

青色 GaN 系フォトリック結晶レーザーの高出力・高ビーム品質動作に成功 一次世代の高品位レーザー加工、高輝度照明、水中 LiDAR 等の実現に向けてー

概要

国立大学法人京都大学大学院工学研究科の野田進 教授、メーナカ デ ゾイサ講師、石崎賢司特定准教授、スタンレー電気株式会社（本社：東京都目黒区 代表取締役社長 貝住泰昭）の江本溪、小泉朋朗らのグループは、青色で動作する窒化ガリウム（GaN）^{注1}系フォトリック結晶レーザー^{注2}の高出力・高ビーム品質^{注3}レーザー発振に成功しました。この結果は、自動車・航空機等の電動化・軽量化に必要な銅や炭素繊維強化プラスチック（CFRP）のレーザー加工、金属 3D プリンター、車載用光源等の高輝度照明、水中（海中）LiDAR 等、幅広い応用に向けた極めて重要な成果であると言えます。

青紫から緑色の光を発光することのできる GaN 系材料を用いた半導体レーザーは、光ピックアップ用光源やプロジェクター用光源等として広く普及しています。しかしながら、従来の端面発光型レーザーは、高出力化のために光出射面積を広げると、横モードが多モード化してビーム品質が劣化するという問題がありました。また、ビーム形状は楕円でレンズ等の複雑な光学系を用いる必要があり、応用の幅を制限していました。研究グループは、前述の問題を解決するべく、高出力動作と高ビーム品質動作の両立が可能なフォトリック結晶レーザーの開発を進めており、これまでに、ガリウム砒素（GaAs）系材料を用いて赤外線で作動する 10W～数 10W 級の高出力・高ビーム品質動作を実証してきました。しかし、これまで GaN 系材料を用いた青紫から青色で作動するフォトリック結晶レーザーは、閾値が極めて高く、光出力もミリ W 以下と十分な特性が得られていませんでした。今回、研究グループは、GaN 系フォトリック結晶を高い均一性で形成可能な製造方法を確立し、さらに、GaN 系フォトリック結晶レーザーに適したフォトリック結晶構造・デバイス構造を設計することで、青色・高出力（ワット級）・高ビーム品質で作動するレーザーの開発に成功しました。

本成果は、2022 年 10 月 7 日に、英科学誌 Communications Materials（Nature 系オンライン雑誌）に掲載されました。

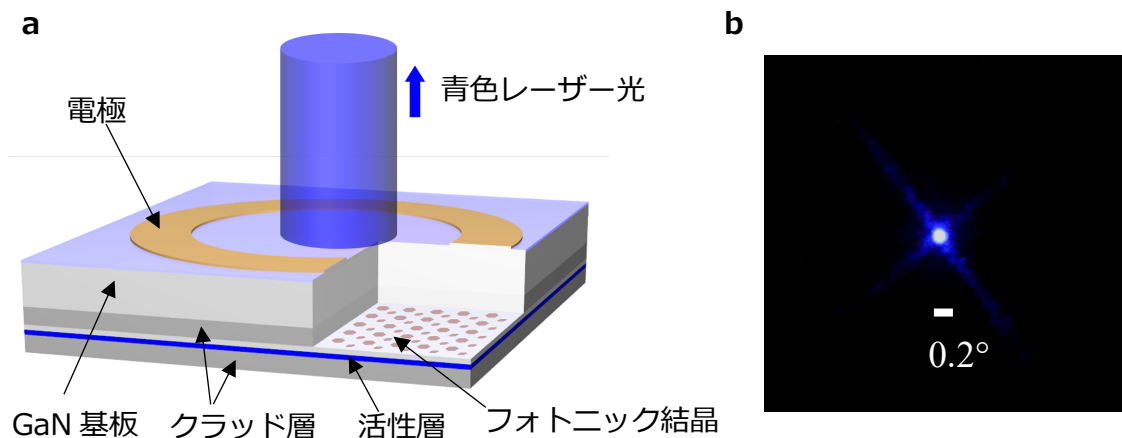


図 1 a 開発した GaN 系フォトリック結晶レーザーの模式図。b 出射されたレーザー光の遠視野像。ワット級の出力で、拡がり角 $\sim 0.2^\circ$ の極めて狭い青色レーザー光が確認されました。

