



Proposition de thèse

Titre : épitaxie et caractérisation de l'alliage ScAlN pour dispositifs électroniques haute fréquence

En raison de ses propriétés piézoélectriques [1] l'alliage semiconducteur ScAlN a été développé au cours des 10 dernières années pour la réalisation de capteurs et de filtres RF à base d'ondes acoustiques. Cet alliage s'avère également intéressant pour la fabrication de transistors capables de fonctionner à des fréquences élevées [2]. En effet, grâce à la forte polarisation électrique induite à l'interface des hétérostructures ScAlN/GaN, il est possible de générer des gaz d'électrons avec des densités supérieures à $3E13/cm^2$ et ce malgré une épaisseur de la barrière ScAlN bien inférieure à 10 nm. Malgré les propriétés remarquables de cet alliage la première démonstration d'un transistor RF de type HEMT (high electron mobility transistor) à base de ScAlN ne date que de 2019. Au CRHEA cette activité a débuté en 2020 et des transistors avec des performances encourageantes ont déjà été obtenus, notamment sur un substrat de silicium (le standard en électronique) mais qui est une première avec cet alliage.

Dans ce contexte, le projet **TWINS**, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (**ANR**), regroupe le **CRHEA**, l'**institut Jean Lamour** et l'**IEMN**. La finalité de ce projet est de combiner un transistor HEMT ScAlN/GaN et une structure à onde acoustique de surface (SAW) afin de réaliser un filtre ajustable en fréquence opérant dans la gamme 3-10 GHz. L'approche proposée dans ce projet est totalement novatrice et elle nécessite dans un premier temps d'optimiser l'élaboration mais aussi de caractériser les performances des deux briques de base (transistor et filtre SAW). Dans un second temps, différentes approches d'intégration monolithique seront étudiées afin de proposer un filtre ajustable en fréquence répondant aux exigences des télécommunications 5G.

La thèse proposée s'intègre parfaitement dans le projet TWINS. Elle portera sur l'**épitaxie sous jets moléculaires** de l'alliage ScAlN [3] et la caractérisation des hétérostructures ScAlN/GaN. L'objectif sera d'établir le lien entre conditions d'élaboration, composition des hétérostructures, et les propriétés structurales (rugosité, qualité cristalline) et électriques (densités de porteurs, mobilité, présence de pièges, réponse piézoélectrique...). Pour cela, des techniques de caractérisation telles que la **diffraction des rayons X**, la **microscopie à force atomique** (<http://www.crhea.cnrs.fr/caracterisation.htm>), la **fabrication de dispositifs de test** avec les outils de micro-fabrication du laboratoire (lithographie UV, dépôts, gravures, recuits ; <http://www.crhea.cnrs.fr/plateforme-de-technologie.htm>) et des **caractérisations électriques** simples (effet Hall, mesures I-V, C-V) seront utilisées. Une fois cette étape d'optimisation des composants élémentaires réalisée, différentes approches monolithiques seront imaginées, développées, et étudiées afin de déterminer celle offrant les meilleures performances en termes de filtre ajustable.

Ces travaux seront réalisés au **CRHEA** (Université Côte d'Azur, CNRS, Valbonne, 06) en étroite collaboration avec les laboratoires partenaires du projet. Pour réaliser ces études, des connaissances en **physique du solide** et en **science des matériaux** sont nécessaires. D'autre part, le laboratoire est protégé par un régime restrictif (**ZRR**).

Références :

- [1] Akiyama et al.: Influence of growth temperature and scandium concentration on piezoelectric response of scandium aluminum nitride alloy thin films, Appl. Phys. Lett. 2009, 95 (16) 162107; <https://doi.org/10.1063/1.3251072>
- [2] Green et al.: ScAlN/GaN HEMTs with 2.4-A/mm current density and 0.67-S/mm transconductance, IEEE Electron Device Letters, Vol. 40, No. 7, (2019), <https://doi.org/10.1109/LED.2019.2915555>
- [3] Elias et al.: Influence of the temperature on growth by ammonia source molecular beam epitaxy of wurtzite phase ScAlN alloy on GaN, APL Materials 11, 031105 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0139588>

Encadrement :

