

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560377

研究課題名(和文) サブ波長ナノグレーティング構造を用いた高機能発光ダイオードの開発

研究課題名(英文) High performance light emitting diode by subwavelength grating

研究代表者

直井 美貴 (Naoi, Yoshiki)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：90253228

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、III族窒化物系発光ダイオードに、サブ波長周期構造を適用し、高機能発光ダイオードの開発を目指した。特に、紫外光領域における発光ダイオードの高機能化に焦点をあて、直線偏光紫外発光ダイオードの開発、また、その光取り出し効率改善について検討した。サブ波長回折格子内における固有モードの理論的検討および有限差分時間領域法(FDTD法)による電磁界分布計算により、高偏光を有する発光ダイオードの作製条件を決定した。最適構造のサブ波長回折格子を発光ダイオード表面に実装した結果、p偏光：s偏光 = 18 : 1の高偏光紫外発光ダイオードの作製に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have studied on the development of III-nitride light emitting diode(LED) by using subwavelength periodic structure. Especially, we have examined the high polarized light emitting diode in UV wavelength region. By the theoretical analysis of the eigen-mode and the calculation of the electromagnetic distribution within the subwavelength lattice region, we determined the optimum condition of the subwavelength grating for the fabrication of highly polarized UV-LED. We have succeeded the development of UV-LED with high polarization selectivity, p:s=18:1.

研究分野：半導体光デバイス

キーワード：偏光制御 発光ダイオード ナノ周期構造

1. 研究開始当初の背景

窒化物系発光ダイオードは、高輝度青色発光ダイオードや青紫色レーザーの実現以降、国内外の研究者により、依然として活発な研究開発がなされている。しかし、紫外領域においては、可視領域で有効な In の自然偏析による量子ドット効果がおこらない。そのため、ヘテロエピタキシャル成長においては、活性層中の高転位密度による内部量子効率の低下がおり、今なおその発光出力は小さいのが現状である。

また、窒化物系発光ダイオードは、大きな光出力という特徴による従来光源の代替だけでなく、その基礎特性を制御することにより、さらに応用分野の開拓が期待できる。その一つに、偏光特性がある。すぐれた偏光性を有する発光ダイオードは、液晶バックライトやイメージングデバイスなど多くの分野における利用が期待できる。また、紫外発光ダイオードを各種センサー分野へ応用する場合、優れた偏光性は S/N 比の向上、すなわち高感度化につながると期待できる。しかし、通常、窒化物系発光ダイオードは c 面サファイア基板上に成長され、光取り出し方向の c 軸表面方向の光出力は無偏光である。このため、r 面サファイア基板上への a 面や m 面（無極性面）窒化物薄膜成長による偏光制御が試みられているが、このヘテロエピタキシャル成長は非常に難しく、多くの成果はバルク基板上へのホモエピタキシャル成長によるものである。したがって、簡便で、製造コストの低い一般の c 面サファイア基板成長に適した技術が期待される。

2. 研究の目的

上記 1 の背景のもと、本研究では、現在、窒化物系発光ダイオードがもつ前述の課題を解決するために、サブ波長オーダのナノグレーティング構造を適用し、発光ダイオードの高機能化を目指し、窒化物系半導体による高出力直線偏光発光ダイオードを目的とした。

3. 研究の方法

サブ波長ナノグレーティングの窒化物系半導体への適用に関する理論的検討を行った。有限差分時間領域法 (FDTD 法) を用いた発光ダイオードの活性層からの電磁波の伝搬特性を数値計算および回折格子内に存在する固有モードの理論的検討を行った。その結果をもとに、有機金属気相成長法により成長した LED 試料に対して、その表面にナノ周期構造を電子線リソグラフィ法により形成し、その光学特性を評価した。

