

Intégration de laser cascade interbande sur plateforme photonique SiGe par micro transfer-printing

Yannis Billiet* ^{1,2}, Céline Chevalier ¹, Xavier Letartre ¹, Jean-Louis Leclercq ¹, Pierre Cremillieu ¹, Radoslaw Mazurczyk ¹, Christian Grillet ¹, Eric Tournié ², Maxime Lepage ³, Badhise Ben Bakir ³, Vincent Reboud ³, Nicolas Bresson ³, Jean-Michel Hartmann ³, Laurent Cerutti ², Christian Seassal ¹

¹ INL, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, CNRS, 69130 Ecully, France

² IES, Université de Montpellier, CNRS, 34000 Montpellier, France

³CEA-LETI, Minatoc, 38054 Grenoble, France

* yannis.billiet@ec-lyon.fr

RESUME

Nous présentons les résultats préliminaires pour l'intégration d'une source ICL émettant à 4 μm sur une plateforme SiGe par la méthode du micro transfert printing. Des simulations du couplage du laser avec le guide SiGe accompagnent les premières avancées technologiques concernant l'intégration d'une structure émettrice en matériaux antimoniures au sein du circuit intégré SiGe.

1. INTRODUCTION

La génération de peignes de fréquences optiques (combs) dans la gamme du moyen infrarouge (MIR) qui couvre les longueurs d'onde de 3 à 15 μm , offre des perspectives intéressantes pour le développement d'applications variées telles que la spectroscopie, l'environnement, la médecine et la défense. Toutefois, les coûts élevés et la complexité des équipements nécessaires pour mettre en œuvre ces combs limitent actuellement leur utilisation aux laboratoires. Bien que la démonstration de peigne de fréquences sur puce ait récemment relancé l'intérêt pour cette technologie [1], la taille des dispositifs reste importante en raison de l'utilisation de composants discrets (notamment le laser de pompe) fonctionnant en espace libre. Par conséquent, l'intégration d'une source laser sur un circuit optique, au sein duquel l'effet Kerr provoque la génération de nouvelles fréquences optiques, permettrait de réduire considérablement la taille et la consommation des systèmes de production de combs. Dans la gamme de longueurs d'onde de 3 à 6 μm , la technologie ICL (Interband Cascade Lasers) est la plus prometteuse. Ces sources basées sur des recombinaisons interbandes dans des puits quantiques de type-II InAs/GaInSb mis en cascade permettent de réduire considérablement la consommation électrique par rapport aux lasers intrabandes à cascade quantique (QCL)[2]. Après avoir décrit l'enchaînement technologique permettant l'intégration d'une source ICL dans un circuit photonique SiGe/Si, nous présenterons les avancées technologiques réalisées jusqu'ici. Dans une deuxième partie, les simulations électromagnétiques démontrant le

couplage entre ce laser et les guides d'onde intégrés seront exposées.

2. INTEGRATION PAR MICRO-TRANSFER PRINTING DE LA SOURCE ICL

Parmi les différentes approches permettant d'intégrer des sources laser semiconductrices à des dispositifs photoniques de la filière SiGe/Si, l'intégration hétérogène d'hétérostructures actives par collage adhésif (via une couche de BCB) ou moléculaire (SiO₂/SiO₂ en particulier) a atteint un stade de maturité [3]. Dans ce contexte, le report de coupons d'hétérostructures laser par micro-transfer printing (μTP) constitue une variante qui présente des avantages uniques, avec notamment le fait de pouvoir procéder à la réalisation des premières étapes de fabrication des lasers sur leur substrat de départ. L'enchaînement technologique développé pour la réalisation d'ICL sur SiGe/Si par MTP est présenté figure 1.

