



HAL
open science

Laser infrarouge à base de semi-conducteurs de la filière silicium

Moustafa El Kurdi, Emilie Sakat, Jean-Michel Hartmann, Vincent Reboud, Alexei Chelnokov, Nicolas Pauc, Vincent Calvo, Philippe Boucaud, Frédéric Bœuf

► **To cite this version:**

Moustafa El Kurdi, Emilie Sakat, Jean-Michel Hartmann, Vincent Reboud, Alexei Chelnokov, et al.. Laser infrarouge à base de semi-conducteurs de la filière silicium. Photoniques, 2021, 109, pp.40-43. 10.1051/photon/202110940 . hal-03322277

HAL Id: hal-03322277

<https://hal.science/hal-03322277>

Submitted on 18 Aug 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LASER INFRAROUGE À BASE DE SEMI-CONDUCTEURS DE LA FILIÈRE SILICIUM

Moustafa EL KURDI^{1*}, Emilie SAKAT¹, Jean-Michel HARTMANN², Vincent REBOUD²,
Alexei CHELNOKOV², Nicolas PAUC³, Vincent CALVO³, Philippe BOUCAUD⁴, Frédéric BŒUF⁵

¹ C2N - Université Paris-Saclay - CNRS, Palaiseau, France

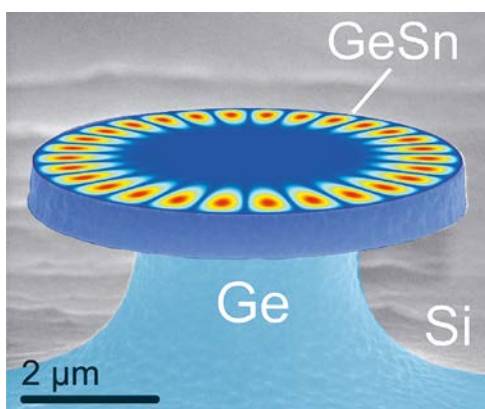
² CEA, LETI, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

³ CEA, IRIG-DePhy, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

⁴ CRHEA, Université Côte d'Azur - CNRS, Sophia-Antipolis, France

⁵ STMicroelectronics, Crolles, France

* moustafa.el-kurdi@c2n.upsaclay.fr



Nous présentons les récents développements scientifiques et techniques liés aux sources lasers infrarouges en micro-cavités à base d'alliages germanium-étain (GeSn). Ces alliages sont des matériaux semi-conducteurs de la filière silicium compatibles avec les procédés de fabrication bas coût de l'industrie de la micro-électronique. Un des enjeux est d'obtenir un alignement direct de la structure de bande électronique avec ces éléments de la colonne IV.

<https://doi.org/10.1051/photon/202110940>

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.

Les technologies photoniques basées sur le silicium et compatibles CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) ont permis des avancées significatives dans le traitement optique sur puce, en particulier pour la détection et la modulation rapides de signaux optiques dans la gamme de longueurs d'onde du proche infrarouge (IR). L'un des principaux inconvénients de cette

filière est en revanche le manque de sources lasers compatible avec les technologies CMOS. En effet, les éléments de la colonne IV compatibles avec le silicium (germanium, alliages SiGe...) sont des semi-conducteurs à bande interdite indirecte ce qui les a toujours empêchés de générer du gain optique et d'être utilisés dans des technologies laser. Pour pallier ce manque et stimuler les technologies photoniques silicium, des efforts significatifs ont été consacrés à l'intégration de

lasers hautes performances à base de composés III-V, sur plateforme photonique SOI (*silicon-on-insulator*) notamment. Cela a été particulièrement vrai pour les applications datacom proche infrarouge, aux longueurs d'onde utilisées pour la transmission par fibre optique. Les lasers issus de la filière III-V sont les sources de lumière les plus standards et les plus fiables qui existent actuellement et peuvent être reportés sur silicium suivant différentes techniques, comme