4. 研究成果

窒化物系紫外発光ダイオード表面に、サブ波長回折格子を実装した試料に対して偏光放射特性を調査した。電流注入発光スペクトルは、その紫外発光ダイオードが高い偏光選

択性を示し、波長 360nm において、s 偏光と p 偏光の強度比は、4 : 1 という高い偏光度を有する事を明らかにした。本結果は、c 面サファイア基板上に作製された窒化物 LED において、紫外領域で最も高い偏光度を示したものである。また、サブ波長回折格子内における屈折率の周期的空間分布の結果として生じる電磁波のプロット固有モードの観点および電磁波分布解析結果から、偏光度の低減が窒化物の有する高い屈折率による通常の回折現象によるものであることを明らかにした。

また、実験結果の詳細な検討の結果、ナノ周期構造の理想的構造からのずれ (特に垂直構造からのずれ) が偏光特性に大きく影響を与えることを FDTD 解析により固有モードの観点から明らかにした。

上記に記載した実験結果をもとに、通常の高次回折光を抑制した高偏光 LED を設計・製作した。LED 表面に 200nm の厚さをもつ SiO₂ を堆積させ、その後、高さ 90nm、幅 100nm、周期 200nm のシリコンサブ波長回折格子を電子ビーム露光により作製した LED 試料の光学特性を評価した。その結果、波長 360nm において、サブ波長構造がない場合は、無偏光発光するのに対し、構造を有した試料においては、p 偏光と s 偏光の強度比が 1.8 : 1 という高い偏光比を有する LED の開発が実証された。これは、SiO₂ 膜により LED 側からみたサブ波長条件が維持され、高次回折光抑制による偏光特性改善を実証したものである。また、偏光特性改善と同時に、サブ波長回折格子を有する試料では、構造なしの試料に対して、約 1.5 倍出力向上が達成できることも明らかにした。これは出力光に対する全反射臨界角が大きくなり、外部光取り出し効率が改善できた効果と考えている。ここで示した紫外発光ダイオードは、現段階で世界最高の偏光度を有している。本結果は、窒化物半導体技術と光学分野におけるナノグレーティング技術の融合により達成されたもので、紫外 LED のさらなる応用分野開拓および、従来グレーティングと異なる特異な性質をもつサブ波長グレーティング技術の新たなデバイス応用が強く期待できるものである。

5. 主な発表論文等

(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 1 件)

Yuusuke Takashima, Ryo Shimizu, Masanobu Haraguchi, Yoshiki Naoi, Polarized emission characteristics of UV-LED with subwavelength grating, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 53, No.7, pp.072101-1 - 072101-6, 2014, 査読有,
<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.072101>

[学会発表](計 20 件)

Yuusuke Takashima, Ryo Shimizu, Masanobu Haraguchi, Yoshiki Naoi, Improvement of polarization characteristics of UV-LED by using sub-wavelength grating with low index underlayer, 7th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, B1-0-11, Nagoya Univ.(Aichi, Nagoya), 2015.3.28

高島祐介、田邊聖人、清水亮、原口雅宣、直井美貴、Si サブ波長回折格子/SiO₂ 膜/LED 構造を有する窒化物系偏光 LED、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、13p-B1-7 頁、東海大学(神奈川県・平塚市)、2015 年 3 月 13 日

高島祐介、田邊聖人、佐竹正行、町田優奈、清水亮、原口雅宣、直井美貴、有限時間領域差分法による紫外域の多層サブ波長回折格子偏光特性の理論的検討、LED 総合フォーラム 2014-2015in 徳島、P-3 頁、徳島大学(徳島県・徳島市)、2015 年 1 月 10 日

町田優奈、高島祐介、清水亮、田邊聖人、佐竹正行、直井美貴、サブ波長金属回折格子を用いた紫外域偏光制御における材料及び構造設計指針の理論的検討、LED 総合フォーラム 2014-2015in 徳島、P-4 頁、徳島大学(徳島県・徳島市)、2015 年 1 月 10 日

高島祐介、清水亮、原口雅宣、直井美貴、多層サブ波長回折格子を用いた窒化物系直線偏光 LED、電子情報通信学会レーザー・量子エレクトロニクス研究会、17、大阪大学(大阪府・吹田市)、2014 年 11 月 28 日

清水亮、高島祐介、原口雅宣、直井美貴、サブ波長周期構造を有する窒化物系 LED の発光特性、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014、6pP11 頁、筑波大学(東京都・文京区)、2014 年 11 月 6 日