1. 背景

青紫から緑色の光を発光することのできる窒化ガリウム（GaN）^{注1)}系材料を用いた半導体レーザーは、目覚ましい発展をとげ、光ピックアップ用光源やプロジェクター用光源等として広く普及しています。しかしながら、従来の半導体レーザーは、光出力を増大させるために光出射面積を拡大すると、発振モードが多モード化して、出射されるビーム品質が劣化するという本質的な課題を抱えています。また、出射されたレーザー光は楕円状に大きく広がり、形状を整えるためには複雑な光学系を必要とします。これらの課題により、応用先は制限されてきました。例えば、近年、脱炭素社会の実現に向けて、自動車をはじめとした輸送機器の電動化が進められおり、それに伴い、特に銅のレーザー加工の需要が高まっています。銅のレーザー加工には、光の吸収率の高い青色の波長帯域のレーザーが求められていますが、従来の半導体レーザーでは前述のビーム品質の問題で輝度が上げられず、満足な加工には至っていません。

そこで、本研究グループでは、フォトリソニック結晶レーザー^{注2)}の開発を進めています。本レーザーは、光を増幅する活性層の近傍にフォトリソニック結晶を設けており、フォトリソニック結晶層の内部を伝搬する光波の相互結合を制御・活用することにより、原理的に、大面積・単一モード動作（高出力・高ビーム品質動作）が可能という特長を有しています。これまでに、赤外線で作動作するガリウム砒素（GaAs）系フォトリソニック結晶レーザーにおいては、10W～数 10W 級の高出力・高ビーム品質動作を実証してきました^{注4,5)}。しかしながら、青色で作動作する GaN 系フォトリソニック結晶レーザーに関しましては、これまでに当研究グループにより基礎的なレーザー動作の実証に成功していたものの、閾値電流密度が非常に高く、また、出力もミリワット以下にとどまっております、十分な特性が得られていませんでした^{注6)}。

2. 研究手法・成果

このような背景のもと、本研究では、GaN 系フォトリソニック結晶レーザーのワット級高出力・高ビーム品質化の実現に成功しました。研究のポイントは3つあり、以下に簡単に説明します。

① 適切なデバイス層構造の設計による光の漏れ（面内損失）の低減

まず、過去のデバイスの閾値電流密度が高い原因について、課題の抽出を行いました。過去のデバイス層構造を独自の理論計算により解析することで、デバイス面内方向の光の漏れ（面内損失）が非常に大きな値であったことがわかりました。これに対し、適切な層構造や共振器サイズを選択することで、面内損失を十分に低減する構造を見出しました。

② GaN 系フォトリソニック結晶形成法の確立

フォトリソニック結晶の形成方法についても見直しを図りました。従来はフォトリソニック結晶を形成する際、SiO₂ 層を下敷きに利用した形成方法が用いられていました。この手法では、空孔が不均一になりやすく、その結果、光の共振を乱し、レーザー特性を悪化させる要因となっていました。そこで、有機金属気相成長法（MOVPE 法）の成長条件を制御することで GaN の結晶成長を制御し、SiO₂ を用いずに空孔を形成する手法を開発しました。本手法を用いることによって、極めて均一で高品質なフォトリソニック結晶を形成することが可能となりました。

③ 正方格子・2重格子フォトリソニック結晶構造の採用

これまで GaN 系フォトリソニック結晶レーザーにおいては、フォトリソニック結晶の不均一性の問題で、レーザー

発振させやすい三角格子構造が採用されてきましたが、三角格子では出力が得られにくいという問題がありました。本研究では②の形成方法により高品質なフォトニック結晶の形成が可能となったため、高出力化が期待できる正方格子構造を採用しました。さらには、GaAs 系フォトニック結晶レーザーで開発された、2 重格子フォトニック結晶の概念を、GaN 系フォトニック結晶レーザーでも取り入れました。また、電極構造も見直しました。従来はレーザー光が電極で遮られておりましたが、出射方向を変え、電極に光取り出し口を設置することで、光取り出し効率を向上させました。

以上の3つのポイントを踏まえて、デバイスを作製しました。図 2a は作製した GaN 系フォトニック結晶レーザーの模式図、図 2b は形成した正方格子・2 重格子フォトニック結晶の電子顕微鏡写真を示します。開発したフォトニック結晶形成法を用いることで、GaN 特有の結晶面で囲まれた、極めて均一な空孔が形成されています。図 2c に光出力特性、図 2d に出射された遠視野像（ビーム像）を示します。同図に示すように青色の波長でワット級出力、ビーム拡がり角 $\sim 0.2^\circ$ と極めて狭いビームの出射に成功しました。

