

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分
平成30年3月22日現在

窒化物ナノ局在系の物性制御によるテーラーメイド光源の実現

Achievement of Tailor-made Lighting Sources by the Control of Nanoscopic Carrier Localization in Nitride Semiconductors

課題番号：15H05732

川上 養一 (Kawakami Yoichi)

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

本研究は、GaN (AlN) 基板上への3次元 InGaN (AlGaIn) 系ナノ構造を成長し、ピエゾ分極制御やプラズモニクス効果による高効率化を実現し、多波長発光デバイスを開発することを目的としている。近接場分光を駆使した時間・空間・波長の多次元測定を通して得られた発光・非発光中心の知見を結晶構造や成長条件にフィードバックして研究を遂行する。

研究分野：工学

キーワード：新機能性発光デバイス

1. 研究開始当初の背景

近年の窒化物半導体の研究進展はめざましく、InGaN 量子井戸を活性層とする発光ダイオード(LED)が開発され、極めて高い効率の青色LEDが実用化されている。しかしながら、高電流注入で発光効率の低下する「Droop」現象、活性層のIn組成を増加させた緑色LEDの効率低下といった「Green-gap」問題、さらには、紫外の短波長領域での効率低下問題は未解決であり、LED 固体照明の発展のための重要な課題となっている。また、半導体の3次元構造を利用した多波長発光素子の研究は端緒についたところである。

2. 研究の目的

本研究の発想は、これまで精力的に行ってきた発光ナノ中心へのキャリア局在化に関する基礎物性の研究に端を発している。本研究プロジェクトは、このキャリア局在化の制御によって発光スペクトル合成を実現しようという発想による。すなわち、(Al,Ga,In)N 系半導体におけるナノ・マイクロ構造から任意の波長の光を高効率で発光させるための技術を確立し、テーラーメイド照明光源を実現することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究の特色は、図1に示すような InGaIn マルチファセットからなる3次元構造に代表される新しい発光素子の設計概念の確立と物性制御を通して、所望の物体色を実現できる次世代照明工学に貢献しようというアプローチにある。具体的には、

(1) 半極性基板上へのホモエピ成長やマル

チファセット3次元構造などの活用などを通じて、有機金属気相成長による高品質 In (Al) リッチ InGaIn (AlGaIn) マイクロ・ナノ構造を作製する。

- (2) 近接場光学による分光計測において、高い空間分解能と時間分解能を両立させて、発光スペクトル検出する。このことにより、InGaIn (AlGaIn) ナノ構造中の局在発光中心を詳細に評価する。
- (3) (2)を(1)に適用することで、最適な成長条件やデバイス構造に関する指針を得て、ポジティブにフィードバックする。とりわけ、混晶組成比制御、内部分極制御、プラズモニクス効果によって、目的とする多波長発光制御と高効率化を目指す、次世代照明光源を実現する。

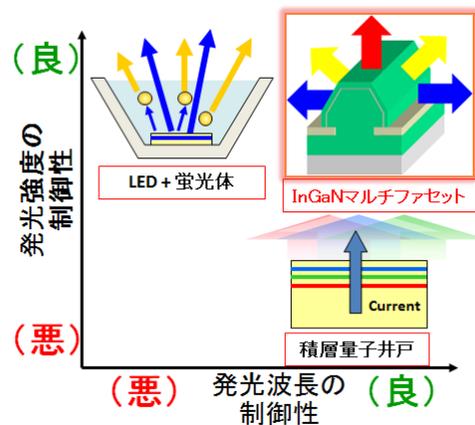


図1 各方式からなる白色LEDの優劣比較

4. これまでの成果

(1) 新奇 3 次元 InGaN 量子井戸の作製

3 次元 InGaN 量子井戸は、蛍光体フリーな白色光源として有望である。しかし、これまで試作してきた構造では、最長波長の発光を担う In リッチ InGaN 量子井戸が(0001)極性面に作製されており、分極誘起電界のために発光効率が低くなるという問題があった。そこで本研究では、{11 $\bar{2}$ 2}半極性 GaN 基板上に、三次元 InGaN 量子井戸を作製した。図 2(a)に、得られた三次元 GaN 構造の断面 SEM 像を示す。ファセット面は{1 $\bar{1}$ 00}無極性面、{1 $\bar{1}$ 01}および(1 $\bar{1}$ 2 $\bar{2}$)半極性面で構成されており、極性面フリーを実現している。また、各ファセット面上でのカソードルミネッセンス (CL) 発光スペクトルを図 2(b)に示す。{1 $\bar{1}$ 00}面で約 390 nm、{1 $\bar{1}$ 01}面で約 480 nm、(1 $\bar{1}$ 2 $\bar{2}$)面で約 440 nm の発光ピーク波長を示し、高効率な多色発光を実現した。