高島祐介、清水亮、原口雅宣、直井美貴、サブ波長金属回折格子の紫外域偏光特性の理論的検討、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、Vol.75、19p-C1-10 頁、北海道大学(北海道・札幌市)、2014 年 9 月 19 日

高島祐介、清水亮、原口雅宣、直井美貴、多層サブ波長回折格子を有する LED の偏光特性、2014 年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会、Ea-6 頁、島根大学(島根県・松江市)、2014 年 7 月 26 日

高島祐介、南原康亮、清水亮、原口雅宣、直井美貴、Cr-サブ波長回折格子を用いた紫外域偏光制御の理論的検討、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、

19a-F10-9 頁、青山学院大学(神奈川県・相模原市)、2014 年 3 月 19 日

清水亮、高島祐介、直井美貴、サブ波長回折格子形状の LED 偏光特性に対する影響、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、17a-E13-2 頁、青山学院大学(神奈川県・相模原市)、2014 年 3 月 17 日

Ryo Shimizu, Yuusuke Takashima, Yoshiki Naoi, Polarized Light Emission from Blue-LED with SiO₂ Subwavelength Grating, 6th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, 06aP40, Nagoya Univ.(Aichi, Nagoya), 2014.3.6

Yuusuke Takashima, Ryo Shimizu, Masanobu Haraguchi, Yoshiki Naoi, Optical characteristics of UV-LED with subwavelength grating, The 18th Microoptics Conference, p.H62, Tokyo Inst. Tech(Tokyo, Meguro), 2013.9.29

高島祐介、清水亮、原口雅宣、直井美貴、低屈折率膜を有するサブ波長回折格子を実装した UV-LED の偏光特性、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、19p-B5-16 頁、同志社大学(京都府・京田辺市)、2013 年 9 月 19 日

清水亮、高島祐介、直井美貴、低屈折率差サブ波長回折格子を有する LED からの発光特性、応用物理学会中国四国支部 2013 年度支部学術講演会、Ap-11 頁、香川大学(香川県・高松市)、2013 年 7 月 27 日

高島祐介、清水亮、直井美貴、UV-LED 上サブ波長回折格子の偏光特性評価、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、28p-PA1-33 頁、神奈川工科大学(神奈川県・厚木市)、2013 年 3 月 28 日

Yuusuke Takashima, Ryo Shimizu, Yoshiki Naoi, Fabrication of subwavelength grating with high aspect ratio on GaN LED, 5th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, p.P3083B, Nagoya Univ.(Aichi, Nagoya), 2013.1.31

Yuusuke Takashima, Masanobu Haraguchi, Yoshiki Naoi, Theoretical analysis for linearly polarized emission in UV-LED with subwavelength grating structure, International Workshop on Nitride Semiconductor 2012, p.MoP-OD-41, Sapporo Convention Center(Hokkaido, Sapporo), 2012.10.15

清水亮、高島祐介、直井美貴、SiO₂ サブ波長回折格子の LED 応用に関する検討、平成 24 年度電気関係学会四国支部連合大会、11-5 頁、四国電力(香川県・高松

市)、2012年9月29日
高島祐介、原口雅宣、直井美貴、サブ波
長回折格子による直線偏光 UV-LED の理
論的解析、第73回応用物理学会学術講
演会、12a-PB4-27、愛媛大学(愛媛県・
松山市)、2012年9月11日
高島祐介、原口雅宣、直井美貴、サブ波
長回折格子を用いた AlGaN 系 LED の偏光
選択特性、応用物理学会中国四国支部
2012年度支部学術講演会、Ap-3、山口大
学(山口県・宇部市)、2012年7月28
日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

直井 美貴 (NAOI, Yoshiki)
徳島大学・大学院ソサテツサイエンス研究部・
教授
研究者番号：90253228

(2) 研究分担者

原口 雅宣 (HARAGUCHI, Masanobu)
徳島大学・大学院ソサテツサイエンス研究部・
教授
研究者番号：20198906