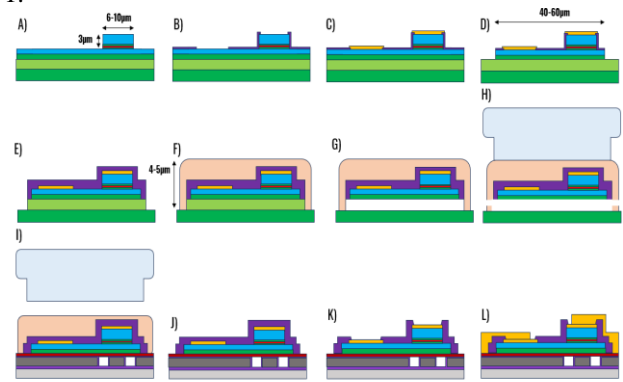


Figure 1 : Procédé d'intégration développé

Il s'agit dans un premier temps de préparer des coupons intégrant un guide d'onde de 6 à 10 μm de large, incluant la zone de gain optique, mais aussi les contacts d'injection électriques supérieur et inférieur (A-D). Les coupons sont protégés latéralement et séparés de leur substrat natif par sous-gravure chimique sélective (E-G). Ils sont ensuite collectés par une « poignée » (H) puis reportés sur le circuit photonique SiGe/Si, en assurant un alignement entre guide émissif et guide SiGe (I). Ces

étapes sont réalisées en utilisant un système initialement dédié au report de puce par flip-chip, et permettant un alignement meilleur que $1\mu\text{m}$. Enfin, les contacts électriques sont reportés latéralement à l'aide de procédés classiques (J-L). La sous-gravure (étape G) et le report (H-I) constituent les étapes critiques de cet enchaînement, et font l'objet d'un développement spécifique. L'étape de sous-gravure (G) a pu être validée par l'utilisation d'une paire de matériaux InAsSb (couche sacrificielle) / GaSb (couche d'arrêt).

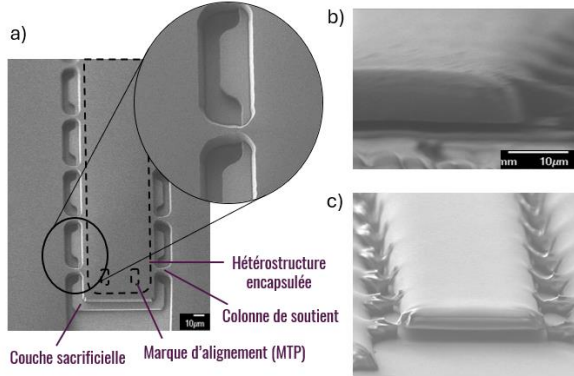


Figure 2 : Image MEB de profil de l'hétérostructure GaSb/InAsSb sous-gravée (b), image MEB du coupon préparé pour MTP dans le système modèle Si/SiO₂ (a,c).

La figure 2b présente un coupon d'hétérostructure ICL suspendu, obtenu après 3h de gravure par une solution à base d'acide citrique et de peroxyde d'hydrogène. La sélectivité s'avère suffisante pour libérer des membranes de quelques dizaines de micromètres de large. La sous-gravure, mais aussi le MTP nécessitent la réalisation de colonnes de maintien destinées à être brisées lors du retrait du coupon (étape H). Afin de concevoir les géométries de colonnes, mais aussi de valider les étapes de MTP, une étude préliminaire a été menée sur un empilement simplifié Si/SiO₂, ce dernier milieu simulant la couche sacrificielle. Les figures 2a et 2c présentent un exemple de coupon, retenu latéralement par 6 colonnes de maintien, lors des étapes H et G.

Le moulage du tampon en PDMS nécessaire à la prise du coupon (étape H) est réalisé par injection en force afin d'assurer sa planéité. Ce dernier est structuré pour permettre une plus grande résilience selon l'axe z pendant les différentes étapes du transfert. La figure 3a montre un mesa sur le tampon, de dimension égale à celle des coupons visés. Les premiers transferts de coupon en silicium ont pu être démontrés, sur une cible de silicium recouverte d'une couche de 150nm de résine à bonding (figure 3b). La précision d'alignement lors du transfert est en cours de quantification.

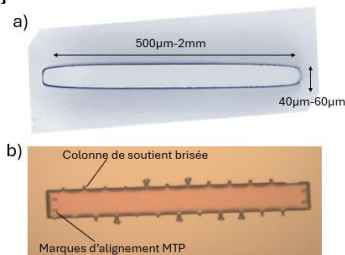


Figure 3 : Vue au microscope optique d'un mesa du tampon de transfert en PDMS (a), coupon test en silicium transféré sur une couche de 150nm de HT10-11 Brewer (b).

3. STRATEGIE DE COUPLAGE DE LA SOURCE ICL A UN CIRCUIT INTEGRE PHOTONIQUE

Le principe du couplage, issu d'une stratégie qui a fait ses preuves pour l'intégration de lasers InP/Si [4], est décrit sur la figure 3a. Le laser est en couplage évanescent vertical avec le guide SiGe (40% de Germanium) [5]. Au centre de la structure l'essentiel du champ électromagnétique se trouve dans la zone de gain afin de maximiser son interaction avec le mode laser. Dans la zone de couplage un taper est formé afin de tendre vers l'accord de phase entre les 2 structures guidantes et permettre le couplage adiabatique dans le guide SiGe. Des miroirs de Bragg sont structurés dans le guide afin de permettre la contre-réaction. Le compromis entre le gain effectif du laser et l'efficacité de couplage au guide sera discuté. La forme et la longueur du taper ont été étudiées via des simulations de propagations de modes. Une transmission de 90% dans le guide SiGe est anticipée théoriquement pour un taper linéaire de $80\mu\text{m}$ (figure 3b et 3c).

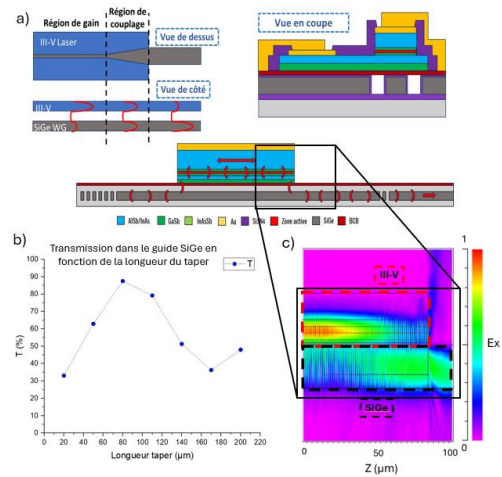


Figure 4 : Principe du couplage entre un ICL et un guide d'onde SiGe (a). Transmission simulée dans le guide en fonction de la longueur du taper (b). Cartographie montrant la répartition de l'intensité dans la structure (pour une largeur de guide allant de $3.3\mu\text{m}$ à $12\mu\text{m}$) (c)

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence ANR-22-PEEL-0015 dans le cadre du projet ciblé OFCOC. Il a bénéficié des réseaux de plateformes technologiques Renatech et Renatech+.

REFERENCES

- [1] Griffith, A. G. et al. "Silicon-chip mid-infrared frequency comb generation". Nat. Commun. 6:6299 (2015). DOI: 10.1038/ncomms7299
- [2] E.Tournié, L.Cerutti. "Mid-Infrared Optoelectronics: Materials, Devices, and Applications". Duxford Cambridge: Woodhead publishing (2020). DOI: 10.1016/B978-0-08-102709-7.00003-6
- [3] H. Duan et al., "Hybrid III-V on Silicon Lasers for Photonic Integrated Circuits on Silicon," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 20, no. 4, pp. 158-170 (2014). DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2296752
- [4] B. Ben Bakir et al., "Electrically driven hybrid Si/III-V Fabry-Pérot lasers based on adiabatic mode transformers," Optics Express, vol. 19, pp. 10317-10325 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.010317
- [5] R. Armand, M. Perestjuk et al; "Mid-infrared integrated silicon-germanium ring resonator with high Q-factor". APL Photonics (2023). DOI: 10.1063/5.0149324