Dr. Yvon CORDIER, Université Côte d'Azur, CNRS, CRHEA, rue Bernard Grégory, 06560 Valbonne
Dr. Maxime HUGUES, Université Côte d'Azur, CNRS, CRHEA, rue Bernard Grégory, 06560 Valbonne

Candidature : envoyer CV, lettre de motivation et relevés de notes de Master 1 et 2 aux adresses : yc@crhea.cnrs.fr et mh@crhea.cnrs.fr



Ph. D thesis

Title : epitaxy and characterization of ScAlN alloy for high-frequency electron devices

The impressive piezoelectric properties of ScAlN [1] have made it a very interesting semiconductor alloy for sensors and high-frequency filters based on acoustic waves. Furthermore, this alloy is promising for the fabrication of RF transistors [2]. Indeed, thanks to the large electric polarization induced at the interface of ScAlN/GaN heterostructures, electron gases with densities superior to $3 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ can be generated even with ScAlN barrier thickness well below 10 nm. However, despite these impressive properties, the first demonstration of an RF HEMT (high electron mobility transistor) based on ScAlN was reported lately, in 2019. Since 2020, the epitaxy of the ScAlN alloy is studied at **CRHEA** and encouraging results have been obtained, including ScAlN/GaN heterostructures grown on silicon which is a substrate of choice for industry.

In this context, the **TWINS** project funded by the French National Research Agency (**ANR**) aims at combining a ScAlN/GaN HEMT with a surface acoustic wave (SAW) structure to achieve a variable frequency filter operating in the 3-10 GHz frequency range. In a first step, this totally novel approach will necessitate the optimization of the epitaxy, of the device process and the characterization of the two building blocks (transistor and SAW filter). In a second step, various integration routes will be studied to propose a device able to satisfy the 5G telecommunications requirements. For this purpose, the project gathers 3 academic laboratories: **CRHEA**, **Institut Jean Lamour** and **IEMN**.

The proposed Ph.D thesis perfectly fits with TWINS project and will consist in the molecular beam epitaxy of ScAlN alloy [3] and the characterization of ScAlN/GaN heterostructures. The main objective will be to correlate growth conditions and heterostructure parameters (alloy composition, thickness) with structural properties (roughness, crystal quality) and electrical properties (carrier density, mobility, electrical traps, piezoelectric response...). For this purpose, **X-ray diffraction**, **atomic force microscopy** (<http://www.crhea.cnrs.fr/en/characterization.htm>), **test device process** in the laboratory cleanroom (<http://www.crhea.cnrs.fr/en/technology-platform.htm>) and **electrical characterizations** (Hall effect, I-V and C-V measurements) will be performed. Once the growth and device process optimized, various approaches will be investigated to cointegrate the different parts of the variable frequency filter.

The study will be carried out at **CRHEA** (Université Côte d'Azur, CNRS, Valbonne, 06) in tight collaboration with partners laboratories. Knowledges in **solid-state physics** and **materials science** are necessary. Furthermore, the laboratory is protected by the restricted access regime (**ZRR**).

References :

- [1] Akiyama et al.: Influence of growth temperature and scandium concentration on piezoelectric response of scandium aluminum nitride alloy thin films, Appl. Phys. Lett. 2009, 95 (16) 162107 ; <https://doi.org/10.1063/1.3251072>
- [2] Green et al.: ScAlN/GaN HEMTs with 2.4-A/mm current density and 0.67-S/mm transconductance, IEEE Electron Device Letters, Vol. 40, No. 7, (2019), <https://doi.org/10.1109/LED.2019.2915555>
- [3] Elias et al.: Influence of the temperature on growth by ammonia source molecular beam epitaxy of wurtzite phase ScAlN alloy on GaN, APL Materials 11, 031105 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0139588>

Supervision :

Dr. Yvon CORDIER, Université Côte d'Azur, CNRS, CRHEA, rue Bernard Grégory, 06560 Valbonne, France

Dr. Maxime HUGUES, Université Côte d'Azur, CNRS, CRHEA, rue Bernard Grégory, 06560 Valbonne, France

Application : send CV, letter of motivation and Master 1&2 results to : yc@crhea.cnrs.fr and mh@crhea.cnrs.fr