

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020～2024  
課題番号：20H05622  
研究課題名：発光シンセサイザー：究極の発光デバイス創成を目指して

研究代表者氏名（ローマ字）：川上 養一（KAWAKAMI Yoichi）  
所属研究機関・部局・職：京都大学・工学研究科・教授  
研究者番号：30214604

研究の概要（4行以内）：

本研究は、半導体3次元構造による発光波長の合成、分極制御・プラズモニクス効果などによる高効率発光に着目し、任意の波長の光を高い輻射再結合確率で発光させる発光シンセサイザーの開発を目指す。このことにより、究極のテラレーメイド照明光源や深紫外多波長光源を実現する。さらに、光源の多波長・高速スイッチングによる光空間無線通信（Li-Fi）を実証し、次世代通信システムへの基盤を確立する。

研究分野：光材料物性工学、結晶工学、応用電子物性工学

キーワード：発光シンセサイザー、テラレーメイド照明、半導体3次元構造、次世代フォトニクス

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極めて高い効率の青色発光ダイオード（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、活性層のAl組成を増加させた深紫外AlGaN系LEDの効率低下といった「UV-threshold」問題は未解決であり、高効率・多波長発光制御は次世代の照明応用のために克服すべき重要な課題と位置づけられている。

2．研究の目的

本研究は、図1に示すような半導体3次元構造による発光シンセサイザーの開発を目指す。具体的には、3次元InGaN（可視全域）および3次元AlGaN（深紫外域）の多波長制御と高効率発光にむけて、マイクロスケールのポテンシャル揺らぎとナノスケールのポテンシャル揺らぎのそれぞれに分けて取り組んで行くことが有効である。すなわち、前者は3次元構造における混晶組成や分極効果の違いによる多波長化に、後者はナノスケールでの小さな空間階層でのポテンシャル揺らぎによる励起子の局在化を誘起しうするため、高効率化に寄与する。さらに、励起子の分極・局在制御のみならず、励起子からプラズモンへの素励起移動を活用し、発光遷移確率の増強を目指す。

このことにより、発光波長の制御、発光効率の増大、発光スイッチ速度の高速化を達成し、任意の演色性を可能とする次世代の「照明工学」や高度な加工・環境センシングに求められる深紫外フォトニクスを実現する。さらに、光源の光空間無線通信（Li-Fi; Light Fidelity）を実証し、光高速通信への基盤を確立する。

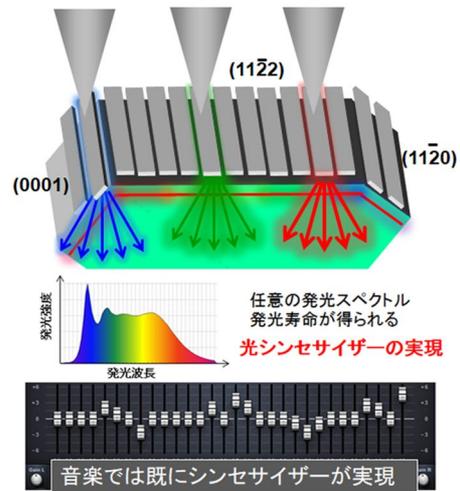


図1 目的とする発光シンセサイザーの概念図

3．研究の方法

本研究課題は、図2に示すように、「①：新機能照明デバイス」「②：半導体3次元構造作製」「③：ナノ光物性解明・制御」からなる。すなわち、①の新機能性光デバイスの創成や光応用への展開を推進するためには、②の半導体3次元構造作製の技術開拓が重要であるが、③のナノ光物性解明・制御によって得られた成果を相互にフィードバックすることが重要であると考えており、各研究課題の成果を密接に連携し合って研究を推進して行く。

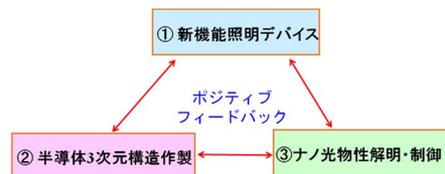


図2 本研究の実施体制

#### 4. これまでの成果

半極性(1122)GaN基板上へのGaNのMOVPEホモエピタキシャル成長においてドーピングによる伝導度制御を試みた初期の実験においては、Siドープn型GaNとMgドープp型GaNの界面でのSi、Mgプロファイルの広がりが大きく、また、CやOなど補償欠陥となる残留不純物の濃度も高いなどの問題に直面していた。そこで、結晶成長機構に立ち返った検討を行い、従来よりも高い成長圧力(550Torr)による急峻な界面プロファイル、低いII/III原料供給比と高い成長圧力によりCやOなどの残留不純物の低減を達成した。その結果、図3のSEM(走査型電子顕微鏡)像に示すように極性面フリーなマルチファセット構造の伝導度制御に初めて成功し、順方向バイアス・電流駆動時に図4に示すような発光スペクトルを観察した。3次元LEDの中心波長は510nm付近(青緑色)にあるが、短波長側の裾が400nm(青紫色)、長波長の裾が600nm(赤色)となっており、各ファセットからの発光により平坦膜LEDよりもブロードなスペクトル合成に成功した。これは、極性面フリーなマルチファセット構造による多波長発光LEDの動作実証に初めて成功した成果である。