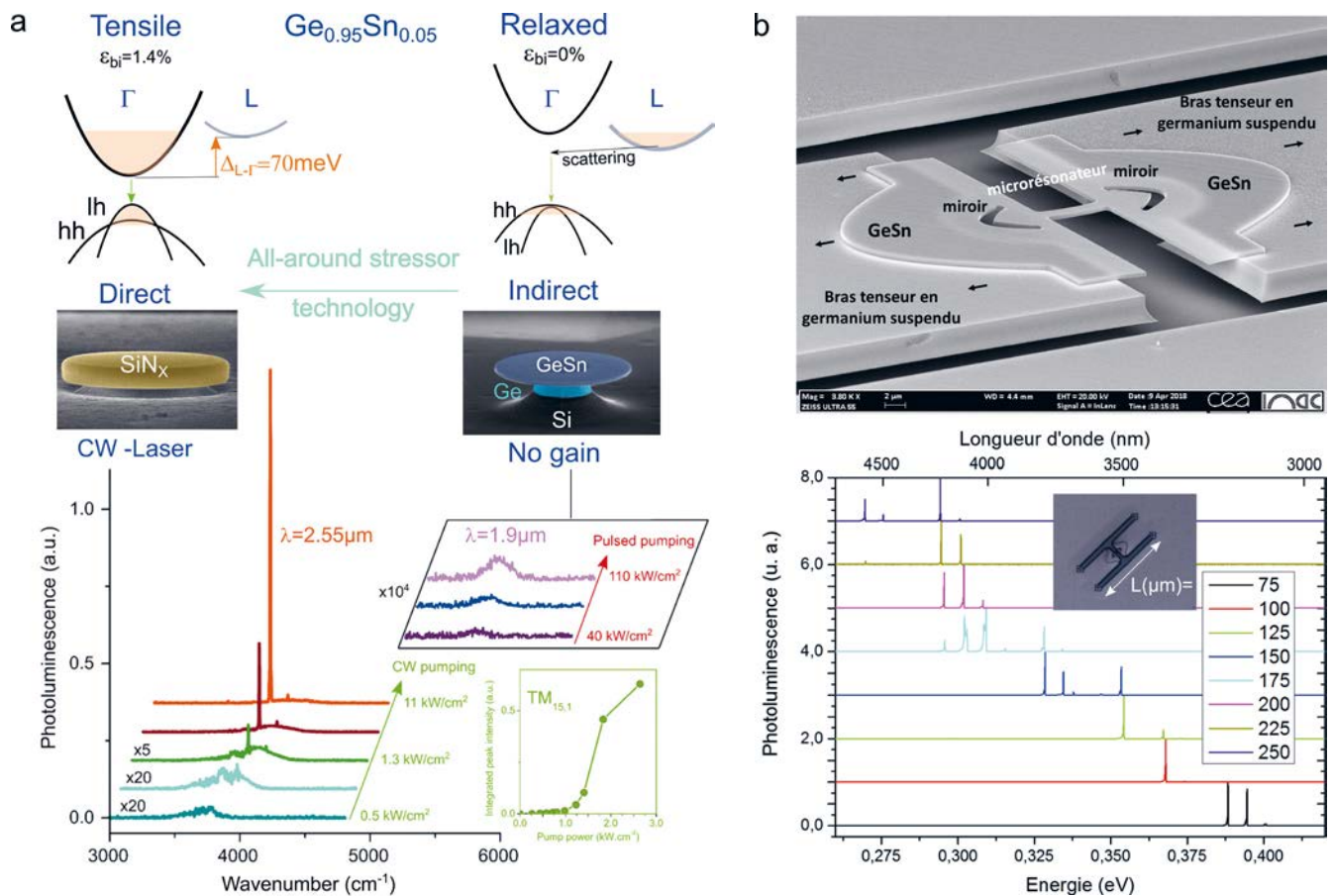


Figure 1.a. Première approche : schéma de la structure de bande d'un alliage GeSn avec 5.4 % de Sn. En fabriquant un microdisque à partir de cet alliage épitaxié sur substrat virtuel de Ge sur silicium, la cavité optique présente une déformation résiduelle proche de 0 % mais ne permet pas de montrer un effet laser, le matériau étant à bande indirecte. En lui appliquant une déformation en tension, suivant la technologie *all-around* sur un microdisque, l'alliage présente une bande interdite directe avec une directivité $\Delta_{L,r}$ de 70 meV. Cette approche permet d'obtenir un effet laser en pompage continu avec un seuil de l'ordre de 1 kW/cm^2 . Le disque contraint en tension présente une émission fortement décalée vers le rouge, de $1.9\ \mu\text{m}$ à $2.5\ \mu\text{m}$ de longueur d'onde, en raison de la déformation biaxiale appliquée de 1.4 %. **b.** La deuxième approche consiste à structurer la couche de GeSn en micro-ponts maintenus par des bras de Ge suspendus. Les bras de Ge étant légèrement en tension celle-ci est exaltée au niveau du pont de GeSn permettant ainsi de lui appliquer une déformation variable en fonction de la longueur des bras. Deux miroirs de type coin cube permettent de former une cavité Fabry-Pérot. Ce dispositif réalisé à partir d'une couche de GeSn avec 16 % d'étain permet d'obtenir une émission laser accordable sur une plage de $1.5\ \mu\text{m}$ de longueur d'onde faisant varier la longueur des bras. L'effet laser est obtenue dans ce cas jusqu'à $270\ \text{K}$, sachant que la plus forte composition d'étain permet d'obtenir une plus forte directivité $\Delta_{L,r}$.

