

100W~1kW 級単一モードフォトリック結晶レーザーの設計指針の確立

—超スマート社会を支える究極の半導体レーザー光源の実現に向けて—

概要

京都大学大学院工学研究科の野田進 教授、井上卓也 同助教、吉田昌宏 同助教、John Gellera 同特定研究員らのグループは、超大面積（3~10mmΦ）で単一モード動作^{注1)}可能なフォトリック結晶レーザー^{注2)}を実現するための設計指針を確立しました。これにより、高ビーム品質動作を維持しながら 100W~1kW 級の光出力を得ることが出来る究極の半導体レーザー光源が実現可能になり、レーザー加工装置や光センシングシステム的大幅な小型化・低コスト化をはじめとして、超スマート社会の実現に大いに貢献することが期待されます。

来るべき超スマート社会（Society 5.0）においては、自動運転等のスマートモビリティにおいて必須である高度光センシングや、AI を活用したスマート製造を支える光加工を実現するため、高出力かつ高ビーム品質な半導体レーザーが必要とされています。しかしながら、従来の半導体レーザーは、高出力化のため、光出射面積を増大すると、発振モードが多モード化^{注1)}してビーム品質が劣化するという問題がありました。研究グループは、上記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、直径 500μm~1mmΦ のデバイスにおける 10W~数 10W 級の高出力・高ビーム品質動作^{注3,4)}を実証するとともに、1mmΦ 程度以上での単一モード動作の実現可能性を理論的に示してきました。しかし、レーザーをさらに大面積化（3~10mmΦ）した際にも高ビーム品質動作が維持出来るかどうかについては、これまで統一的な理論解析がなされておらず、レーザー加工等の応用で要求される 100W~1kW 級の光出力を実現可能な具体的なデバイス設計も明らかではありませんでした。

今回、研究グループは、フォトリック結晶において、面内を伝搬する光波が損失を伴わずに相互結合する強さ（エルミート結合係数）に加えて、上下への放射を伴いつつ相互結合する強さ（非エルミート結合）にも着目して理論解析を行うことにより、超大面積（3~10mmΦ）デバイスにおいて単一モード動作を実現するための普遍的な条件を見出しました。さらに、上記の条件を満たす具体的なフォトリック結晶レーザー構造の設計にも成功しました。今後、設計した超大面積デバイスを作製することにより、単一チップで 100W~1kW 級の光出力が実現可能になると考えられ、超スマート社会を支える次世代光源としての利用が期待されます。

