

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔研究進捗評価用〕

平成24年度採択分

平成27年 5月29日現在

研究課題名（和文） **ナノ結晶効果によるエネルギー・環境
適合デバイスの革新**
研究課題名（英文） Innovation of energy and environment-
friendly devices by nanocrystal effect
課題番号：24000013
研究代表者 岸野 克巳 (KISHINO KATSUMI)
上智大学・理工学部・教授



研究の概要：GaN ナノコラムの高密度・高精度規則配列化を行い、コラム径 27nm までのナノコラム細線化を達成し、細線化で顕在化するナノ結晶効果の学術的解明を進めた。ナノコラム規則配列化で発現される発光色制御とフォトリソニック結晶効果を基礎に、多色集積型ナノコラム LED、スペckル雑音フリーレーザ、狭い放射ビーム LED などの基礎技術を開拓した。

研究分野：応用光学・量子光工学

キーワード：光エレクトロニクス、半導体、光物性、レーザ

1. 研究開始当初の背景

窒化物半導体(InGaN 系)LED は、緑から赤色域になると急激に発光効率が減少する。半導体レーザの動作電流も緑色域以上では長波長化とともに急増する。GaN ナノコラムは、研究代表者らが最初に発見し、先導的に研究を進めてきた一次元ナノ結晶である。

2. 研究の目的

規則配列 GaN ナノコラム結晶を用いて、コラム径細線化で発現されるナノ結晶効果を学術的に解明し、ナノ結晶効果によって InGaN 系デバイスが直面する材料的課題を克服して、革新的なエネルギー・環境適合デバイスの基盤技術を開拓することを目的とする。

3. 研究の方法

GaN ナノコラムは貫通転位フリーで、自立性結晶であり、基板によらずに高品質結晶が得られ、コラム細線化とともに、In 組成揺らぎ、格子ひずみ、結晶欠陥発生の抑制、光取り出し効率の向上が期待される。これらのナノ結晶効果は InGaN 系材料の発光効率向上に寄与し得る。GaN ナノコラム内に InGaN 量子井戸層を内在化させ、コラム径を未踏破の 50nm 以下域まで細線化させながら、ナノ結晶効果の学術的な解明を進める。さらに電子のド・ブロイ波長程度(～30nm)のコラム径で顕在化する量子ドット効果などのナノコラム物性を探求する。規則配列 InGaN 系ナノコラムでは、フォトリソニック結晶効果、コラム径による発光色制御が得られる。本研究では、ナノ結晶効果とナノコラム効果を活用して、InGaN 系デバイスの課題解決に挑戦する。

4. これまでの成果

(1) GaN ナノコラムの細線化

高密度で微細なナノホールパターンでは成長核形成が不均一に起こるため、コラム径 50nm 以下の超細線・規則配列 GaN ナノコラムの均一成は未踏破域である。新たに二段階選択成長法を開拓し、図1に示すように、ナノコラム細線化(コラム径 27nm)を得た。デバイス領域(50×50 μm²)に 50 万本以上のナノコラムをもつ高密度・規則配列ナノコラムでは 30nm 以下の細線化は例がなく、結晶工学的にも意義深い成果である。コラム径を 200～30nm 域で細かく系統的に変化させ、ナノコラムで発現されるナノ結晶効果(貫通転位、In 組成揺らぎ、格子ひずみの抑制、量子ドット効果)を探究した。超細線域までの規則配列化は本研究の独壇場で、他では容易になし得ない探究であり、独創的で新規性が高い。

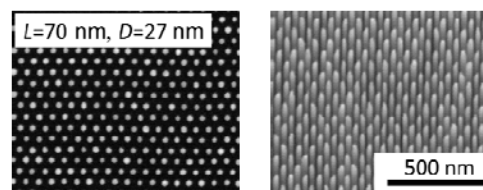


図1 規則配列 GaN ナノコラムの細線化

(2) 多色集積型ナノコラム LED

コラム周期と径を変化させて規則配列ナノコラムを成長し、コラム径による発光色変化を観測し、発光色制御メカニズムの理解を進めた。4 種類のナノコラム LED を同一基板上に成長させ、四色集積型ナノコラム LED を実現した(図2)。周期の異なる接近した LED ユニットから赤色発光が得られ、三原色 LED

