

平成 21年 5月 11日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006年 ~ 2010年

課題番号：18069014

研究課題名（和文） InAlGaN 窒化物 4 元混晶を用いた紫外高効率発光デバイスの研究

研究課題名（英文） Research on high-efficiency ultraviolet emitting devices using quaternary InAlGaN

研究代表者 平山 秀樹

独立行政法人理化学研究所・テラヘルツ量子素子研究チーム・チームリーダー

研究者番号：70270593

研究分野：量子電子・光デバイス工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物性・結晶工学

キーワード：紫外 LED、貫通転位、外部量子効率、窒化物半導体、結晶成長

1. 研究計画の概要

紫外高効率発光ダイオード（LED）、半導体レーザ（LD）は、殺菌・浄水、医療、公害物質の高速分解処理、白色照明、高密度光記録等、幅広い分野での応用が期待されている。本研究は波長 250-350nm の紫外領域の窒化物高効率 LED、LD を実現することを目的とする。波長が 360nm より短い紫外領域においては、高輝度紫外発光材料の欠如、ワイドバンドギャップ型窒化物の欠如、ならびに低貫通転位密度 AlN 基板の欠如のため、未だ高効率 LED、LD は実現していない。本研究では、ワイドバンドギャップ AlGaIn（窒化アルミニウムガリウム）に In（インジウム）を加え、In 組成変調領域への電子局在効果、あるいは、点欠陥の低減効果により、常温紫外高効率発光、ならびに高濃度 p 型ドーピングを実現する。以下の項目を実現することにより、波長 250-350nm の紫外領域の高効率 LED ならびに半導体レーザの実現を試みる。

（1）高品質 InAlGaIn 量子井戸を成長し高い内部量子効率を目指す。含有不純物濃度、点欠陥密度の低減を行うことで最終的には内部量子効率 70%以上を目指す。

（2）p 型 AlGaIn に In を混入することで高ホール濃度を実現する。貫通転位の低減と In の混入により点欠陥を減少させ自己補償効果を抑制することでホール濃度の改善を試みる。

（3）高品質 AlN 基板の作製を行う。サファイア基板上に MOCVD 法を用いて厚膜 AlN

を体積させることにより、低転位密度 AlN を実現する。

（4）垂直注入構造を導入する。ヒートシンクへのエピ面ボンディングとサファイア基板のリフトオフにより垂直電流注入構造とし効率よい素子冷却を行うことにより高効率化を行う。

2. 研究の進捗状況

当初、短波長 LED の実現が不可能であったため、まず、低貫通転位 AlN の作製と AlGaIn 量子井戸発光の高効率化を行った。「アンモニアパルス供給多段成長法」を独自に考案しそれを用いて、サファイア上 AlN の転位密度を約 1/30 に低減することに成功した。AlN の転位低減により、250-280nm 発光 AlGaIn 量子井戸の内部量子効率は 0.5%以下から、30%程度に回復した。高効率発光 AlGaIn 量子井戸を用いることで波長 231-261nm の短波において 5 μ W-0.6mW出力のシングルピーク LED の実現に成功した。さらに、バリアの高い電子ブロック層、極薄膜量子井戸の導入、AlN のさらなる高品質化などを実行することで LED の高効率を行い、波長 222-234nm においてサブミリワット、241-256nm で 1-4mW、264-282nm において 10mW以上の出力を世界で初めて実現した。

さらに短波長発光 AlGaIn に In の導入を行い高効率発光と高濃度 p 型の実現を行った。InAlGaIn の結晶成長レートを極低速化する

ことで、高 Al 組成 InAlGa_N の高品質結晶成長をはじめて実現した。また、シリコンをライトドープすることで InAlGa_N の平坦性の飛躍的向上と酸素不純物濃度の低減が得られることを発見し、InAlGa_N 量子井戸の効率を飛躍的に向上させた。280nm 発光 InAlGa_N 量子井戸で室温において推定 80% 以上の内部量子効率を観測した。また、p 型 AlGa_N と p 型 InAlGa_N を用いた LED の出力比較を行い、In 混入系のほうが数倍高い出力が得られることを明らかにした。p 型 n 型、量子井戸層のすべてを InAlGa_N で構成した LED を初めて作製し、280nm 帯において 10mW 以上の CW 出力、1.2% の外部量子効率を実現した。これらの結果、波長 222-282nm でシングルチップとして世界最高出力、波長 222-265nm で最高外部量子効率を記録した。

3 . 現在までの達成度

当初の計画以上に進展している。

当初、本研究では 300nm より短波の LED は実現していなかったが、新規 AlN 成長法の確立、高い内部量子効率の実現、短波長発光 InAlGa_N 層の実現を短期間に実現し、最短波長領域 LED の世界最高出力・効率を実現したので、当初計画以上に進展したと考えられる。

4 . 今後の研究の推進方策

(1) AlN の更なる高品質化を行うことで LED の高効率化を行う。現在の方法に加え HVPE 法によるエピ、ELO-AlN の形成を併用することで転位密度を低減し、LED 高効率化と LD の実現を試みる。

(2) 光取り出し効率向上による LED 効率の改善を行う。現在紫外 LED の光取り出し効率は

10% 以下である。サファイア表面に 2 次元フォトニック結晶加工を行い、さらに p 型電極の紫外光反射率を改善するなどの方法を取り入れ、光取り出し効率を数倍向上させる試みである。

(3) p 型層のホール濃度を改善することで LED 発光層への電子注入効率を向上させる。現在電子注入効率は 30% 以下であることが予測される。また、紫外 LD 実現のためには高いホール濃度は必要不可欠であると考えられる。ホール濃度を 2 桁程度改善するためにはコドーピングなどの積極的な方法が必要であると考えられる。そのための基礎的な

研究を行い高ホール濃度の実現を試みる。

これらの研究を行うことで、紫外 LED において 5~10% 程度の外部量子効率を目指す。また、波長 330nm 程度の紫外 LD を試作し発振動作を目指す。

5 . 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 25 件)

H. Hirayama, N. Noguchi, S. Fujikawa, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki and N. Kamata, "222-282nm AlGa_N and InAlGa_N based high-efficiency deep-UV-LEDs fabricated on high-quality AlN", in press physica Status Solidi (a). (査読有)

H. Hirayama, N. Noguchi, T. Yatabe and N. Kamata, "227 nm AlGa_N light-emitting diode with 0.15 mW output power realized using thin quantum well and AlN buffer with reduced threading dislocation density", Appl. Phys. Express, **1**, 051101 (2008). (査読有)

H. Hirayama, T. Yatabe, N. Noguchi, T. Ohashi and N. Kamata, "226-273 nm AlGa_N deep-ultraviolet light-emitting diodes fabricated on multilayer AlN buffers on sapphire", Physica Status Solidi (c), **5**, 2969 (2008). (査読有)

H. Hirayama, T. Yatabe, T. Ohashi and N. Kamata, "Remarkable enhancement of 254-280 nm deep ultraviolet emission from AlGa_N quantum wells by using high-quality AlN buffer on sapphire", Physica Status Solidi (c), **5**, 2283 (2008). (査読有)

H. Hirayama, T. Yatabe, N. Noguchi, T. Ohashi and N. Kamata, "231-261nm AlGa_N deep-ultraviolet light-emitting diodes fabricated on AlN multilayer buffers grown by ammonia pulse-flow method on sapphire", Appl. Phys. Lett. **91**, 071901 (2007). (査読有)

[学会発表] (計 108 件)

[図書] (計 3 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 12 件)

取得状況 (計 2 件)

[その他]

新聞発表 (計 11 件)