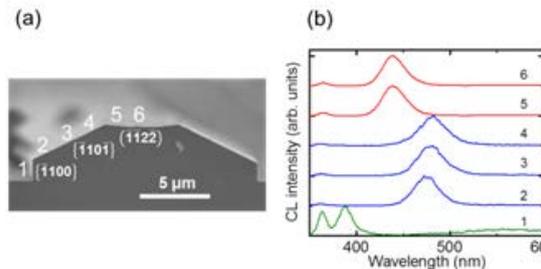


図 2 : (a) 極性面フリー-3 次元 InGaN 量子井戸構造の断面 SEM 像, (b) 各場所からの CL スペクトル

(2) 3 次元 AlGaIn 量子井戸による深紫外多波長発光ダイオードの試作

深紫外光による樹脂硬化などのキュアリング応用では、表面と内部の同時硬化を行うために、多波長深紫外発光素子の実現が望まれている。AlGaIn 系 3 次元構造を作製するための手法として、誘電体マスクを用いる手法が適用できないため、AIN エピタキシャル膜に[11 $\bar{2}$ 0]方向のストライプ溝を形成した AIN/サファイア基板テンプレート上への再成長を試みた。その結果、{1 $\bar{1}$ 01}と(0001)面で構成された AIN 系 3 次元構造を作製でき、この上に深紫外域で多波長発光する AlGaIn 量子井戸構造を作製することに成功した。これらの成果を基に、3 次元 LED 構造(図 3(a))の試作を行い、深紫外多波長発光 LED (図 3(b)) の電流注入発光に初めて成功した。

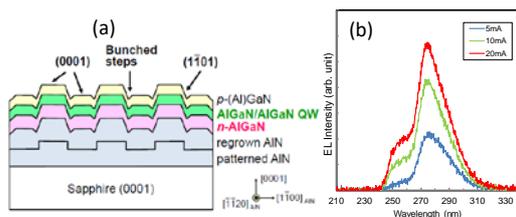


図 3 : (a) 3 次元 AlGaIn 量子井戸からなる LED の断面構造, (b) LED からの深紫外多波長スペクトル

5. 今後の計画

新奇基板・テンプレートを用いて窒化物半導体の 3 次元構造成長に関する研究を深化させる。さらに、励起子の分極制御やプラズモニクス応用によって、窒化物半導体のナノ局在発光中心を制御し、合成できる発光波長範囲の拡大や高効率化を目指して行く。その際に、近接場光学顕微鏡による高分解能分光マッピングを駆使して、所望の物性が発現しているかどうかを精査する。このことによって、可視および紫外域をカバーする多波長テラレーメイド光源の実現のみならず光材料科学の発展にも寄与するものと期待している。

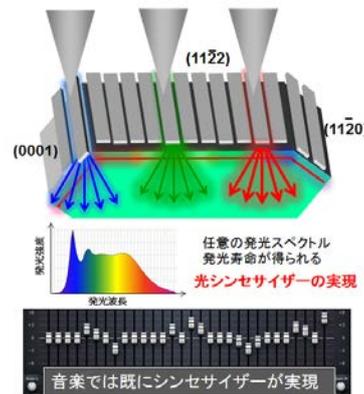


図 4 : 目標とするテラレーメイド光源

6. これまでの発表論文等 (代表 5 件)

- K. Kataoka, M. Funato, Y. Kawakami, "Development of polychromatic ultraviolet light-emitting diodes based on three-dimensional AlGaIn quantum wells", APPLIED PHYSICS EXPRESS, Vol. 11, No. 3, p. 031001, 2017.
 - Y. Matsuda, M. Funato, Y. Kawakami, "Polychromatic emission from polar-plane-free faceted InGaIn quantum wells with high radiative recombination probabilities", APPLIED PHYSICS EXPRESS, Vol. 10, No. 7, p. 071003, 2017.
 - K. Kataoka, M. Funato, Y. Kawakami, "Deep-ultraviolet polychromatic emission from three-dimensionally structured AlGaIn quantum wells", APPLIED PHYSICS EXPRESS, Vol. 10, No. 3, p. 031001, 2017.
 - K. Okamoto, M. Funato, Y. Kawakami, K. Tamada, "High-efficiency light emission by means of exciton-surface-plasmon coupling", JOURNAL OF PHOTOCHEMISTRY AND PHOTOBIOLOGY C, Vol. 32, , p. 58-77, 2017.
 - Y. Kawakami, A. Kaneta, A. Hashiya, M. Funato, "Impact of Radiative and Nonradiative Recombination Processes on the Efficiency-Droop Phenomenon in InxGa1-xN Single Quantum Wells Studied by Scanning Near-Field Optical Microscopy", PHYSICAL REVIEW APPLIED, Vol. 6, No. 4, 044018, 2016.
- ホームページ等
<http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/>