本成果は、2022 年 7 月 4 日に、英国科学誌 Nature Communications のオンライン版にて掲載されました。

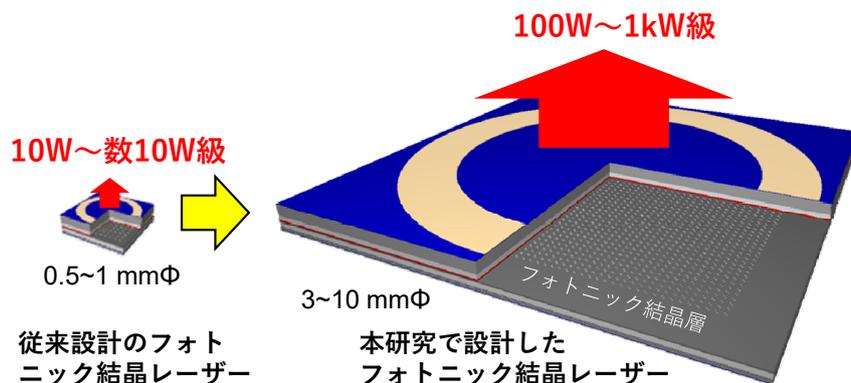


図: 100W~1kW 級単一モードフォトリック結晶レーザーの概念図。

1. 背景

来るべき超スマート社会（Society 5.0）においては、自動運転等のスマートモビリティにおいて必須である高度光センシングや、AIを活用したスマート製造を支える光加工を実現するため、高出力かつ高ビーム品質な半導体レーザーが必要とされています。しかしながら、従来の半導体レーザーは、光出力増大のために光射出面積を拡大すると、発振モードが多モード化^{注1)}して、出射されるビーム品質が劣化し、集光が困難になるという本質的な課題を抱えています。従って、現在、特に、レーザー加工や金属3次元プリンタ等の大きな光出力が要求される用途において、気体レーザーや固体・ファイバーレーザー等の大型・高価・低効率なレーザー光源が利用されています。ここで、半導体レーザーにおいて、高ビーム品質を維持しながら100W~1kW級の光出力を得ることが出来れば、従来の大がかりなレーザー装置をワンチップの半導体レーザーで置き換えることが可能になり、加工システムの大幅な小型化・低コスト化が実現します。また、半導体レーザーの高速制御性を活用した、よりオンデマンドなレーザー加工も実現可能になり、スマート製造分野の発展に大きく貢献することが期待されます。

そこで、本研究グループでは、従来の課題を克服する新しい半導体レーザーとして、フォトニック結晶レーザー^{注2)}（図1(a)）の開発を進めてきました。本レーザーは、光を増幅する活性層の近傍にフォトニック結晶を設けており、フォト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・単一モード動作が可能という特長を有しています。最近の研究^{注3,4)}で、図1(a)の右図に模式図を示すように、2つの空孔をxおよびy方向に4分の1波長だけずらして重ねた「2重格子フォトニック結晶」と呼ばれる独自の共振器構造を提案しました。

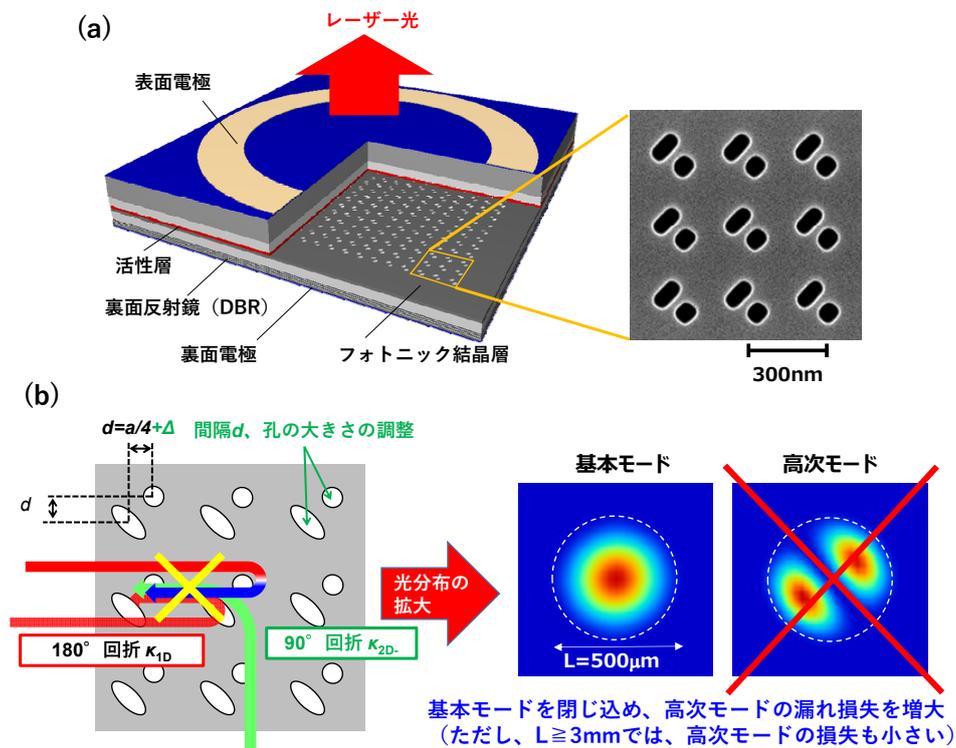


図 1.(a)フォトニック結晶レーザーのデバイス構造の模式図と2重格子フォトニック結晶の電子顕微鏡写真。(b)2重格子フォトニック結晶の原理図。面内の光の回折効果を弱め、光を大面積に拡げることによって、高次モードを選択的に外側へ漏らし、基本モードのみの発振を可能とします。これにより高ビーム品質動作が可能となります。ただし、直径3mm~10mmの超大面積デバイスでは、高次モードの漏れ損失も小さくなるため、新たな設計指針が必要でした。

