

INTÉGRATION III-V SUR SILICIUM DE LASERS PRÉSENTANT UN RECORD D'ACCORDABILITÉ DE 90 NM ET DES MODULATEURS CAPACITIFS COMPACTS ET EFFICACES POUR LES APPLICATIONS DE TRANSMISSIONS COHÉRENTES

Hajar Elfaiki¹, Pierre Fanneau¹, Christophe Caillaud¹, Joan Manel Ramirez¹, Delphine Néel¹,
Théo Verolet¹, Alexandre Shen¹, Henri Benisty², Mohand Achouche¹,

¹ III-V Lab, joint lab of Nokia / Thales / CEA, 1 A. Fresnel, 91767 Palaiseau Cedex, FRANCE

² Laboratoire Charles Fabry, 2 A. Fresnel, 91767 Palaiseau Cedex, FRANCE

hajar.elfaiki@3-5lab.fr

RÉSUMÉ

Nous démontrons une accordabilité de 90 nm sur des lasers III-V (MQW InGaAlAs) sur silicium par effet Vernier d'un filtre à doubles anneaux. Nous avons également conçu des modulateurs capacitifs hybrides III-V sur silicium. L'effet d'accumulation des charges permet d'obtenir dans un interféromètre MZ d'un $V_{\pi}L_{\pi}$ de 0.22 V.cm.

MOTS-CLEFS : *photonique sur silicium ; intégration hybride III-V sur silicium ; laser accordable ; modulateur Mach-Zehnder*

1. INTRODUCTION

La plateforme silicium (Si) a démontré de haut niveaux d'intégration à faibles coûts qui ont dépassé toutes les limitations dans le domaine de la micro-électronique CMOS. On utilise aujourd'hui cette plateforme pour développer des circuits photoniques intégrés (PIC) miniatures, et à faibles coûts, en tirant profit de la maturité des fonderies CMOS. La plateforme silicium sur isolant (SOI) offre un large éventail de fonctions passives qui tirent avantage du fort contraste d'indice entre le Si et la silice et permet de réaliser des faibles rayons de courbure à très faibles pertes. L'intégration III-V sur Si vient compléter cette plateforme avec des fonctions actives à haute performance utilisant les structures à gain développées et très maîtrisées dans la plateforme InP historique.

Dans le domaine des télécommunications optiques, l'intégration III-V sur Si est idéale pour assurer toutes les fonctions actives et passives nécessaires pour, émettre, moduler, amplifier, et détecter des signaux optiques sur une même puce. Nous présentons ici deux exemples de composants montrant le potentiel de l'intégration III-V sur Si. Le premier est un laser accordable qui a atteint une accordabilité record de $\Delta\lambda=90$ nm avec une puissance de sortie de plus de 10 mW après un SOA intégré, et des largeurs de raie inférieures à 500 kHz. Ce type de laser constitue une brique fondamentale pour les PIC dans les télécommunications optiques de type WDM. Avec des lasers accordables couvrant les bandes S+C+L, on peut atteindre des débits de 115 Tbit/s [1]. Une autre approche utilisant un milieu à gain large en III-V avec cavité externe en silicium, avait permis d'atteindre $\Delta\lambda=95$ nm [2], mais elle peut être limitée par le couplage actif/passif, et augmente les coûts de packaging. Les filtres « à vernier » sont aussi une originalité du design. Les autres approches à réseau de Bragg échantillonnés conduisent à des filtres moins plats et donc difficilement large bande [3]. D'autre part, les transmetteurs cohérents ont besoin de modulateurs efficaces pour diminuer leur consommation électrique et leur taille, et assez rapides pour répondre à la croissance en débit [4]. Nous présenterons aussi une approche récente pour réaliser des mélangeurs en phase et en quadrature, basés sur des modulateurs de phase à effet capacitif, 10 fois plus efficaces que les modulateurs à déplétion courant en photonique sur Si.

2. LASER LARGEMENT ACCORDABLES À EFFET VERNIER ET MIROIRS DE SAGNAC

Pour obtenir le gain dans nos lasers, on utilise une jonction PIN en III-V avec une zone active composée de puits quantiques multiples (MQW). La structure épitaxiée comprend : une couche InP dopée P pour l'injection ; des MQW en quaternaire InGaAlAs, pour le gain ; et une couche InP

dopée N très fine permettant de collecter le courant dans des électrodes latérales. Les fonctions miroirs, phase (ϕ), et filtre à vernier sont réalisées en silicium (Fig 1 a)). Pour transférer le mode entre le guide III-V et le guide silicium, on fait varier la largeur du guide silicium formant un « taper » autorisant un transfert adiabatique de 95 % de la puissance sur une longueur de 150 μm . La Fig 1 c) montre la puissance de sortie d'une puce composée du laser accordable, et d'un amplificateur (SOA) pour booster la puissance. Nous avons mesuré 9 mW de puissance en sortie de la puce avec un détecteur étendu.

