

日本—中国 国際共同研究（都市における環境問題または都市におけるエネルギー問題に関する研究） 平成 29 年度 年次報告書	
研究課題名（和文）	有害物質分解システムに向けた高性能紫外線レーザーダイオードの研究
研究課題名（英文）	Development of Nitride Semiconductor-based High Power Ultraviolet Laser Diodes for Hazardous Substances Decomposition Systems
日本側研究代表者氏名	天野 浩
所属・役職	名古屋大学 未来材料・システム研究所 未来エレクトロニクス集積研究センター センター長、教授
研究期間	平成 28 年 8 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日

1. 日本側の研究実施体制

ワークパッケージ No. 1	AIN 基板の作製	
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 研究科長・教授	結晶成長及び構造評価
本田 善央	名古屋大学 未来材料・システム研究所 未来エレクトロニクス集積研究センター 准教授	光・電気物性の評価
岡田 俊祐	三重大学大学院工学研究科 電気電子工学専攻 D3	結晶成長と評価
岩山 章	三重大学大学院地域イノベーション学研究科 研究員	結晶成長と評価
Xiao Shiyu	三重大学大学院地域イノベーション学研究科 博士研究員	結晶評価
正直 花奈子	三重大学大学院工学研究科 電気電子工学専攻 助教	結晶成長及び評価

林 侑介	三重大学大学院地域イノベーション学研究所 助教	結晶成長及びデバイス作製
Xiaotong Liu	三重大学大学院地域イノベーション学研究所 博士研究員	結晶評価

ワークパッケージ No. 2		UV-LD の作製
氏名	所属機関・部局・役職	役割
天野 浩	名古屋大学 未来材料・システム研究所 未来エレクトロニクス集積研究センター センター長、教授	研究総括
本田 善央	名古屋大学 未来材料・システム研究所 未来エレクトロニクス集積研究センター 准教授	光・電気物性の評価
久志本 真希	名古屋大学大学院工学研究科 電子情報システム専攻 助教	光励起システムの構築
Zhibin Liu	名古屋大学大学院工学研究科 院生（博士後期課程 D2）	厚膜結晶成長及び評価
廖 亜強	名古屋大学大学院工学研究科 院生（博士前期課程 M2）	結晶成長、評価及びデバイス作製

2. 日本側研究チームの研究目標及び計画概要

WP1 では厚膜成長の研究を継続し、さらなる転位密度の低減を試みる。昇華法による AlN 成長は、三重大学が実施する SiC 基板上 AlN 結晶を種として高品質化を図る。スパッタ法 AlN 膜の堆積条件及び熱処理条件を明らかにするとともに、MOVPE 法による AlN 薄膜との比較検討を行い、さらに HVPE 成長における下地基板としての有効性を検証する。加えて透過電子顕微鏡を用いた転位の挙動解析により伝搬機構を詳細に調べる。

WP2 では昨年度の分極による 2 次元正孔ガスの生成による高正孔濃度化、ならびに BN のさらなる高品質化を検討する。いずれも高シート正孔濃度 p 型層が期待できる。本年度は高品質な結晶の作製を目指し、現状の MOCVD の高温成長可能な装置への改造やその場観察による結晶成長の最適化、ならびに AlGaIn 系結晶の成長機構の解明を目指す。また、サファイア基板上 h-BN 成長については、成長条件の最適化を行う。また低温バッファ層やスパッタ法 BN を下地層として用いた BN 成長も検討する。スパッタ法 BN については成膜だけでなく、ワークパッケージ①のチームのアニール技術の応用によるバッファ層の高品質化も検討する。その場観察ならびに結晶性評価や透過電子顕微鏡を用いた解析により、最適な成長条件やバッファ層の検討に平行し、h-BN 結晶の物性を詳細に調べる。

3. 日本側研究チームの実施概要

WP1 では、本研究の AlN テンプレート上にデバイス作製を行うプロセスの確立を目的に表面クリーニングおよび有機金属気相成長（MOVPE）法による AlN 成長を行った。スパッタ法 AlN のアニール後の表面には、高さ 3 nm 程度の酸化物による微小島が見られるが、 H_2+NH_3 中で高温（1300°C）では微小島を除去できることを明らかにした。MOVPE 装置内で高温クリーニングを行った後、MOVPE 法による AlN 成長を行った結果、 NH_3 の流量増加により成長レートが大きくなり、成長モードがステップバンチングからスパイラル成長手前まで変化した。約 1.0 $\mu\text{m}/\text{h}$ 程度で AlN を成長させたとき、モノレイヤステップで原子的に平坦な表面を得ることに成功した。（10-12）面 XRC-FWHM は 150arcsec を達成した。アニールスパッタ AlN と比較して O、C、Si すべての不純物濃度が大きく低下していると分かった。AlN 成長後の刃状転位密度は 10^8 cm^{-2} 台であり、下地の結晶性を引き継ぎ低転位密度であることが分かった。以上より低転位密度かつ低不純物濃度で平坦な表面を持つ AlN 膜の作製が可能になった。HVPE 法を用いて厚さ 10 μm の AlN 膜の成長を行い、膜厚とともに結晶性が向上することを明らかにした。

WP2 では、Sp-AlN テンプレート上に表面平坦性の良い Al 組成 70% 程度の AlGaIn の作製が可能となった。この条件を用いて p-AlGaIn の成長条件最適化に取り組んだ。Mg のドーピング量による表面形状および結晶性を検討した。X 線回折装置を用いて（10-12）面の ω ロッキングカーブ測定を行った結果、Mg/Ⅲを 0.06 以上に増加させると、下地の AlN と比較し、AlGaIn 結晶の半値幅が大きくなることが分かった。これらについて AFM 測定を行った結果、Mg/Ⅲを 0.06 以上において六角形のヒロックが高密度に形成され、表面平坦性が悪化していることが分かった。そこで表面平坦性が保たれた Mg/Ⅲ=0.032 の条件にて SIMS 測定により Mg のドーピング濃度を測定した結果、 $1E20/\text{cm}^3$ とデバイス作製に必要なドーピング量が得られていることが確認できた。これらに加え、p-AlGaIn 成長時の V/Ⅲ比の最適化を行った。その結果、V/Ⅲを上げることにより比抵抗が低減し、1400 の時に最も比抵抗が減少した。さらに V/Ⅲを増やすと再び比抵抗が上昇した。以上により、sp-AlN テンプレート上 p-AlGaIn : Mg 成長における最適な条件を確立することができた。紫外発光素子の高性能化が期待される h-BN について、交互供給法 MOVPE 成長の供給シーケンスを検討した。TEB を最初に供給した場合と NH_3 を最初に供給した場合と比較した AFM 測定結果、いずれも表面形状は似ており、顕著な違いは見られない。また、二つの試料の X 線回折スペクトル及び EBSD 測定結果から、h-BN がサファイア上にエピタキシャル成長していることが分かった。c 軸配向し、六回対称のパターンを有していることが分かる。以上により単結晶 h-BN を見出した。今後、AlGaIn 系深紫外発光素子に応用する。AlGaIn 系深紫外発光素子に相応しい AlN 基板作製については、WP1 の Sp-AlN/6H-SiC テンプレート上に厚膜 AlN 成長条件を検討した。最適化した成長温度・成長圧力で 36 時間の成長を行い、AlN の厚膜化を試みた。面積約 10mm \times 10mm、厚さ約 1mm の AlN 膜の作製に成功し、最適化したプロセスにより更なる大面積化や厚膜化の指針を得た。