niveau d'intégration

Circuits multicouches optiques

Comme en électronique, la superposition de couches optiques sur un même circuit offre une nouvelle dimension aux concepteurs. Elle permet évidemment d'augmenter la densité et de simplifier le routage optique, mais également de concevoir des composants sur plusieurs niveaux. Une version déjà disponible consiste à superposer un niveau de guides en nitrure de silicium avec le niveau guides silicium (figure 2). Un très bon couplage est obtenu entre ces niveaux avec moins de 0,1 dB de pertes d'insertion. Ainsi, certaines fonctions sont avantageusement réalisées dans le nitrure de silicium qui présente une sensibilité à la température 10 fois inférieure. De même, avec un confinement

moins fort (diamètre de mode 1 μm), des composants comme les multiplexeurs ou les diviseurs sont plus robustes et présentent moins de pertes.

Dimension critique plus agressive avec la photolithographie à immersion

La taille croissante des circuits et les exigences de nouveaux besoins (calcul quantique, transmission de clés de cryptage quantique) demandent de diminuer encore les pertes de propagation dans les guides optiques. Des progrès significatifs ont été obtenus. Les pertes, de l'ordre de 2 dB/cm il y a quelques années, ont été ramenées à 0,12 dB/cm par la mise au point de procédés de recuit aboutissant à une diminution drastique de la rugosité des guides (travaux IRT NANOEEC). Une autre étape consiste à introduire la lithographie à immersion sur wafer 12 pouces : cette technologie permet d'augmenter la résolution de la lithographie grâce à une adaptation d'indice entre le masque et le wafer via un bain aqueux, ce qui augmente l'ouverture numérique. Cette évolution permet d'améliorer la qualité des motifs avec la définition de motifs de moins de 100 nm et un alignement entre 2 niveaux inférieur à 30 nm.

Intégration III-V pour les composants actifs

Les applications télécom et datacom nécessitent des circuits photoniques intégrés contenant jusqu'à des milliers de composants photoniques. Ceux-ci s'appuient encore sur une source laser externe. L'intégration hétérogène du laser directement sur silicium est

une solution clé pour cette filière. Elle consiste à intégrer, par collage moléculaire, une couche de matériau à gain de type III-V pour réaliser un pompage électrique du laser avec un fort rendement de conversion. L'approche suivie au III-V Lab est représentée en figure 3 pour un laser accordable en longueur d'onde.

Ce laser accordable est constitué d'une section à gain en matériaux III-V, d'adaptateurs de modes adiabatiques entre le guide silicium et la section III-V, de miroirs gravés dans le SOI de part et d'autre de la cavité et d'un système de filtrage constitué d'anneaux. Basés sur l'effet Vernier, ces deux résonateurs en anneau permettent de sélectionner un mode Fabry-Pérot spécifique et unique de la cavité. Une plage d'accord record de 90 nm est obtenue avec un taux de suppression des modes secondaires de plus de 40 dB et une puissance optique couplée de plus de 10 mW [3].

De la transmission au traitement optique de données

Télécom, datacom

Les transmissions optiques télécom et datacom représentent le premier domaine applicatif ayant donné lieu à des produits commerciaux utilisant cette technologie. En effet, la photonique sur silicium permet de réaliser des circuits de type transmetteur et récepteur à l'échelle d'une puce unique d'environ 5×5 mm² réalisant un débit de 100 à 400 Gbps. Ces circuits photoniques, contenant des modulateurs et des photodétecteurs haut débit (25 Gbps et plus par canal) associés en parallèle ou multiplexés en longueur d'onde, sont

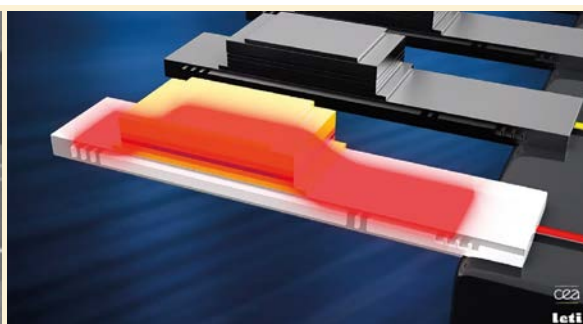
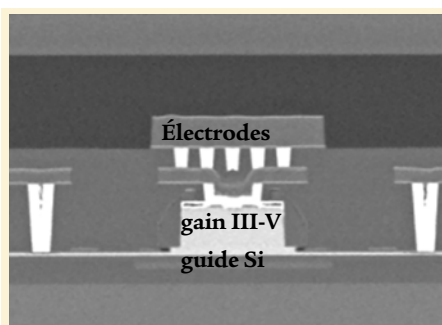


Figure 3. Structure schématique d'un laser accordable III-V / Si réalisé par intégration hétérogène (à gauche). La zone de gain est réalisée dans le III-V. La cavité optique est définie dans le silicium. Illustration (à droite) de la propagation de l'onde lumineuse (en rouge) dans une structure laser hétérogène III-V/Si.