2重格子構造では、同図(b)に示すように、フォトニック結晶面内の180°方向の回折や、180°方向と90°方向を合わせた光回折が打ち消し合うため、面内の光回折効果が弱まり、光が大面積に拡がり、基本モードを閉じ込めつつ高次モードの漏れ損失のみを増大することが可能となります。この設計に基づき、これまで、0.5mmΦ~1mmΦデバイスにて10W級~数10W級動作を実験的に実証するとともに、直径1mmΦ程度以上の単一モード動作の実現可能性を理論的に示すことにも成功しました^{注3,4)}。さらに、開発したフォトニック結晶レーザーを搭載した光測距システム(LiDAR)の開発にも世界で初めて成功^{注4)}するとともに、短パルス(数10ピコ秒以下)かつ高出力(数10ワット以上)で動作可能なレーザーの開発にも成功しました^{注5)}。ただし、レーザーをさらに大面積化(3~10mmΦ)すると、同図(b)に示した基本モード・高次モードともに、外側への漏れ損失がほぼ0となり、両者の漏れ損失に差がつかなくなるため、単一モード動作が維持出来るかどうかについては、これまで統一的な理論解析がなされていませんでした。また、上記のレーザー加工等の応用で要求される100W~1kW級の光出力を実現する具体的な超大面積デバイスの設計についても、これまで明らかになっていませんでした。

2. 研究手法・成果

上述のような背景のもと、本研究では、超大面積(3~10mmΦ)のフォトニック結晶レーザーにおいて、安定した単一モード動作を実現するための一般的な条件を理論的に解明することに成功しました。前述の通り、超大面積フォトニック結晶においては、図1(b)に示した基本モード・高次モードともに、電極の外側への光の漏れが少なくなり、漏れ損失に差がつかありません。そこで本研究では、図2(a)に示すように、基本モードと高次モードのビーム出射角度の違い(具体的には、基本モードはほぼ垂直に放射し、高次モードは少し斜めの角度に放射する性質)に着目し、垂直方向から角度がずれた時に上下方向への放射損失が急激に大きくなる構造を探索しました。

そのために本研究で用いた、フォトニック結晶レーザーの理論解析モデルの模式図を図2(b)(c)に示します。図2(b)は、フォトニック結晶内での180°と90°方向の面内回折効果[=上下方向への放射損失を伴わないエルミート結合($\kappa_{1D} + \kappa_{2D-}$): κ_{1D} は180°回折、 κ_{2D-} は90°回折による結合係数]を表しており、2重格子フォトニック結晶の重心間距離や空孔の大きさのバランスを変えることで、この面内回折の大きさをデバイス面積に応じて適切に弱めることができます。一方、図2(c)は、面内を伝搬する各波が、放射波と結合してエネルギーの一部を失い、その後、再び180°方向に伝搬する波へと結合する効果[=非エルミート結合($i\mu e^{\pm i\theta pc}$): μ は結合の大きさ、 θ_{pc} は放射波を介して180°方向に結合する際の位相変化]を表しています。このとき、放射波を介した180°方向の結合の大きさ μ は、2重格子フォトニック結晶と裏面反射鏡の間の距離を変えて、上下に放射される波の干渉位相差を変化させることで制御可能です。そして、これら2つの回折効果($\kappa_{1D} + \kappa_{2D-}$ 、 μ)を考慮して、2重格子フォトニック結晶から、垂直方向に近い角度 θ ($\theta \sim 0^\circ$)でビームを出射するモードの放射損失の大きさを、以下のように定式化することに成功しました。

$$\alpha_v \sim \frac{\mu}{\mu^2 + R^2} \left[I^2 + \frac{2\pi^2}{\lambda^2} \sin^2(\theta) \right] \cdots (1)$$