l'épitaxie directe et *via* des couches tampon (couches intermédiaires d'adaptation de paramètre de maille ou encore appelées substrats virtuels), ou encore en utilisant des procédés de collage, on parle alors d'intégration hétérogène de III-V sur Si. Le coût de fabrication de ce type de procédé s'avère néanmoins très élevé, et l'incompatibilité chimique des III-V avec les éléments IV rend leur intégration sur les lignes de fabrication CMOS encore plus complexe.

Plus récemment, il a été découvert que l'on peut obtenir une bande interdite directe, favorable à l'obtention de gain optique, avec des alliages GeSn à condition d'ajuster correctement leur composition et leur déformation en tension. Typiquement, pour des teneurs en étain supérieures à 7-8 % un alignement direct des bandes est obtenu même si l'alliage est relaxé mécaniquement. En revanche, pour des teneurs inférieures à 7 %, il est nécessaire d'appliquer une

déformation en tension. Pour donner un ordre de grandeur, une tension au-delà de 2 % en biaxial ou de 5.5 % en uniaxial est nécessaire dans le cas du germanium pur.

Cette stratégie reposant sur l'insertion d'atomes d'étain en substitution dans un cristal de germanium conduit par ailleurs à une bande interdite directe réduite par rapport à celle du germanium pur. Ces alliages sont ainsi adaptés à l'émission ou la détection de lumière dans la gamme $[2-5]\ \mu\text{m}$ ●●●

de l'IR, gamme de longueur d'onde assez peu couverte par les lasers de la filière III-V. Or de nombreuses molécules, dont celles des gaz à effets de serre, ont des signatures d'absorption dans cette gamme de longueur d'onde. Ainsi en plus de leur technologie bas coût, les lasers GeSn ouvrent de nouveaux champs d'application tels que la détection biochimique et le contrôle de l'air.

