

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04238

研究課題名（和文）サブ波長ナノ構造を用いた多機能LEDの開発

研究課題名（英文）Development of high performance LED with subwavelength nano structure

研究代表者

直井 美貴（NAOI, Yoshiki）

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・教授

研究者番号：90253228

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、高屈折率差サブ波長構造を有する、可視～紫外域メタ表面型GaN系光デバイスを開発することである。

本目的を達成するため、サブ波長周期構造内の光状態の形成条件と光伝搬特性に関する電磁波解析を行い、集光特性などの理論的予測を行った。実際に波長280nmの紫外LED表面に高屈折率材料TiO<sub>2</sub>を配列し、輻射光を幅2mmにコリメートし、その光出力を1.79倍増強するメタレンズ一体型高効率深紫外LEDを実証した。また、LEDの高機能化・LED表面への実装を念頭に、サブ波長構造を用いた415nm帯GaN系高感度屈折率センサーを設計し実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究における研究成果は、発光ダイオードが、単に可視域波長帯での照明分野での応用だけでなく、GaN系LED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、偏光・光配向など光特性のみならず、屈折率検出や光フィルターなど多くの機能を有する集積化光デバイスの実現可能性を示した。これは光集積回路技術の一端を担えるものであり、IoT時代に必要不可欠な技術である。また、深紫外域におけるコリメート特性を有するメタ表面型UV-LEDは、紫外光によるウイルス不活化などへの応用に強く期待され現在の社会情勢に合致したものである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop the high performance GaN-based photonic devices with high contrast subwavelength structure in visible to UV wavelength region. At first, we studied the electromagnetic field theoretical analysis in subwavelength structure, and simulated the focused property of the LED. We fabricated the 280nm UV-LED with the subwavelength high contrast TiO<sub>2</sub> structure, and experimentally demonstrated the collimated LED with the width of 2mm. The light output power was 1.79 times improved compared to that of the LED without the subwavelength structure. And also, in order to add the functions for LED, with the subwavelength structure, we demonstrated the 415nm high sensitivity refractive index sensor.

研究分野：光デバイス

キーワード：LED subwavelength

1. 研究開始当初の背景

青色発光ダイオードの開発以来、GaN 系材料を中心とした固体半導体デバイスは照明分野などへ急速に応用が進んできた。固体デバイスでは、その表面に微細加工が可能であり、従来の電子管デバイスでは実現不可能な、特殊な光学的特性をデバイス自体に内蔵させること(メタ表面型デバイス)が可能である。また、AI を添加することによる発光波長の短波長化(紫外 LED)に対する研究も精力的に行われている。紫外光は、半導体リソグラフィ、殺菌など多くの工業分野で利用される重要な波長領域である。これらの従来装置は、ランプ光源と他の光学部品から構成されるため小型集積化が困難であり、紫外線自身による樹脂劣化や熱による光学素子劣化などにより低寿命を伴う。一方、紫外 LED は小型化が可能であり、LED 自体にレンズ機能などを付加できれば、上記の問題の多くは解決可能となる。

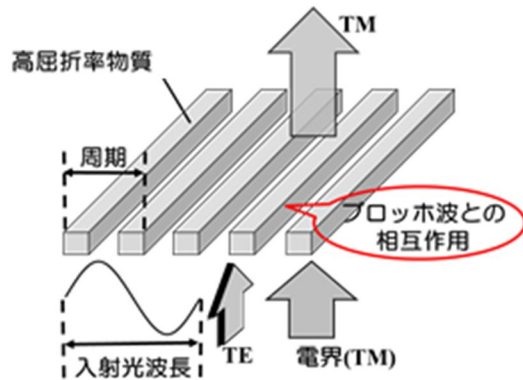


図1 サブ波長構造

このような微細加工による光特性制御方法の一つに、図1のように、対象とする光波長よりも小さな周期構造であるサブ波長周期回折格子(SWG)がある。サブ波長周期構造中では、一般的な回折現象は発生しないが、その構造寸法と周期的屈折率分布で決定されるブロッホ固有モードと光の相互作用により特異な性質を持たすことが可能である。この構造は、フォトニック結晶のような複雑な堆積構造を必要とせず単一層で広帯域かつ高反射・高偏光選択特性などが得られる事であり、赤外領域の面発光レーザー共振鏡への応用が報告されている。しかし、赤外域以外の波長領域や理論的に予想されるその他のユニークな性質やその効果を利用したデバイスの実験的検証は数少ない。サブ波長周期構造内の固有モードは、屈折率コントラスト、格子周期・高さ・充填率により、そのモードの数、モード間の位相関係、および、その振幅分配比などが決定される。SWG を通過する光の性質は固有モードとの相互作用により決定されるが、最低次の1次モードのみを考慮したもの、あるいは、固有モードが平面波と見なせるような SWG 周期が光波長よりも十分小さく、複屈折特性を有する均質膜として近似する方法(例:ワイヤグリッド偏光フィルム)が一般的であり、SWG 構造の有する利点を十分生かしていない。複数のモード間の相互作用を利用することにより、さらに高い反射特性や高透過特性、あるいは低光損失特性を有する光制御デバイスの開発が可能である。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究では、GaN 系 LED 素子に SWG 構造を適用し、可視から紫外域において偏光特性以外の光特性制御構造も組み込んだメタ表面型 GaN 系 LED を開発することが目的である。