Ce laser montre une plage d'accordabilité exceptionnelle de $\Delta\lambda = 90 \text{ nm}$ (Fig 1 d)). Le filtre à double anneaux à vernier est un élément clé du design. Pour avoir un large « effet vernier », il faut concevoir des anneaux de petite taille. On identifie déjà une difficulté pour la fabrication liée à la dimension des anneaux. Par ailleurs, il faut concevoir un filtre assez sélectif pour un fonctionnement monomode en plus d'avoir la large accordabilité. La largeur à mi-hauteur d'un filtre en anneau (FWHM) est proportionnelle à son coefficient de couplage, et elle est inversement proportionnelle à sa taille. En réduisant la taille des anneaux on doit augmenter le coefficient de couplage pour compenser l'élargissement de la résonance. Ceci peut provoquer des effets non-linéaires de type « absorption à deux photons ». C'est une des hypothèses qui pourrait expliquer les modes manquants pour les longueurs d'onde inférieures à 1540 nm [3].

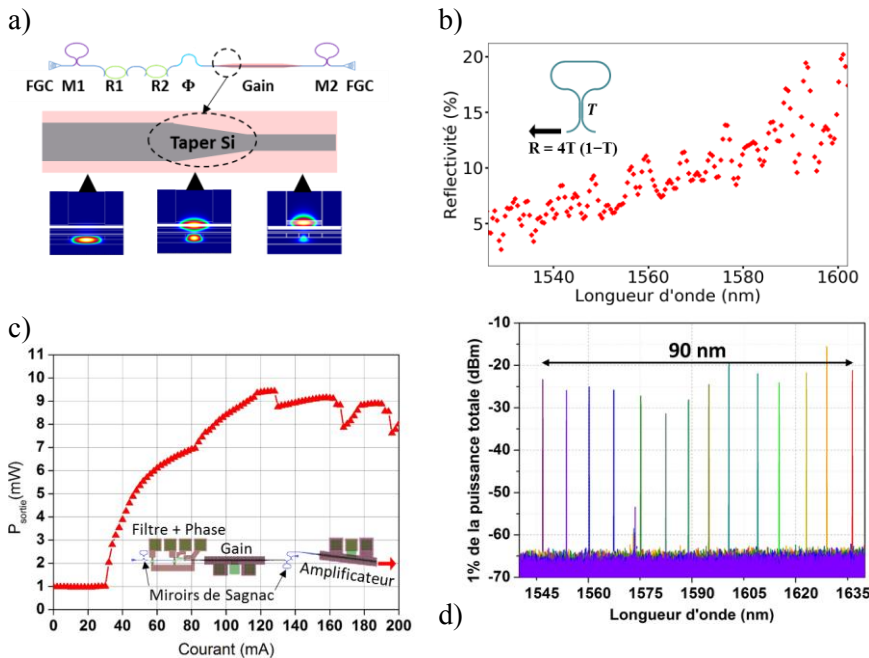


Figure 1 :
 a) Schéma du laser accordable et simulations modales du taper adiabatique,
 b) Mesure de la réflectivité spectrale d'un miroir de Sagnac.
 c) Puissance de sortie d'un laser accordable boosté par un amplificateur (SOA),
 d) Mesure de l'accordabilité.

Nous avons utilisé des miroirs de Sagnac pour délimiter la cavité. Leur réflectivité étant donnée uniquement par le coefficient de transmission du coupleur directionnel dans la boucle (Fig 1 b)), ces miroirs n'ont pas de pertes en excès. On peut voir sur la Fig. 1 b) la mesure de réflectivité d'un miroir de Sagnac à faible réflectivité pour la bande C. On constate une variation de la réflectivité entre 5 et 18 % entre respectivement 1525 nm et 1600 nm. Cette variation de la réflectivité n'introduit que 0.5 dB de pertes intra-cavité. Ceci reste faible devant les pertes totales de la cavité d'environ 5 dB.

3. MODULATEURS INNOVANTS À BASE DE JONCTIONS CAPACITIVES EN III-V SUR SI

Nous avons développé des modulateurs de phase innovants fonctionnant dans le régime d'accumulation de charge. La jonction capacitive est constituée d'un guide en InGaAsP dopé N, et d'un guide Si dopé P, séparés par 15 nm d'oxyde (Fig 2 a)). Le mode optique se propage de manière hybride dans les deux guides III-V et Si, comme on le voit bien dans la Fig. 2 b). Nous obtenons une transmission optique de 97,2 % transitions comprises sur 250 μm de longueur.