(1)式の R および I は、 $R = \text{Re}\{(\kappa_{1D} + \kappa_{2D-})e^{-i\theta_{pc}}\}$ 、 $I = \text{Im}\{(\kappa_{1D} + \kappa_{2D-})e^{-i\theta_{pc}}\}$ と定義され、面内の180°回折と90°回折の打ち消し合いを表す係数の実部と虚部に対応しています。また、 λ は、レーザーの発振波長を表します。ここで、(1)式において、垂直方向($\theta = 0^\circ$)で適切な放射損失(10 cm^{-1})が得られるように I の値を調整した上で、 R と μ の値を変化させて放射損失を計算した結果を図2(d)に示します。同図より、 R と μ の大きさをともに小さくすることで、出射角度の僅かな変化に対して、急峻に放射損失が増加することがわか

ります。これは、回折効果が弱い (R および μ が小さい) フォトニック結晶においては、出射角度 θ が 0° から少しずれただけで (すなわち、フォトニック結晶の周期と光波の波長が少しずれるだけで)、面内を上下左右に進行する波に対する回折効果が著しく弱くなり、結果として、回折波の振幅が小さくなり、進行波と回折波の上下方向への放射の打ち消し合いのバランスが崩れるためと、定性的に理解できます^{注6)}。図 2(e)は、直径 3mm のフォトニック結晶レーザーに対して、 R と μ を変化させて、図 2(a)の基本モードと高次モードの放射損失の差を計算した結果を示します。図 2(d)に示した急峻な角度依存性に起因して、 R および μ を小さくするほど放射係数の差が大きくなり、超大面積・単一モード動作に適することが明らかとなりました。