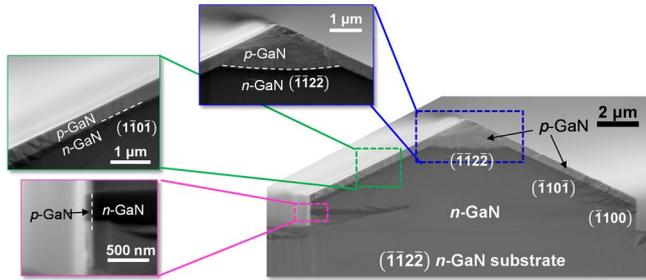


図3 極性面フリーマルチファセット構造の断面SEM像。  
コントラストより各ファセット面へのpn接合形成を確認。

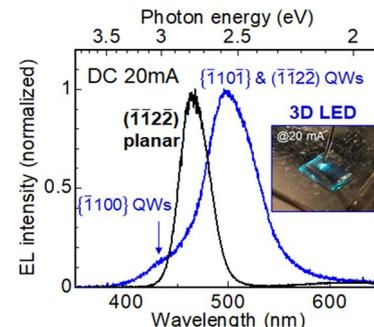


図4 3次元LED構造の発光スペクトル

#### 5. 今後の計画

##### (1) InGa系3次元構造による多波長発光の研究

InGa系3次元構造作製に関して複数のマスクパターンを組み合わせることによりスペクトル合成を深化させ、多波長発光の色度座標上でのチューニング領域拡大や白色LEDとしての演色性評価などに取り組む。

##### (2) InGa系3次元構造LEDのLi-Fi応用に向けた特性評価

Li-Fi測定装置を構築し、3次元多色発光LEDの3dB帯域を評価し、多色発光による大容量化と、半極性面の高速応答による変調帯域の向上により、大容量・超高速通信の光空間無線通信を目指す。

##### (3) AlGa系深紫外発光構造の短波長化

220nm域のfar UVC領域は、人体への影響が少なくウイルスのみを選択的に不活性化させるため高効率LED開発が喫緊の課題となっている。独自のAlGa系局在発光中心の形成により高効率化を目指す。

##### (4) 深紫外SNOMの開発

可視・紫外の多波長発光構造の光物性を議論する上でその評価技術を発展させることは大変重要であり、種々のSNOM方式を探索することで、新測定技術の確立と発光非発光機構の解明へと繋げる。

##### (5) プラズモニクス効果による発光波長制御・高効率化

金属種、ナノ構造、配列によるプラズモニクス制御と3次元InGa構造を組み合わせることで、可視域全域および近紫外から深紫外域までの広範囲において多波長発光の波長制御と高効率化を達成する。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- (1) "Singularity structures for sub-250-nm emissions from AlGa-based semiconductors", M. Funato and Y. Kawakami, *Japanese Journal of Applied Physics*, **60**, 120501/1-9 (2021). (STAP review)
- (2) "Growth evolution of polar-plane-free faceted GaN structures on (11-22) and (-1-12-2) GaN substrates", Y. Matsuda, M. Funato, and Y. Kawakami, *Journal of Applied Physics*, **129**, 163104/1-7 (2021).
- (3) "Metallic nanovoid and nano hemisphere structures fabricated via simple methods to control localized surface plasmon resonances in UV and near IR wavelength regions", K. Shimanoe, S. Endo, T. Matsuyama, K. Wada and K. Okamoto, *Applied Physics Express*, **14**, 042007/1-5 (2021).
- (4) "Influence of substrate misorientation on the emission and waveguiding properties of a blue (In,Al,Ga)N laser-like structure studied by synchrotron radiation microbeam X-ray diffraction", A. Kafar, R. Ishii, Y. Matsuda, T. Suski, P. Perlin, M. Funato, and Y. Kawakami, et al. (計12名), *Photonics Research*, **9**, 299 - 307 (2021).
- (5) "Doping and fabrication of polar-plane-free faceted InGa LEDs with polychromatic emission properties on (-1-12-2) semipolar planes", Y. Matsuda, M. Funato, and Y. Kawakami, *Journal of Applied Physics*, **128**, 213103/1 - 9 (2020). (19報中代表的な5報を抜粋した)

#### 7. ホームページ等

<http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/>