の微小領域・集積化の基礎技術を開拓した。

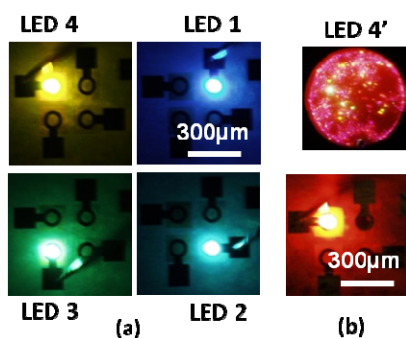


図2 多色集積型ナノコラムLED

(3) 高指向性放射ビーム特性

規則配列ナノコラムの光回折を活用して、指向性の高い鋭い放射ビームをもつナノコラムLEDを実現した(図3)。黄色発光で放射角は±20度であったが、発光波長の安定性が高く、電流密度変化 $250\text{A}/\text{cm}^2$ に対する波長変動幅は 0.2nm 以下である。青、緑、黄、橙、赤色で試作に成功した。この優れたビーム特性は、レンズ系を簡易化しディスプレイ応用に革新をもたらす。

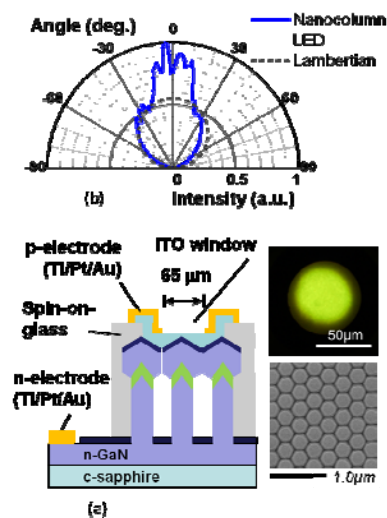


図6 高い指向性の放射ビーム特性をもつナノコラムLED

(4) スペックル雑音フリーレーザ

選択成長法を用いて、一定のコラム周期でコラム径を一次元的に変調させ、ランダムレーザリング現象を発現させ、光励起でスペクトル全幅 30nm のレーザ発振を得た。通常のレーザでは工夫してもスペクトル幅は数 nm が限度で、この特性は、スペックル雑音を極小化させ、ディスプレイ応用にインパクトを与える。

5. 今後の計画

(1) ランダム配列と規則配列の境界領域でナノコラム系を制御し、光局在を実験的・理論

的に調べ光局在ナノコラム物理を確立する。

- (2) AlGaIn/GaN 多層膜反射鏡上にナノコラムレーザ構造を作り、電流注入発振を実現する。
 (3) フリップチップ型自立ナノコラムLEDの試作を進め、LED特性の高性能化を図る。
 (4) グラフェン/SiO₂基板上のGaNナノコラム選択成長(SAG)法を開拓し、ガラスあるいは誘電体多層膜反射鏡上のナノコラムデバイス作製の基礎技術を開拓する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- (1) K. Kishino, A. Yanagihara, K. Ikeda, and K. Yamano, “Monolithic Integration of Four-Color InGaIn-based Nanocolumn LEDs”, *Electron. Lett.* **51**, 852-854 (2015).
 (2) H. Hayashi, D. Fukushima, D. Tomimatsu, T. Noma, Y. Konno, and K. Kishino, “Flip-chip bonding and fabrication of well-ordered nanocolumn arrays on sputter-deposited AlN/Si (111) substrate”, *Phys. Status Solidi A* **212**, 992-996 (2015).
 (3) K. Kishino and S. Ishizawa, “Selective-area growth of GaN nanocolumns on Si (111) substrates for application to nanocolumn emitters with systematic analysis of dislocation filtering effect of nanocolumns”, *Nanotechnology* **26**, 225602 (13pp) (2015).
 (4) A. Yanagihara, S. Ishizawa, and K. Kishino, “Directional radiation beam from yellow-emitting InGaIn-based nanocolumn LEDs with ordered bottom-up nanocolumn array”, *Appl. Phys. Express* **7**, 112102 (4pp) (2014).
 (5) K. Kishino and K. Yamano, “Green-Light Nanocolumn Light Emitting Diodes with Triangular-Lattice Uniform Arrays of InGaIn-Based Nanocolumns”, *IEEE J. Quantum Electron.* **50**, 538-547 (2014).
 (6) Y. Igawa, R. Vadivelu and K. Kishino, “Photoluminescence Behaviors of Orange-Light-Emitting InGaIn-Based Nanocolumns Exhibiting High Internal Quantum Efficiency (17-22%)”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 08JD09 (3pp) (2013).
 (7) K. Kishino, K. Nagashima, and K. Yamano, “Monolithic Integration of InGaIn-Based Nanocolumn Light-Emitting Diodes with different Emission Colors”, *Appl. Phys. Express* **6**, 012101 (3pp) (2013).

ホームページ等

<https://www.youtube.com/watch?v=hFohS G8MYb8>