LASER GESN : INGÉNIERIE DE CONTRAINTE DANS DES MICRORÉSONATEURS

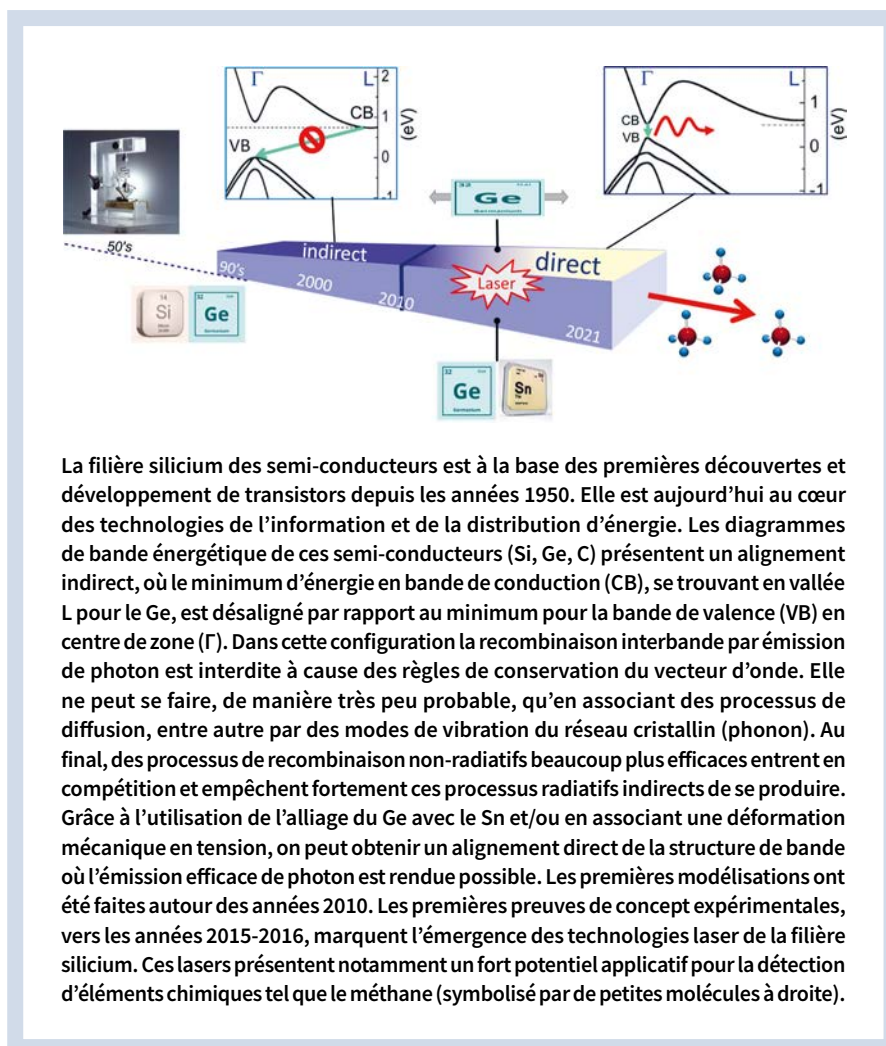
Les recherches récentes sur ce nouveau type de laser à base d'alliage GeSn se sont donc particulièrement portées sur l'ingénierie de la structure de bande électronique (composition et déformation en tension) en vue d'obtenir un alignement direct

nécessaire à la naissance du gain optique. La première difficulté pratique a résidé dans l'obtention d'une composition d'étain suffisante (supérieure à 7-8 % notamment), sachant que la solubilité limite du Sn dans le Ge à l'équilibre n'est que de 1 %. De nombreux efforts se sont ainsi portés sur le développement de procédés de croissance métastables afin de parvenir à incorporer plus d'étain. À l'heure actuelle, il est possible d'obtenir des compositions jusqu'à 16 % en utilisant des techniques CVD (*Chemical Vapour Deposition*). La deuxième difficulté est de gérer le désaccord de maille entre le GeSn et le silicium. L'utilisation d'une couche tampon de Ge pur déposée au préalable sur le substrat de silicium permet de remédier en partie à ce problème. Un désaccord de