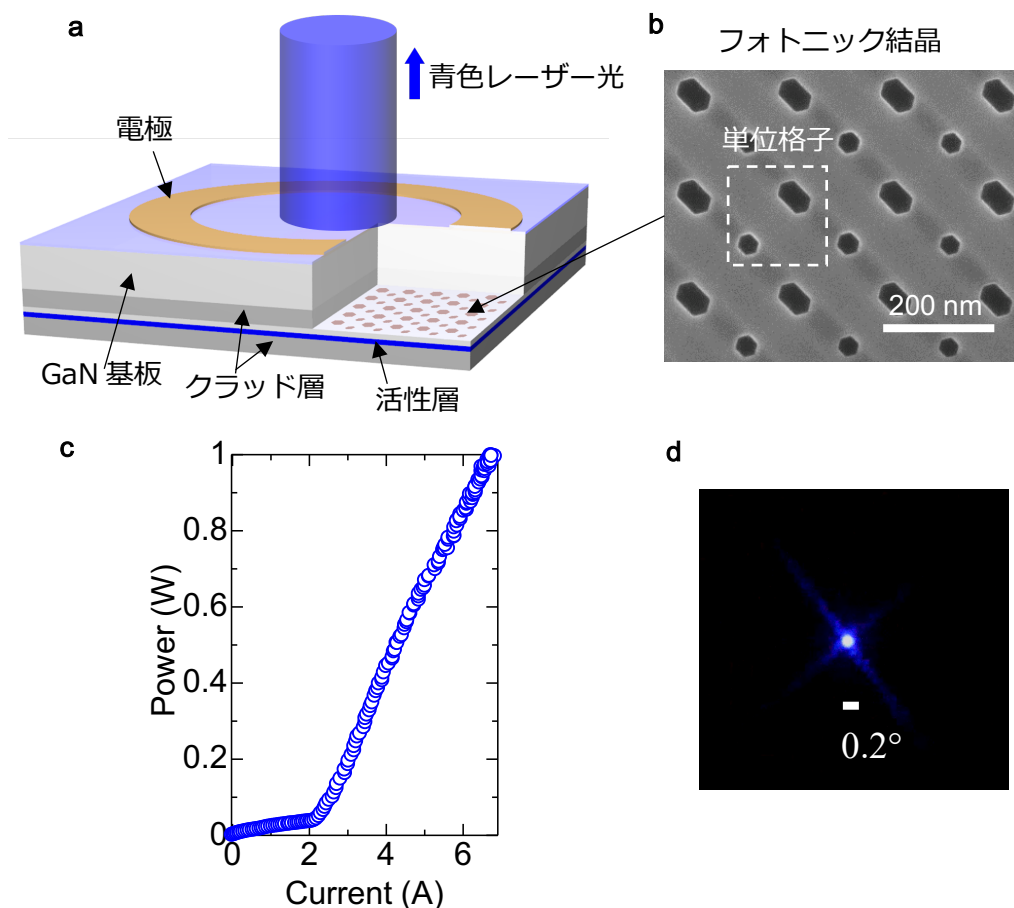


図 2.a GaN 系フォトニック結晶レーザーの模式図。**b** 作製した 2 重格子・正方格子フォトニック結晶の電子顕微鏡写真の一例。**c** 電流-光出力特性。ワット級の動作を実現しました。**d** 出射されたビームの遠視野像。単峰形状で、 $\sim 0.2^\circ$ の極めて狭いビーム拡がり角のレーザー光が得られました。

3. 波及効果、今後の予定

今回、GaN 系フォトニック結晶レーザーを深化させることで、青色で動作し、ワット級の高出力・高ビーム品質のビーム出射に成功しました。本研究成果は、様々な分野への波及効果が期待されます。例えば、脱炭素

社会に向け、各自動車メーカーでは電気自動車化が進めてられています。特に電気自動車で重要な部材となる銅の加工の需要は今後増加することが見込まれており、短波長（青～緑色）で高出力・高ビーム品質なレーザー光源が求められています。その他にも、青色で動作する高出力・高ビーム品質レーザーは、CFRP のレーザー加工、金属 3D プリンター、車載用光源等の高輝度照明、水中（海中）LiDAR 等、様々な分野への応用が期待されます。また、出射されるビームは単峰形状で極めて狭い拡がり角であることから、光学系を省略することが可能となり、応用製品を小型化できることが期待できます。このような観点から、本研究成果は学術的のみならず工業的にも大変意義は大きいと考えられます。

