

2023 年度年次報告書

リアル空間を強靱にするハードウェアの未来

2022 年度採択研究代表者

前田 拓也

東京大学 大学院工学系研究科

講師

強誘電体/窒化物系半導体ヘテロ接合による革新的トランジスタの創成

## 研究成果の概要

本プロジェクトでは、強い分極および強誘電性を有する窒化スカンジウムアルミニウム(ScAlN)を窒化ガリウム(GaN)系高電子移動度トランジスタ(HEMT)のバリア層として用いることで、二次元電子ガス(2DEG)の増強およびスイッチングを実現し、GaN HEMT の高性能化および新機能発現を目指している。

2023 年度では、共同研究によるスパッタ成長 ScAlN/GaN ヘテロ接合の結晶性や光学物性の評価を行なった。また、並行して、GaN HEMT 作製プロセスの確立や東京大学にて分子線エピタキシー(MBE)装置の立ち上げと実験準備を行なった。以下にそれぞれの進捗と成果を述べる。

### スパッタ成長 ScAlN/GaN の物性評価

2022 年度より現職に着任し、本プロジェクトを開始したため、まずは共同研究によってサンプルを入手し、それらを実験評価することで研究を進めてきた。GaN 基板上に異なる Sc 組成のサンプルを 3 種(6, 10, 14%)成長し、それらの評価に取り組んだ。原子間力顕微鏡(AFM)で表面形状を観察したところ、二乗平均面粗さ(RMS)は 0.5-0.7 nm 程度であり、原子レベルで平坦な ScAlN 薄膜を成長することに成功した。X 線回折(XRD)測定を行ったところ、GaN 上に擬似格子整合してコヒーレント成長していることが確認できた。また、明瞭なフリンジが観察され、フリンジ間隔から膜厚を求めたところ、21 nm 程度となった。Sc 組成増加につれて格子定数は増加し、GaN 上に成長したことで引っ張り歪みを受けていると考えられる。これらのサンプルについて、分光エリプソメリーによって誘電関数(屈折率, 消衰係数), 光学バンドギャップを測定することに成功した。エリプソメリーから得られた膜厚は 22 nm 程度であり、XRD 測定の結果と一致した。これらの結果は ScAlN/GaN ヘテロ接合を用いた光電子デバイスの設計や特性理解において重要な知見である。これらは窒化物半導体に関する最大規模の国際会議 ICNS 2023 で発表され、また、国際学術誌 *Applied Physics Letters* に投稿・査読中である。

### GaN HEMT 作製プロセスの確立

東京大学の武田先端知クリーンルームを用いて GaN HEMT 作製プロセスの立ち上げを行なった。フォトリソグラフィやエッチングなどの条件を確立することで、最小ゲート長 1.5  $\mu\text{m}$  の GaN HEMT の作製に成功し、動作を確認した。ScAlN/GaN ヘテロ接合において二次元電子ガスの存在を確認し、現在その輸送特性の評価に取り組んでいる。

### 窒化物系 MBE 装置の立ち上げ

超高真空・連続成長による高品質 ScAlN/GaN の成長方法確立を目指して、東京大学にて窒化物系 MBE の立ち上げを行なっている。学内で入手したチャンバーの洗浄やシュラウドの導入、QMASS の増設、各種 K セル(Sc, Al, Ga, Ge)、プラズマ窒素源を導入し、立ち上げに着手している。既に真空引きやリークチェック、ベーキングを開始している。基板や原料の選定も進み、2024 年 6 月中にはエピ成長の条件出しを始められる見込みである。

【代表的な原著論文情報】

- 1) **T. Maeda**, Y. Wakamoto, S. Kaneki, H. Fujikura and A. Kobayashi,  
“Structural and optical properties of epitaxial  $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  coherently grown on GaN bulk substrates by sputtering method”,  
submitted to *Appl. Phys. Lett.* (under review, minor revision)
- 2) A. Kobayashi, Y. Honda, **T. Maeda**, T. Okuda, K. Ueno and H. Fujioka,  
“Structural characterization of epitaxial ScAlN films grown on GaN by low-temperature sputtering”, *Appl. Phys. Express* **17**, 011002 (2023).
- 3) **T. Maeda** *et al.*, “Characterization of Optical Properties and Bandgaps of  $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  Epitaxially Grown on GaN Bulk Substrate by Sputtering Method”,  
presented at *International Conference on Nitride Semiconductors 2024*.
- 4) Y. Wakamoto, and **T. Maeda** *et al.*, “Study on 2DEG Density in ScAlN/GaN and AlGaN/GaN Heterostructures Based on Simulation and Analytical Modeling”,  
presented at *International Conference on Nitride Semiconductors 2024*.