maille demeure néanmoins entre le GeSn et le Ge, à mesure notamment que la composition d'étain augmente. Il en résulte des problématiques de contrainte en compression rédhitoire car la couche fine (inférieure à l'épaisseur critique avant relaxation) de GeSn épitaxiée se retrouve dans un état qui induit une réduction de la directivité de la bande interdite, voire même la rend indirecte. Pour contourner ce problème, l'approche usuellement adoptée est de faire relaxer cette contrainte en faisant croître des épaisseurs supérieures aux épaisseurs critiques de relaxation plastique, mais ce procédé induit malheureusement la formation d'un réseau dense de dislocations dans le GeSn, près de l'interface avec la couche tampon de Ge qui sont largement préjudiciables à la naissance de l'effet laser. En conséquence les premières démonstrations de laser à base de GeSn utilisaient des densités de puissance seuil de l'ordre de la centaine de kW/cm² en régime impulsif et fonctionnaient à des températures cryogéniques [1]. L'ingénierie de contrainte et de défauts dans le GeSn présentent donc des enjeux technologiques importants.

En appliquant une déformation en tension, on peut réduire la quantité de Sn nécessaire à l'obtention d'un gap direct et en même temps réduire les difficultés liées aux défauts de désaccord de maille. Il faut néanmoins appliquer des niveaux de déformation assez extrêmes à mesure qu'on se rapproche du germanium pur [2]. Il est donc nécessaire de développer des stratégies expérimentales et des schémas de structures photoniques tout à fait spécifiques afin d'explorer les différents paramètres influant le gain optique. Il est en particulier crucial de s'appuyer sur des structures permettant d'appliquer des déformations en tension importante.

Notre équipe a en ce sens récemment proposé une technologie *all-around* où un film stressor de SiNx entoure complètement un micro-résonateur de GeSn (voir Fig. 1-a). La distribution de déformation obtenue



La filière silicium des semi-conducteurs est à la base des premières découvertes et développement de transistors depuis les années 1950. Elle est aujourd'hui au cœur des technologies de l'information et de la distribution d'énergie. Les diagrammes de bande énergétique de ces semi-conducteurs (Si, Ge, C) présentent un alignement indirect, où le minimum d'énergie en bande de conduction (CB), se trouvant en vallée L pour le Ge, est désaligné par rapport au minimum pour la bande de valence (VB) en centre de zone (Γ). Dans cette configuration la recombinaison interbande par émission de photon est interdite à cause des règles de conservation du vecteur d'onde. Elle ne peut se faire, de manière très peu probable, qu'en associant des processus de diffusion, entre autre par des modes de vibration du réseau cristallin (phonon). Au final, des processus de recombinaison non-radiatifs beaucoup plus efficaces entrent en compétition et empêchent fortement ces processus radiatifs indirects de se produire. Grâce à l'utilisation de l'alliage du Ge avec le Sn et/ou en associant une déformation mécanique en tension, on peut obtenir un alignement direct de la structure de bande où l'émission efficace de photon est rendue possible. Les premières modélisations ont été faites autour des années 2010. Les premières preuves de concept expérimentales, vers les années 2015-2016, marquent l'émergence des technologies laser de la filière silicium. Ces lasers présentent notamment un fort potentiel applicatif pour la détection d'éléments chimiques tel que le méthane (symbolisé par de petites molécules à droite).

