

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：ナノコラム結晶による窒化物半導体レーザの新展開

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）：

研究代表者

岸野 克巳（上智大学 理工学部 教授）

主たる共同研究者

川上 養一（京都大学 工学研究科・電子工学専攻 教授）

3. 研究実施概要

GaN ナノコラムは、研究代表者らが rf-MBE 自己形成法によって世界で最初に発見し、先導的に研究を進めてきた。本研究では、ナノコラム結晶特性を活用して、窒化物レーザ/LED 波長域の拡大を阻んでいる課題を克服すべく、単一および集団ナノコラムで発現される物性現象とナノ結晶効果を学術的に探求しつつ、結晶成長とデバイス作製を行って、緑色 InGaN 系半導体レーザ、三原色 InGaN 系 LED 実現の基盤技術の開拓を進めた。

自己形成ナノコラムによる InGaN 系 LED の電流注入発光は、赤、黄色、緑、青などの多色発光スポットが観測されることがあり、これは自己形成ナノコラムのランダム性に起因する現象である。そのランダム性から発現される物性現象に注目して集団ナノコラム物性（光物性、フォノン物性、ランダム性）を探究するとともに、ナノコラム固有の物性を明確にするため、緑色発光域で単一ナノコラム光物性の解明を進めた。

集団ナノコラムでは、光のアンダーソン局在の直接観測を行い、GaN 系半導体において最初のランダムレーズング観測に成功し、一方、単一ナノコラム研究では、ナノコラム内の歪低減効果によって、分極誘起電界による量子閉じ込めシュタルク効果がほとんど発生していないことを実験的に示し、その波及効果として InGaN/GaN 系で初めて正の励起子分子束縛エネルギーを観測して、ナノコラム物性の理解に大きな進展をもたらした。

GaN ナノコラムの rf-プラズマ分子線エピタキシーによる選択成長法を初めて開拓し、コラム径と位置が高精度に制御された規則配列ナノコラムの作製法を確立した。このナノコラム規則配列化を基礎にして上記の多色発光メカニズムの解明が進み、ナノコラムからの発光色がコラム径、コラム周期およびコラム高さで変化することを実験的に見出して、青色～赤色の可視全域に亘るナノコラム発光色制御法を確立した。さらに、コラム径の異なる規則配列ナノコラム LED を同一基板上に作製し、緑色と橙色ナノコラム LED の一体集積化を実証し、集積型三原色 LED 開拓への道筋を拓いた。

ナノコラム規則配列化を基礎にアレイ型ナノコラムレーザの探索を進めた。光とナノコラム周期構造との二次元的な相互作用によって、光回折波長で強い光閉じ込め作用を発現させ、波長域 530-566nm で光励起緑色レーザ発振を観測して、ナノコラムの緑色域レーザ発振可能性を示した。さらに高反射率 GaN/AlN 多層膜反射器 (DBR) の作製法を開拓し、DBR 共振器内に集積化された規則配列ナノコラムにおいて光励起レーザ発振を確認し、面発光型緑色域ナノコラムレーザの基盤技術を確立した。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果（論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む）

InGaN 系発光デバイスでは長波長化とともに結晶性の劣化が著しく、緑色 LED の発光効率は依然として低いことが大きな課題である。このような現状に対し、本研究では、研究代表者が提案し

た GaN ナノコラムに注目し、ナノコラム結晶の無転位性、結晶歪と In 組成揺らぎの軽減を基本戦略として研究をすすめ、ナノコラム LED の発光色制御を可能にし、三原色ナノ LED への道を切り拓いた。

具体的には、自己形成ナノコラムから規則配列ナノコラムを実現、コラム径の作製精度 $\pm 2\%$ を達成した。これによりコラム径による発光色制御が可能となり、さらに種々のタイプの緑色域ナノコラムレーザの研究が展開された。一方で、ナノコラムの物性と結晶評価についての詳細な検討を行い、GaN ナノコラムの基礎的性質が系統的に明らかにした。

さらに研究チームは、規則配列ナノコラム LED の発光色がコラム径とコラム周期で変化すること、さらには、可発光色視全域で変化することを発見している。この事実を踏まえて新たに異なる発光色ナノコラム LED を同一基板上に集積化することを試み、三原色 LED の一体集積化、さらには三原色集積レーザの実現に道筋をつける成果を得た。これは当初計画では想定されていなかった新たな展開であり大きく評価される。

以上の成果について研究チームは、原著論文 50 編、招待講演 58 件、口頭発表 152 件と時機適切に外部発表を行い、ナノコラム研究分野の活性化という好ましい状況をもたらしたことは、同研究分野の今後の発展に大きく寄与したといえよう。また同チームは、成果として得られた基本技術についても国内特許出願 8 件、海外特許出願 6 件を行っており、成果の社会化に向け着実に取り組んだと判断される。

こうした一連の成果は、研究代表者が上智大学グループと京都大学のグループを有機的に連携して研究を進めてきた結果であるといえ、研究代表者が優れたリーダーシップを発揮したゆえであるといえよう。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

研究チームは研究代表者が提案する GaN ナノコラム結晶により、現状の大きな課題である InGaN 系半導体結晶の欠点を克服し、発光効率の高い緑色 LED を実現した点で高く評価できる。その上で三原色 LED 一体集積化を可能にし、新たなフルカラーディスプレイの実現への道を切り拓いたことは、産業化へ向けた基礎技術の確立としての意義は大きい。

同チームはまた研究成果をベースにナノコラムレーザの実現に向けて研究を進めており、これは今後の展開が期待できるものである。

以上の本研究の成果であるナノコラム LED、レーザは、Si 基板上で作製できることから安価で量産化につながる基盤技術である。ここで開発される素子は次世代のディスプレイ光源として、我が国がリードできるものであり、今後の発展を期待する。

4-3. 総合的評価

本研究は、ナノコラム結晶効果を駆使して、窒化物レーザならびに窒化物 LED の波長域拡大を阻んでいる課題解決に挑戦し、単一および集団ナノコラムで発現される物性現象とナノ結晶効果を学術的に解明すると共に、選択成長による周期配列ナノコラムの作製技術を確立し、緑色 InGaN 系半導体レーザや三原色 InGaN 系 LED 実現のための基盤技術を開拓したものであり、研究領域の趣旨にてらして、十分な成果が得られていると判断される。

本研究で目標としているフルカラーディスプレイ用の高効率緑色発光デバイスの実用化の観点からは、発光波長の精密制御、光強度の向上、電流注入レーザー発振の実現など、幾つかの課題が残

っているが、遠からず解決されることを期待したい。