本研究は、GaN 系 LED と光学分野におけるナノグレーティング技術の融合を目指したものである。SWG 中の固有モードをデバイスとして利用する考え方は、原理的に波長による制限がなく、波長選択の制限がない。LED の短波長化への対応できる。また、SWG デバイスは三次元構造を使用せず二次元単層構造により面内に形成される固有モードを利用したもので、デバイス作製、集積など実用化に対しても有用であり、この層構造は、二次元フォトニック結晶など他の周期構造と親和性もよく、光集積回路技術の一端を担えるポテンシャルを有するものと考えられる。

3. 研究の方法

SWG が完全に空気で囲まれた理想格子の場合、SWG を通過する光の伝搬特性は比較的容易であるが、本研究において SWG は、大きな屈折率を有する LED 表面に作製するので、SWG の固有モード状態も大きく影響を受ける。また、紫外領域においては、SWG の屈折率の虚部が無視できない。これらの固有モード形成条件への影響および光の伝搬特性を、ブロッホ近似を用いた固有モードの波数分散関係による理論的検討および有限差分時間領域(FDTD)法による電磁界分布計算により明らかにし、理論的な基礎を構築する。この理論的基礎検討をもとに、レンズ特性や光配向が制御された機能を有するメタ表面型 GaN 系 LED の構造設計を行う。さらに、LED に多くの付加機能(屈折率検出など)を有する LED の検討も行う。構造設計をもとに、実際のデバイスを作製し評価する。素子構造の作製は、電子線リソグラフィ装置、真空蒸着装置、スパッタリング装置、誘導結合エッチング装置を用いて行う。

#### 4. 研究成果

(1) 図2 に本研究で提案したメタ構造一体型コリメートLEDを示す。深紫外 DUV-LED 表面に高屈折率物質である  $\text{TiO}_2$  (波長 280 nm: 屈折率  $3.0747+1.3339i$ ) がサブ波長間隔で配列している。本構造周期は波長に比べて短いため、通常の回折現象は発生せず、入射した光は、メタ構造の周期的な境界条件で決まる固有モードと結合し、空気側へ透過する。本固有モードの存在条件は、メタ構造における電磁界の境界条件によって決定されるため、モード位相や光減衰を構造寸法により、自在に操ることができる。これを利用し、構造の中心部と端部の位相を調整すれば、透過光を高効率にコリメートすることができる。波長 280 nm の DUV 光に対しコリメートするように  $\text{TiO}_2$  メタ構造寸法を設計した。設計した構造は中心部 ( $x=0$ ) に幅  $1 \mu\text{m}$  の開口があり、その左右に周期  $200 \text{ nm}$ 、格子幅  $100 \text{ nm}$  格子高さ  $100 \text{ nm}$  の  $\text{TiO}_2$  メタ構造が配列している。本構造の格子幅は、構造端に向かうにつれ、5 周期ごとに  $20 \text{ nm}$  ずつ短くなっており、最端部での格子幅は  $40 \text{ nm}$  である。本構造に波長  $280 \text{ nm}$  の光を入射した際の電場分布を 図3 に示す。メタ構造を透過した光は広がらず、中心部分に集中している。コリメート光幅は、約  $2 \mu\text{m}$  程度であり、わずか波長以下の極めて薄い構造により、コリメート DUV 光が実現していることが分かる。さらに、コリメート中心部 ( $x = 0, z = 2 \mu\text{m}$ ) では、入射光の  $1.21$  倍程度の光強度が得られており、 $\text{TiO}_2$  のような光吸収のある物質を利用した場合でも、高効率な DUV コリメート光を実現できることが分かった。実際に素子を作製し評価した。図4 に LED 表面から  $14 \text{ mm}$  離れた位置における光強度の横方向分布を示す。コリメート幅  $2 \text{ mm}$  であり、また、その光強度はメタ構造なしの場合に比較し  $1.79$  倍であった。このように、材料の光吸収が大きい DUV 域において有効な手段であることを実験的に実証した。本構造は、LED 表面に直接作製することが可能であるため、素子集積、小型化においても非常に有効であり、超小型医療用デバイスへの展開などに期待される。

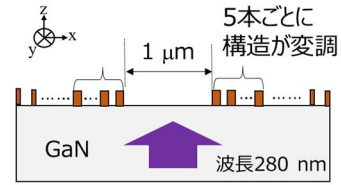


図2 試作デバイス構造

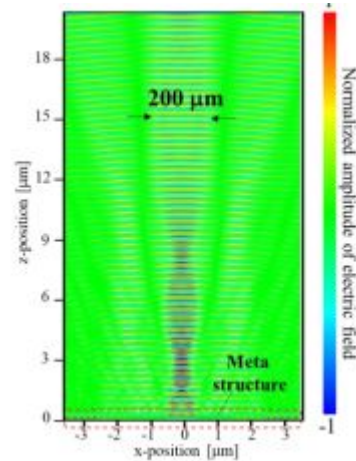


図3 LED 輻射光の電場分布シミュレーション

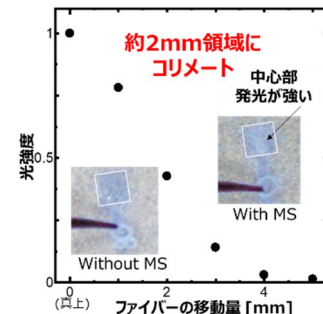


図4 LED から  $14 \text{ mm}$  離れた位置での光強度

(2) 図5 に提案した屈折率センサー構造を示す。光学式屈折率センサーはバイオイメージング等の応用に向け、小型かつ水分を含んだ環境での動作が求められる。高屈折率(屈折率  $n > 2$ ) SWG を用いて、水での光吸収が少ない青色波長光 ( $415 \text{ nm}$ ) で動作する、プリズム不要の垂直入射型、非常に安定で測定環境を選ばない、といった特徴を有する高感度屈折率センサーを検討した。GaN 系 LED 表面に周期  $200 \text{ nm}$ 、空隙部  $180 \text{ nm}$ 、高さ  $150 \text{ nm}$  の GaN-SWG (GaN 屈折率 =  $2.5$ : 波長  $400 \text{ nm}$ ) をドライエッチングにより作製した。SWG 中では、その周期的屈折率変調によって固有の光状態(固有モード)が存在する。特に GaN のような高屈折率 SWG 場合では、垂直入射において最低次と高次モードを同時に励起でき、SWG 上下端におけるモード同士の干渉が生じる。励起されたモードの位相や振幅は SWG の周囲屈折率  $n_s$  に依存する。したがって、ごくわずかな  $n_s$  の変化に対してもモード間の干渉状態は敏感に反応し、高感度に  $n_s$  を検出することができる。水中に配置した本構造に p 偏光を垂直に入射し、エタノールを加え  $n_s$  を変化させた際の反射スペクトルを測定した。波長  $415 \text{ nm}$  付近に固有モード同士の干渉から生じた反射ピークが現れた。波長  $415 \text{ nm}$  における反射光強度の  $n_s$  依存性を 図6 に示す。 $n_s = 1.333$  から  $1.346$  に増加した際、反射ピーク強度は約  $20.6 \%$  減少した。このとき、単位屈折率(RIU: Refractive Index Unit)当たりの反射強度変化は  $1580 \%$ /RIU に

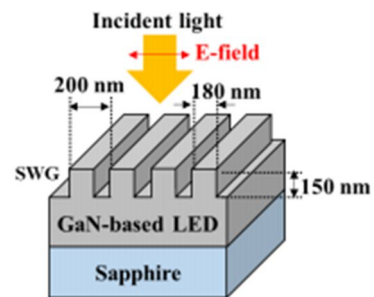


図5 LED 上に SWG を有する屈折率センサー

達しており、これまでに報告されている屈折率センサーに匹敵する感度を垂直入射の簡単な測定系によって実現できたことを示している。また、本構造は LED 表面に実装しており将来的に LED を光源とした光源一体型の集積デバイスの展開も期待できる。

