



Titre : Etude de l'obtention de SPADs III-V/Si par wafer bonding

Porteur : Thibault Cazimajou

(Le porteur s'engage à participer et présenter son projet aux journées de la GI-EIF)

Laboratoire : INL

Composante : GEP

Nature du financement demandé : Stage de M2

Dates : 01 Mars 2026 – 31 Août 2026 (5 mois)

Résumé : (200 mots)

Les SPADs (détecteurs de photons uniques basés sur des diodes en avalanche) sont des photodétecteurs majoritairement utilisés pour faire de la mesure de distance par mesure du temps de vol d'un photon depuis une source vers le détecteur après réflexion sur un obstacle, du fait de leur haute sensibilité et de leur faible temps de réponse. Les SPADs conçues en silicium peuvent être facilement intégrés dans une architecture CMOS mais présentent la limitation de fonctionner pour des longueurs d'onde entre 500 et 950 nm. Pour des applications en espace libre, par exemple dans les systèmes d'aide à la navigation, concevoir des SPADs optimisées pour le proche infra-rouge est un enjeu majeur. Pour répondre à cette problématique, il est proposé une SPAD basée sur une hétérostructure III-V/Si, avec la photogénération dans le matériau III-V et l'avalanche dans le silicium. Il est exploré actuellement une réalisation de cette architecture par épitaxie, avec une couche buffer en GaAs entre l'InGaAs et le silicium. Le but de ce stage est d'explorer une voie alternative par wafer bonding de l'InGaAs sur le silicium.

Sujet développé :

La SPAD est une diode polarisée en inverse au-delà de sa tension de claquage, ce qui permet de générer un transitoire de courant mesurable à partir d'une première paire électron-trou photogénérée. Parmi les principaux critères de performances des SPAD, on peut citer la probabilité de détection d'un photon (Photon Detection Probability - PDP) et le nombre d'avalanches par seconde dans l'obscurité (Dark Count Rate - DCR). Du fait de leur sensibilité ultime et de leur rapidité de réponse (bien adaptée par exemple pour la mesure du temps de vol [1]), les SPADs ont un large champ d'applications (reconnaissance faciale, aide à la navigation, etc.), dont les communications optiques en espace libre sur lesquelles travaillent l'INL [2].

Pour les applications en espace libre (sans guide optique), il existe un intérêt significatif à travailler dans le proche infra-rouge, où l'œil humain n'est pas sensible et où les composantes de rayonnement solaire sont de moindres intensités comparées aux longueurs d'onde dans le visible. Les SPADs fabriquées industriellement aujourd'hui sont réalisées en silicium, dont l'énergie de gap de 1.12 eV ne permet pas d'absorber les longueurs d'onde au-delà de 1100 nm. Pour concevoir des SPADs permettant d'absorber des photons dans le proche infrarouge, il a été proposé d'utiliser

d'autres matériaux, par exemple des matériaux III-V, comme l'InGaAs. Dans l'article [3], il est mis en évidence qu'une SPAD en InGaAs permet d'améliorer la PDP dans le domaine du proche infrarouge jusqu'à 1550 nm. Cependant, cela pose plusieurs problèmes en termes d'incompatibilité avec les architectures CMOS et d'augmentation du DCR, car l'énergie de gap de l'InGaAs est plus petite que le silicium, ce qui augmente la génération thermique de porteurs de charges libres.

L'hétérostructure présentée sur la figure 1 constitue une alternative intéressante puisqu'elle permet de bénéficier à la fois de la maturité des technologies CMOS, de l'efficacité d'absorption de l'infrarouge dans l'InGaAs et de l'énergie de gap plus élevée dans le silicium. Dans cette architecture, les zones de photo-génération et d'avalanche sont séparées spatialement. Ainsi, les photons absorbés dans l'InGaAs génèrent des paires électron-trou qui sont transportées par un champ électrique faible à modéré jusque dans la zone de multiplication dans le silicium où se produisent les avalanches du fait d'un très fort champ. A noter que dans cette approche, l'interface InGaAs/Si joue un rôle important d'une part lors du transport des porteurs photogénérés vers la zone de multiplication et d'autre part sur le DCR du fait des éventuels défauts d'interface.

Au sein de l'INL, nous avons commencé à explorer une stratégie d'obtention de cette structure par épitaxie, avec une couche tampon de GaAs entre le silicium et l'InGaAs. Ce procédé, développé par le LTM à Grenoble, a pour objectif de gérer le désaccord de maille [4]. Ce projet implique actuellement une chercheuse postdoctorale, Amina Djemmah, qui travaille sur le développement des procédés technologiques en salle blanche pour la réalisation de l'obtention de structures de tests, et un doctorant en deuxième année, Mathias Tapinnetto, qui travaille sur la caractérisation et la simulation de ces structures. J'ai aussi déposé un projet ANR JCJC sur l'étude approfondie de l'interface, à travers la conception, la caractérisation et la simulation de structures de tests dédiées.

Une voie alternative pour obtenir cette structure est le wafer bonding d'InGaAs sur silicium, qui était d'ailleurs la première voie explorée dans la littérature pour la conception de SPADs basés sur une hétérostructure InGaAs/Si [5]. Cette voie n'a plus été explorée depuis pour les SPADs mais il est possible de trouver des articles récents mentionnant des photodétecteurs InGaAs/Si réalisés avec ce procédé technologique [6]. Le stage proposé va consister à explorer cette voie, à travers de la fabrication de structures de test simples en salle blanche et de leur caractérisation (sans besoin de collaboration extérieure pour cette voie alternative). A plus long terme, nous souhaitons obtenir une structure de SPAD par wafer bonding, dans l'objectif de réaliser des comparaisons avec celle obtenue par épitaxie, en termes de performances mais aussi en termes de qualité de l'interface. Nous comptons aussi profiter de ce stage pour identifier un candidat potentiel pour une thèse qui pourrait être financée par le projet ANR JCJC déposé.

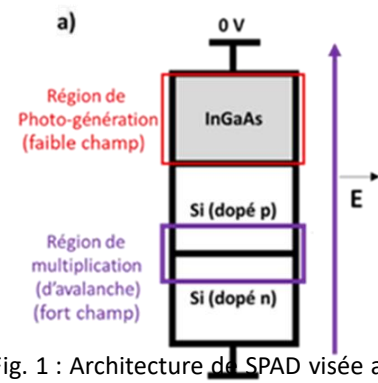


Fig. 1 : Architecture de SPAD visée avec une hétérostructure InGaAs sur Silicium. Les photons correspondant aux longueurs d'onde du domaine du proche infra-rouge pourront être absorbés dans l'InGaAs, tandis que l'avalanche aura lieu dans le Silicium.

- [1] Charbon, et al. SPAD-based sensors. TOF Range-Imaging Cameras. 11-38. (2013). 10.1007/978-3-642-27523-4_2.
 [2] Béchadargue, et al., 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp.1-6. (2023). 10.1109/WCNC55385.2023.10118956
 [3] Tosi, et al., 2012 International Electron Devices Meeting : 24.4.1-24.4.4. (2012). 10.1109/IEDM.2012.6479095.
 [4] Mehdi, et al., AIP Advances 11, 085028 (2021). 10.1063/5.0059237
 [5] Kang, et al. Appl. Phys. Lett. 6 September 2004; 85 (10): 1668–1670. 10.1063/1.1788882
 [6] Jinlong Jiao, et al., Appl. Phys. Lett. 18 March 2024; 124 (12): 121101. 10.1063/5.0192394