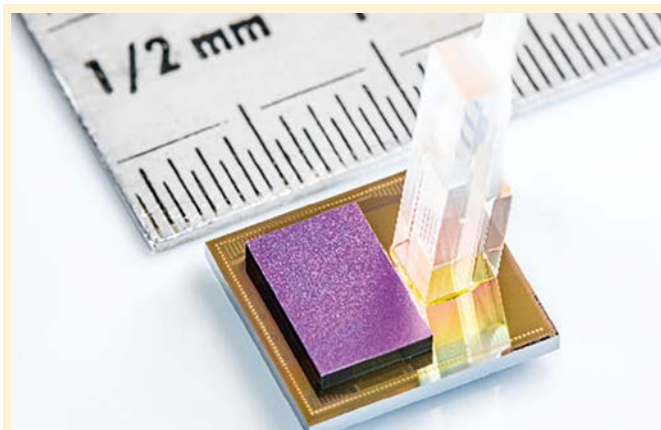


Figure 4. Moteur optique avec une puce photonique surmontée d'une puce électronique de pilotage et d'un ruban de fibres optiques.

associés intimement avec des électroniques de commande rapide grâce à la technologie de report flip-chip (figure 4).

Outre la possibilité de fabriquer ce type de composant en gros volume, la photonique silicium se distingue par sa faculté à pouvoir augmenter la complexité des circuits. Par exemple, les circuits cohérents, utilisant des formats de modulation complexes (PDM-QPSK) qui nécessitent l'association d'un grand nombre de composants, peuvent être intégrés sur une seule puce SOI. La société CISCO commercialise déjà ce type de produit.

Dans un futur proche, l'apparition de *transceivers* utilisant la technologie photonique sur silicium devrait se généraliser avec l'apparition de normes de transmissions optiques à 400 Gbps puis 800 Gbps ainsi que la nécessité de pouvoir compter sur des modules optiques très denses. Ces derniers seront alors co-packagés au bord des puces électroniques de calcul ou de routage. Ainsi, un réseau optique unifié assurera l'ensemble des liens très haut débit dans les systèmes datacom.

Nouvelles applications

L'évolution rapide de la photonique silicium permet déjà de prédire leur utilisation pour toutes les communications, des longues distances (quelques km) aux très courtes distances (quelques cm). Pour le calcul haute performance, ce réseau optique augmentera la bande passante entre les processeurs et les mémoires afin de réduire les temps d'accès qui constituent le principal obstacle à l'augmentation des puissances de calcul. Les principaux défis technologiques sont la maîtrise de la sensibilité thermique des composants et la réduction de leur consommation énergétique. Il est admis qu'une consommation inférieure au pJ/bit/mm est nécessaire pour faire de l'optique intégrée une alternative compétitive. Ceci implique des progrès sur l'ensemble des composants : efficacité des lasers, rapidité des modulateurs, perte de propagation, sensibilité des détecteurs.

Toujours dans le domaine des communications, ces progrès sur les composants permettent d'envisager la manipulation de très faibles flux lumineux jusqu'au photon unique. Ce domaine, la photonique quantique, ouvre notamment

la voie à la transmission sécurisée de clés de cryptage et aux capteurs ultra-sensibles.

Enfin pour le traitement optique de données, les concepteurs se tournent vers des architectures de type « non Von-Neumann » avec la conception de processeurs spécialisés et hétérogènes de par leur technologie et leur structure. Les réseaux de neurones en sont un exemple. Leurs couches, composées de neurones interconnectés par des liaisons pondérées, permettent de réaliser efficacement certaines tâches comme la reconnaissance d'images ou vocale. Une équipe du MIT a déjà mis au point un processeur nanophotonique, nécessitant un circuit optique avec 56 interféromètres de type Mach-Zehnder, dédié à l'intelligence artificielle [4].

Perspectives

En 20 ans, la photonique sur silicium a atteint un premier niveau de maturité industrielle et économique : des produits sont commercialisés pour les infrastructures optiques du réseau Internet, et plusieurs fonderies donnent accès à leurs lignes de production. Sur cette base, un plus fort niveau d'intégration est désormais développé dans les centres de recherche avec plus de couches et de nouveaux matériaux. Ainsi, au-delà des interconnexions optiques, le champ d'application s'élargit dans les domaines du calcul, de la cybersécurité, des capteurs et de la santé.

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] C. Kopp, S. Bernabé, C. Baudot, G.-H. Duan, Photonique sur silicium - composants pour réseaux à fibres optiques. Techniques de l'Ingénieur (2018)
- [2] C. Kopp, S. Olivier, S. Bernabe, Silicon photonics: light is the ultimate medium for high-speed communications. photonics.com (2019)
- [3] H. Elfaiki et al., Ultra wide hybrid III-V on silicon tunable laser, Proc. ECOC, We3C1, Roma, Italy, Sept 23-27, 2018
- [4] Y. Shen et al., Deep learning with coherent nanophotonic circuits, Nature Photonics 11, 441 (2017), <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10028356>
- [5] Leti's high performance computing design utilizes robust WDM optical links on photonic interposers, PIC magazine, <https://picmagazine.net/>

**Votre partenaire pour
l'optique de précision et pour
vos systèmes optiques**

SPECTROS SA 4107 Ettingen Suisse Tel.+41 61 726 20 20

www.spectros.ch **SPECTROS OPTICAL SYSTEMS**