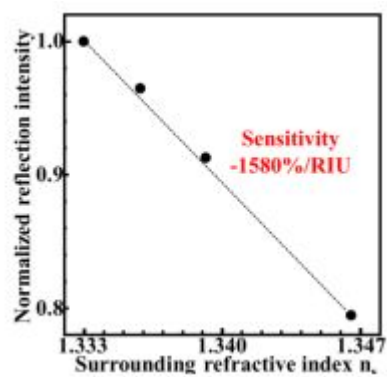


図6 波長415nmにおける反射光強度の周囲屈折率  $n_s$  依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuusuke Takashima, Keita Kusaba, Masanobu Haraguchi and Yoshiki Naoi	4. 巻 19
2. 論文標題 Highly Sensitive Refractive Index Sensor Using Dual Resonance in Subwavelength Grating/Waveguide With Normally Incident Optical Geometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 6147-6153
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSEN.2019.2910585	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuusuke Takashima, Masanobu Haraguchi and Yoshiki Naoi	4. 巻 26
2. 論文標題 Dual-wavelengths filter operating at visible wavelength region using subwavelength grating on waveguide structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 466-471
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10043-019-00541-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuusuke Takashima, Masanobu Haraguchi and Yoshiki Naoi	4. 巻 20
2. 論文標題 GaN-Based High-Contrast Grating for Refractive Index Sensor Operating BlueViolet Wavelength Region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 4444 (1-12)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20164444	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 3件/うち国際学会 11件）

1. 発表者名 高島 祐介, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 導波層電子蓄積効果を利用した共鳴型カラーフィルター
3. 学会等名 2019年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高島 祐介, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 微細ナノ構造を用いた可視～紫外フォトニックデバイス
3. 学会等名 第69回CVD研究会「第30回夏季セミナー」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大下 悠, 高島 祐介, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 変調サブ波長周期電極を用いた集光機能を有する発光ダイオードの理論的検討
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高島 祐介, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 GaNサブ波長格子を用いた400nm波長帯で動作する高感度屈折率センサー
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉 峻平, 高島 祐介, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 非線形光学効果によるナノ周期構造透過光制御
3. 学会等名 2018年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高島 祐介, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 サブ波長回折格子/導波路複合構造による二波長フィルター
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuusuke Takashima, Masanobu Haraguchi and Yoshiki Naoi
2. 発表標題 Refractive Index Sensor Using Subwavelength Grating on Waveguide with Normal Incident Configuration
3. 学会等名 The 23rd Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuusuke Takashima, Masanobu Haraguchi and Yoshiki Naoi
2. 発表標題 Dual-wavelengths Filter Operating at Visible Wavelength Region using Subwavelength Grating on Waveguide Structure
3. 学会等名 11th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高島 祐介, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 サブ波長周期電極構造を用いた発光ダイオードの配光特性制御の理論的検討
3. 学会等名 LED総合フォーラム2019in徳島
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高島 祐介, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 低アスペクト比Geサブ波長格子中を用いた可視域偏光フィルター
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高島 祐介, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 高屈折率差周期ブリッジ構造による可視光フィルター
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高島 祐介, 永松謙太郎, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 構造高さを変調したTiO <sub>2</sub> メタ表面による集光紫外発光ダイオードの提案
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会Optics & Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高島 祐介, 永松謙太郎, 原口 雅宣, 直井 美貴
2. 発表標題 TiO <sub>2</sub> メタ周期構造を表面に有するAlGa <sub>N</sub> 系深紫外発光ダイオードのコリメート特性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年



1 . 発表者名 Yuusuke Takashima, Masanobu Haraguchi and Yoshiki Naoi
2 . 発表標題 Significant enhancement of magneto-optical effect at ultraviolet wavelength using Nisubwavelength grating on SiO <sub>2</sub> /Ni structure
3 . 学会等名 30th International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory (ISOM'20) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Yuusuke Takashima, Kentaro Nagamatsu, Masanobu Haraguchi and Yoshiki Naoi
2 . 発表標題 High refractive index contrast meta-structures for GaN-based and sensing applications operating at deep ultraviolet to visible wavelength
3 . 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Yuusuke Takashima, Sasada Atsuki, Kentaro Nagamatsu, Masanobu Haraguchi and Yoshiki Naoi
2 . 発表標題 Design of AlN-subwavelength grating for deep ultraviolet wavelength reflector operating at 244 nm of wavelength
3 . 学会等名 The 8th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Yuusuke Takashima, Masanobu Haraguchi and Yoshiki Naoi
2 . 発表標題 Theoretical investigation of tunable wavelength filter with TiO <sub>2</sub> -based bi-layer subwavelength grating
3 . 学会等名 12th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuusuke Takashima, Masanobu Haraguchi and Yoshiki Naoi
2. 発表標題 High refractive index contrast meta-surfaces for sensing and emitting devices
3. 学会等名 The 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関