今後は、さらなる高出力化や高効率化を進め、実用化を目指し、引き続き研究開発を推進していきます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、以下のプロジェクトのもとに推進されました。

・国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO） 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発：研究開発課題「フォトリソ結晶レーザーの短パルス化・短波長化」（研究責任者 野田 進）（2016 年度から 2020 年度）

・内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP） 光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術（管理人：量子科学技術研究開発機構）：研究課題「フォトリソ結晶レーザーに係る研究開発」（研究責任者 野田 進）（2018 年度から推進中。本プロジェクトは、フォトリソ結晶レーザーの高輝度化とスマート化、およびその社会実装を目的とするもの。）

・JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「次世代フォトリソ」：研究開発課題「変調フォトリソ結晶レーザーによる 2 次元ビーム走査技術の開発（JP MJCR17N3）」（研究代表者 野田 進）（2017 年度から推進中。新規フォトリソ結晶レーザー開発とその LiDAR 応用を推進することを目的とするもの。）

<用語解説>

注 1) 窒化ガリウム（GaN）：ガリウムと窒素から成る化合物半導体。青色発光ダイオードや青色レーザー等の発光デバイスや電子デバイスの材料として実用化されています。

注 2) フォトリソ結晶レーザー：2 次元フォトリソ結晶（2 次元状に周期的に波長程度の周期的屈折率分布をもつ光ナノ構造）を内蔵した面発光型の半導体レーザーです。大面積で安定した定在波状態が形成出来、高出力、高品質なビームが得られるという特徴があります。

注 3) ビーム品質：レーザービームの集束性、発散性の指標。ビーム品質の定量的な指標の 1 つとして、理想的なビーム（＝ガウスビーム）に近いかどうかという観点で、 M^2 （エムスクエア）が用いられます。 M^2 が 1 に近いほど、ガウスビームに近く、理想的なビーム品質と言えます。

注 4) プレス発表：新たなフォトリソ結晶構造を用いて半導体レーザーの高輝度化に成功 ― 来たるべき超スマート社会におけるスマート製造やスマートモビリティに貢献 ―

[https://www.kyoto-](https://www.kyoto-u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2018documents181218_101.pdf)

[u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2018documents181218_101.pdf](https://www.kyoto-u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2018documents181218_101.pdf)

注 5) プレス発表：フォトリソ結晶レーザーを搭載した LiDAR の開発に世界で初めて成功 ― 来たるべき超スマート社会におけるスマートモビリティの発展に貢献 ―

[https://www.kyoto-](https://www.kyoto-u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2020documents200716_101.pdf)

[u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2020documents200716_101.pdf](https://www.kyoto-u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2020documents200716_101.pdf)

注 6) プレス発表：青紫色 GaN フォトニック結晶面発光レーザーの電流注入発振に成功

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20071221/index.html>

<研究者のコメント>

これまで、GaAs 系フォトニック結晶レーザーの高出力化・高ビーム品質化には成功してきましたが、GaN 系フォトニック結晶レーザーは 2008 年のレーザー発振の確認以降、その材料的な研究の難易度から大きな発展に至っておりませんでした。今回、ついに GaN 系フォトニック結晶レーザーもブレイクスルーし、青色においても高出力・高ビーム品質化を実現できたことを大変喜ばしく思います。今後は、さらに出力や効率を向上させ、レーザー加工、高輝度照明を始めとして、多岐に亘る応用に展開していきたいと考えております。さらには、青色のみならず、緑色、紫外線にも波長を拡張していきたいと考えております。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Wide-bandgap GaN-based watt-class photonic-crystal lasers （和訳：ワット級ワイドバンドギャップ GaN 系フォトニック結晶レーザー）

著 者：Kei Emoto, Tomoaki Koizumi, Masaki Hirose, Masahiro Jutori, Takuya Inoue, Kenji Ishizaki, Menaka De Zoysa, Hiroyuki Togawa and Susumu Noda*

*: corresponding author

掲 載 誌：Communications Materials DOI：10.1038/s43246-022-00288-6

<報道・取材に関するお問い合わせ先>

京都大学 総務部広報課国際広報室

TEL：075-753-5729 FAX：075-753-2094

E-mail：comms@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp