

Intégration de source ICL sur plateforme SiGe par micro transfer-printing

Yannis Billiet¹, Céline Chevalier¹, Xavier Letartre¹, Jean-Louis Leclercq¹, Christian Grillet¹, Eric Tournié², Maxime Lepage³, Badhise Ben Bakir³, Vincent Reboud³, Laurent Cerutti², Christian Seassal¹

¹ Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, CPE Lyon, INL, UMR5270, 69130 Ecully, France

² Université de Montpellier, IES, UMR5214, 34095 Montpellier, France

³CEA-LETI, Minatec, 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.

MOTS-CLEFS : *Infrarouge moyen ; Laser cascade interbande ; Micro transfer-printing*

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 génération de peignes 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-TRANFER 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 (MTP) constitue une variante qui présente des avantages uniques, avec notamment le fait de pouvoir procéder à la réalisation des premières étapes de réalisation 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. Il s'agit dans un premier temps de préparer des coupons intégrant un guide d'onde de 5 à 8 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 μm. 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.

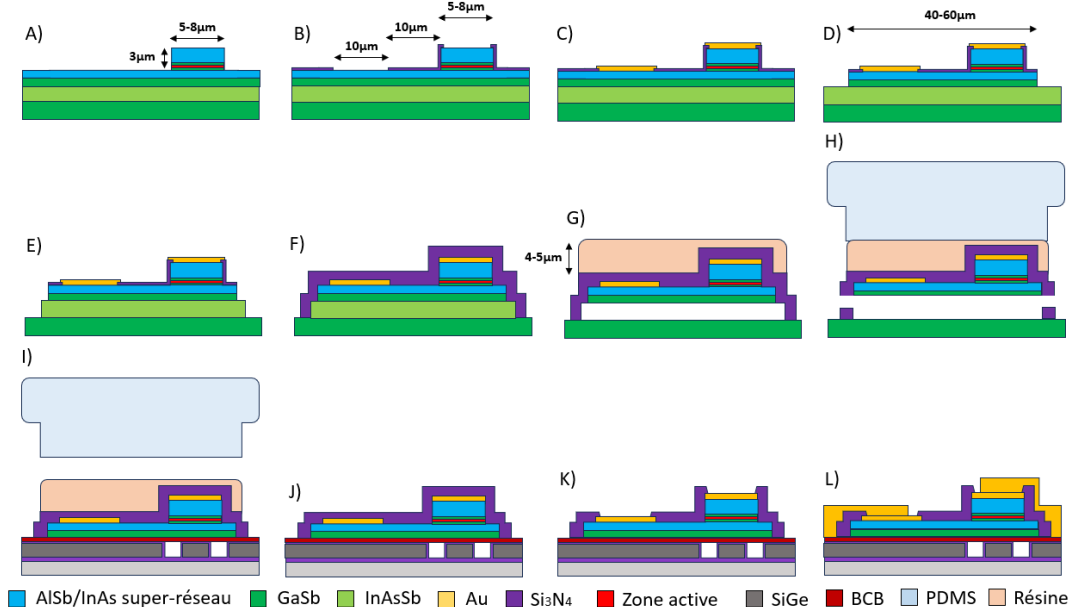


Figure 1: Procédé d'intégration développé

L'étape de sous-gravure (G) a pu être validée sur la base d'une simple hétérostructure InAsSb (couche sacrificielle)/GaSb. La figure 2a présente une vue de profil après cette étape, obtenue après 50 min 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 est menée sur un empilement simplifié Si/SiO₂, ce dernier milieu simulant la couche sacrificielle. La figure 2b présente un exemple de coupon, retenu latéralement par 6 colonnes de maintien, lors de l'étape G.

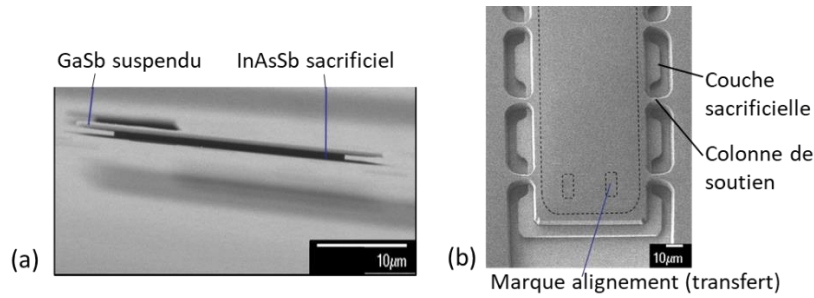


Figure 2: Image MEB de profil de l'hétérostructure GaSb/InAsSb sous-gravée (a), image au microscope optique du coupon préparé pour MTP dans le système modèle Si/SiO₂.

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

Le principe du couplage, issue d'une stratégie qui a fait ses preuves pour l'intégration de lasers InP/Si [4], est décrit sur la figure 3. Le laser est en couplage évanescent vertical avec le guide SiGe. 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.

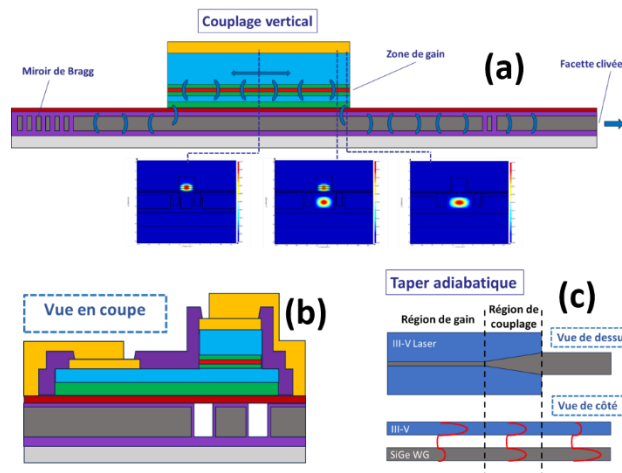


Figure 3: Principe du couplage entre un ICL et un guide d'onde SiGe. (a) Schéma du couplage vertical et cartographies montrant la répartition de l'intensité dans la structure (simulations avec 600nm de SiN entre le SiGe et la zone active et une largeur de guide allant de 3.3µm à 8µm), (b) vue en coupe du laser intégré au guide, (c) schéma du coupleur adiabatique

REFERENCES

- 1 Hu, Y., Yu, M., Buscaino, B. *et al.* "High-efficiency and broadband on-chip electro-optic frequency comb generators". *Nat. Photon.* **16**, 679–685, 2022.
- 2 Tournié, Éric, et Laurent Cerutti. *Mid-Infrared Optoelectronics: Materials, Devices, and Applications*. Duxford Cambridge: Woodhead publishing, 2020.
- 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.
- 4 B. Ben Bakir, A. Descos, N. Olivier, D. Bordel, P. Grosse, E. Augendre, L. Fulbert, and J. M. Fedeli, "Electrically driven hybrid Si/III-V Fabry-Pérot lasers based on adiabatic mode transformers," *Optics Express*, vol. 19, pp. 10317–10325, 2011.