

日本—E U 国際共同研究「パワーエレクトロニクス」 平成 30 年度 年次報告書	
研究課題名（和文）	革新的高信頼性窒化物半導体パワーデバイスの開発と応用
研究課題名（英文）	Innovative Reliable Nitride based Power Devices and Application
日本側研究代表者氏名	三宅 秀人
所属・役職	三重大学大学院地域イノベーション学研究科・教授
研究期間	平成 29 年 1 月 1 日～令和元年 12 月 31 日

1. 日本側の研究実施体制

氏名	所属機関・部局・役職	役割
三宅 秀人	三重大学大学院・地域イノベーション学研究科・教授	研究代表者 AlN 結晶の熱処理による高品質化および AlN 厚膜の作製
寒川 義裕	九州大学・応用力学研究所・教授	研究分担者 AlN 結晶の溶液成長技術の開発および気相成長プロセスの解明
正直 花奈子	三重大学大学院・工学研究科・助教	研究協力者 AlN 結晶成長および構造評価
林 侑介	三重大学大学院・地域イノベーション学研究科・助教	研究協力者 AlN 結晶成長およびデバイス作製
Xiao Shiyu	三重大学大学院・地域イノベーション学研究科・助教	研究協力者 AlN 結晶の透過電子顕微鏡観察

2. 日本側研究チームの研究目標及び計画概要

(0001)c 面サファイア上 c 面 AlN 成長における結晶高品質化を推し進め、その物理を把握

する。熱処理条件の最適化を行った AlN/(0001)Sapphire 上へのホモエピ成長による厚膜化を行い、昇華法による基板としての開発を進める。また、欧州側の共同研究機関と共同してデバイス応用の可否についても検討する。また、固体ソース溶液成長（3SG）法による AlN 厚膜の開発を行い、欧州側の共同研究機関にサンプルを出荷する。GaN MOVPE（有機金属気相成長）における C 混入機構の理論解析も並行して行う。

3. 日本側研究チームの実施概要

高品質な AlN 膜をサファイア基板上で作製する技術は極めて重要であるが、サファイア基板上の AlN 膜には高密度の貫通転位が存在する。これまでに、スパッタ法 AlN に高温アニールを用いることで、AlN の結晶性が大幅に改善できることを報告してきた。アニールされたスパッタ法 AlN 膜を MOVPE 法 AlGaIn 層の下地テンプレートとして利用するためには AlN 膜の歪緩和の理解が必要となる。本年度研究では、X 線回折逆格子空間マッピング (XRD-RSM) を用いて異なる膜厚を有するスパッタ法 AlN 膜のアニール前後の表面と歪緩和を評価した。

AlN テンプレートの貫通転位密度を評価するため、厚さの異なる AlN テンプレートに対して MOVPE 成長を行い断面・平面 STEM 像観察を行った。膜厚約 180 nm(アニール温度: 1700 °C)、480 nm(同 1725 °C)の AlN テンプレートの平面 STEM 像から、AlN テンプレートの膜厚増加とアニール温度の上昇に伴い転位密度が低下している様子が確認できた。また、AlN/サファイア界面から転位密度の低減が実現され、試料表面まで転位の増加がないことが確認された。STEM 観察にて確認された転位はすべて刃状転位であった。平面 STEM 像から見積もられた貫通転位密度の AlN テンプレート膜厚依存性を調べた結果、XRD 測定の結果からも推測された通り、AlN テンプレート膜厚の増加に伴い貫通転位密度が単調に低減していることが確認された。最適化された高温アニール条件により、 $2.07 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ の貫通転位密度が得られた。

欧州側の共同研究機関（Fraunhofer IISB, Germany）と共同して貫通転位の種類と AlGaIn/GaN-HEMT（High Electron Mobility Transistor）デバイスにおける縦方向リーク電流との相関を解析した。解析に用いたサンプル構造は、GaIn(4nm cap 層)/Al_xGa_{1-x}N (x=0.25, 20nm)/GaIn (channel)/GaIn:C/組成傾斜 AlGaIn/p 型 Si(111)である。GaIn:C 層ではキャリア補償の目的で C（炭素）ドーピングを行っている。ここで、C 濃度 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ および $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の 2 種類のサンプルを準備した。原子間力顕微鏡、カソードルミネッセンス測定、選択エッチング、EDS 組成分析などの総合的な解析により螺旋成分を持った貫通転位が電流の縦方向リークに寄与することが解明された。

一方で、上述のように高抵抗化した GaIn:C 層を挿入することにより（欠陥によらない）縦方向リークを抑制できることを見出している。しかし、C ドーピング機構の物理は明らかにされておらず、C 濃度の精密な制御も行われていないのが現状である。本研究では、非平衡量子熱力学（Steepest-Entropy-Ascent Quantum Thermodynamics (SEAQT)）により GaIn 表面における CH₄ 吸着過程を解明し、得られた知見を欧州側の共同研究機関による実験にフィードバックした。

以上