est très homogène dans la microcavité en GeSn [3] et un niveau record de déformation en tension dans une cavité résonnante de type microdisque, à hauteur de 1.4 % biaxiale, a été atteint. De plus, la technologie proposée repose sur un report de la couche de GeSn par une technique de collage et retrait de substrat, ce qui permet de retirer la zone de défaut d'accord de maille dans le GeSn (cette dernière se retrouvant tout au-dessus) et d'améliorer sa qualité structurale. Cette approche a été appliquée sur une couche avec une teneur en étain de seulement 5.4 %, donc initialement à bande interdite indirecte et ne pouvant pas générer de gain optique. L'alignement de la structure de bande obtenue est direct, avec une directivité $\Delta_{L-\Gamma}$ de 70meV permettant d'atteindre un régime laser (Fig. 1-a). Par ailleurs, la forte déformation appliquée induit une levée de dégénérescence de la bande de valence, donc une réduction de la densité d'états et contribue, avec le retrait des dislocations, à réduire les seuils d'inversion de population. En suivant cette approche, l'effet laser a été obtenu pour la première fois en régime continu avec des densités de seuils de l'ordre de $1\text{kW}/\text{cm}^2$, soit réduits de 2 ordres de grandeur par rapport à l'état de l'art [4]. Dans ce cas, les performances sont très similaires à celles que l'on peut avoir avec des lasers III-V reportés sur silicium, à la différence que l'oscillation laser n'est maintenue que jusqu'à 100°K alors que les lasers III-V fonctionnent à température ambiante. L'idéal serait d'augmenter la directivité qui se caractérise par la barrière d'énergie entre les états d'électron en Γ et les états en vallée L (nommé $\Delta_{L-\Gamma}$ sur la Fig. 1). Ainsi la population d'électrons serait mieux maintenue

dans la vallée directe (Γ), et le gain optique pourrait être conservé lorsque la température augmente.


Une deuxième approche consiste à utiliser des alliages à plus forte composition d'étain, typiquement de 16 %, qui présentent une plus grande directivité, de l'ordre de 150 meV, en fonction de la déformation appliquée. Récemment cette approche, associée à une ingénierie de contrainte en structure micro-ponts (Fig. 1-b), a permis d'atteindre un régime laser jusqu'à 270°K avec de plus la possibilité d'accorder la longueur d'onde d'émission *via* les paramètres géométrique du dispositif [5]. Les seuils laser sont néanmoins de l'ordre du MW/cm^2 lorsqu'on s'approche de l'ambiante.

CONCLUSION

L'alliage du Ge avec l'étain associé à de l'ingénierie de contrainte et à la gestion des défauts devrait conduire au chaînon manquant de la filière silicium : une source laser sous injection électrique et à température ambiante. Cet article a permis de présenter quelques éléments essentiels autour des technologies émergentes et très prometteuses qui ont déjà permis d'obtenir des premières démonstrations sous pompage optique et des seuils très bas. De futures données expérimentales devraient permettre de décrire plus finement l'influence des différents paramètres sur la robustesse du gain optique, et ainsi conduire à des designs optimaux. Il est à noter que d'autres voies sont en cours de développement en vue de réaliser des lasers encore plus performants : le potentiel d'hétérostructures de types puits quantiques et boîtes quantiques comme milieu à gain fait notamment l'objet d'explorations diverses. ●


RÉFÉRENCES

- [1] S. Wirths *et al.*, *Nature Photon.* **9**, 88–92 (2015)
- [2] F. T. Armand Pilon *et al.*, *Nature Comm.* **10**, 2724 (2019)
- [3] A. Ghrib *et al.*, *Advanced Opt. Mat.* **3**, 353–358 (2015)
- [4] A. Elbaz *et al.*, *Nature Photon.* **14**, 375–382 (2020)
- [5] J. Chrétien *et al.*, *ACS Photonics* **6**, 2462–2469 (2019)




UN UNIVERS DE PRÉCISION

- Composants et systèmes optiques de précision,
- Spécialiste des surfaces asphériques, jusqu'à diam. 600 mm
- Matériaux usinés : verres, céramiques, métaux,
- Applications : bancs de test, lasers hautes énergie, métrologie optique...



Expansion de faisceau à miroirs




Monture orientable motorisée



Conception optique



Optiques Laser haute énergie



Lentille diam. 300 mm en monture 5 axes



Prisme de précision

Optical Surfaces 

Trioptics France
 76 rue d'Alsace
 69100 Villeurbanne
 Tél. 07 72 44 02 03
 Fax : 04 72 44 05 06
www.trioptics.fr