La difficulté est d'arriver au meilleur compromis pour le confinement Γ du mode optique dans la zone d'accumulation, afin d'avoir une efficacité suffisante tout en minimisant les pertes due à l'absorption dans les zones d'accumulation à forte concentration de porteurs de charges. La Fig. 2 c) montre l'évolution de Γ en fonction de la largeur du guide Si. Nous prenons une largeur de $0.7 \mu\text{m}$, ce qui donne un $\Gamma \sim 10\%$ dans les couches d'accumulation. Ceci permet d'obtenir un $V_\pi L_\pi$ de 0.22 V.cm , 10 fois plus faible que celui obtenu avec des modulateurs classiques à déplétion de charges.

Le deuxième défi est de surmonter les pertes électriques dues à l'effet capacitif. L'onde électrique HF voit la capacité, et se trouve ralentie par rapport à l'onde optique. L'efficacité de modulation est donc dégradée car on perd en recouvrement entre les deux ondes. En optimisant le design des lignes de transmission HF, nous avons obtenu des performances prometteuses en simulation, avec des bandes passantes à 3 dB qui peuvent dépasser les 20 GHz (Fig 2 d)).

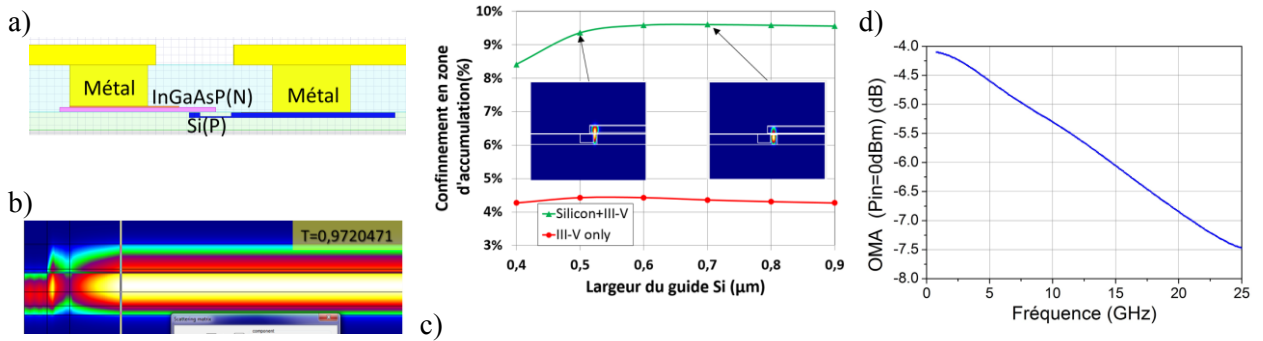


Figure 2 : a) Schéma de la structure verticale du modulateur, b) Simulation de la propagation du mode hybride dans un modulateur de $250 \mu\text{m}$ de long. c) Simulation du confinement du mode hybride dans la zone d'accumulation, d) Mesure de la réponse fréquentielle du modulateur (OMA : Optical Modulation Amplitude)

CONCLUSION

La photonique sur silicium présente des avantages considérables pour développer des transmetteurs rapides, peu encombrants, et peu énergivores. Nous avons démontré grâce à l'intégration III-V sur Silicium des lasers accordables sur $\Delta\lambda = 90 \text{ nm}$, et des modulateurs capacitifs très efficaces, avec 0.22 V.cm de figure de mérite $V_\pi L_\pi$, et des bandes passantes allant jusqu'à 22 GHz. La fabrication des composants présentés a été effectuée dans une ligne pilote (CEA-LETI), où les processus Si sont inspirés des fonderies CMOS. Ceci montre la compatibilité des processus III-V au sein d'une fonderie Si. L'intégration monolithique III-V sur Si tient ainsi ses promesses de développement [4].

RÉFÉRENCES

- [1] J. Renaudier *et al.*, "First 100-nm Continuous-Band WDM Transmission System with 115Tb/s Transport over 100 km Using Novel Ultra-Wideband Semiconductor Optical Amplifiers," (ECOC), Gothenburg, 2017, pp. 1-3
- [2] A. Verdier, "Wideband material for low linewidth widely tunable laser and reach extender for optical access networks," Proc. ECOC, M.1.C.2 (2005)
- [3] S. Dhoore *et al.*, "Demonstration of a discretely tunable III-V-on-silicon sampled grating DFB laser," IEEE PTL, vol. 28, no 21, p. 2343-2346 (2016).
- [4] M. K. Weldon, The Future X Network: A Bell Labs Perspective. CRC Press, 2016.
- [5] H. Elfaïki *et al.*, "Ultra Wide Hybrid III-V On Silicon Tunable Laser," Proc. ECOC, We3C1, Roma, Italy, Sept 23–27. 2018.
- [6] B. Szlag *et al.*, "Hybrid III-V/Si DFB laser integration on a 220 mm fully CMOS-compatible silicon photonics platform," IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 24.1.1-24.1.4 (2017).