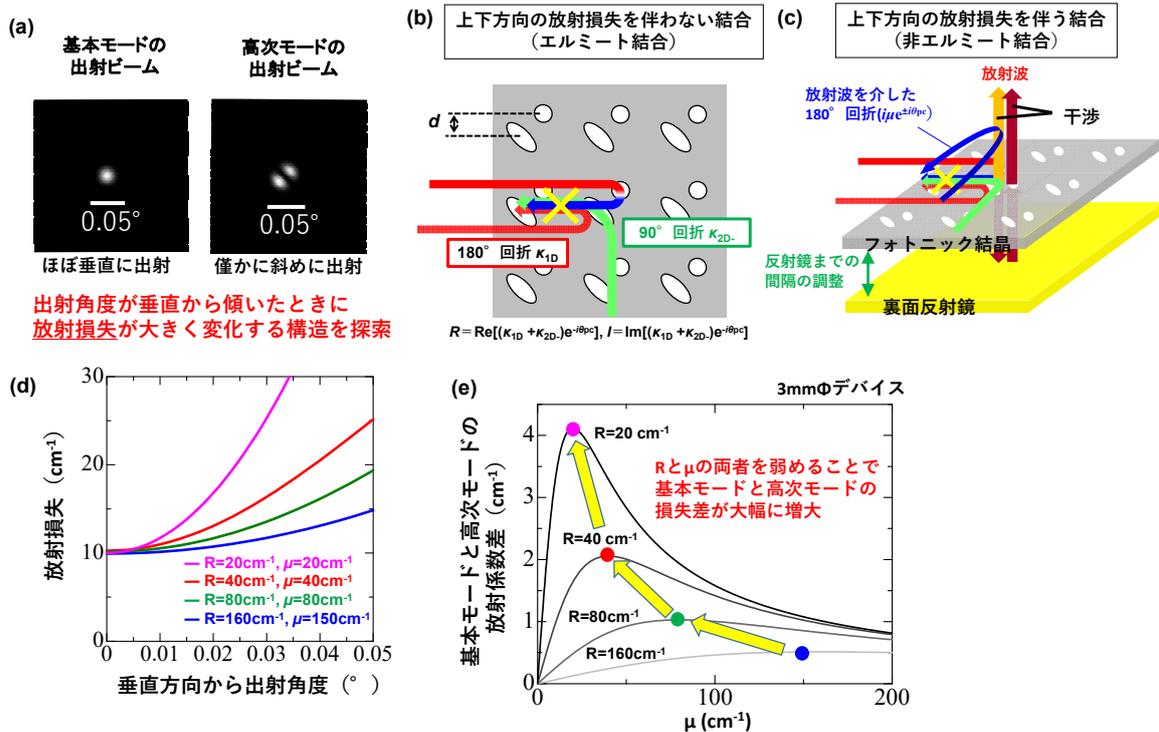


図 2.(a)基本モードと高次モードの出射ビームの模式図。(b)(c)フォトニック結晶における光波の相互結合の模式図。エネルギー損失 (=放射損失) を伴わないエルミート結合 (b) に加えて、放射損失を伴う非エルミート結合 (c) を新たに考慮することで、基本モードと高次モードの放射損失の定式化が可能になりました。(d) R および μ を変化させた構造における、放射損失の角度依存性の計算結果。(e)直径 3mm のデバイスにおける、基本モードと高次モードの放射損失の差の計算結果。 R と μ を共に小さくすることで、(d)に示した垂直方向付近の放射損失変化が急峻になり、基本モードと高次モードの放射損失の差が大きくなって、単一モード動作が実現可能になると期待されます。

さらに、本研究では、上記の結合係数の条件を満たすことが出来る具体的なデバイス構造の設計を行いました。設計を行ったデバイス構造の模式図と、 $\kappa_{1D} + \kappa_{2D}$ および μ の計算結果を図 3 に示します。2重格子フォトニック結晶の構造としては、図 3(a)に示す楕円と真円を組み合わせた構造を採用し、その重心間距離 d と空孔の大きさのバランス x を変化させることで、 $\kappa_{1D} + \kappa_{2D}$ (または R と I) の値の自在な調整が可能なることも見出しました。また、図 3(b)に示すように、フォトニック結晶層と裏面の反射鏡の間隔 t_{pclad} を変えることで、 μ の大きさも自在に変えられることを確認しました。

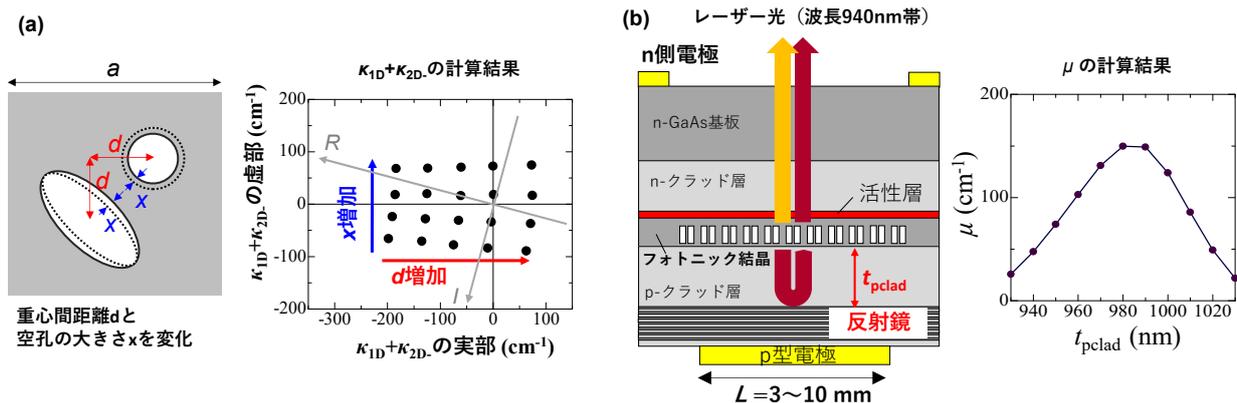
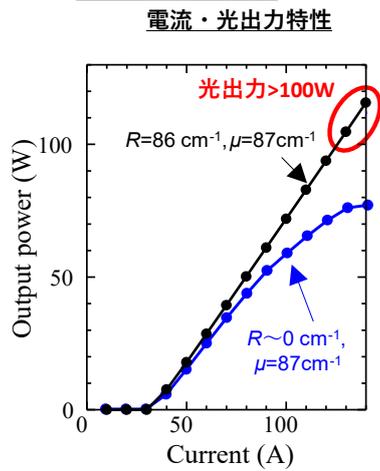


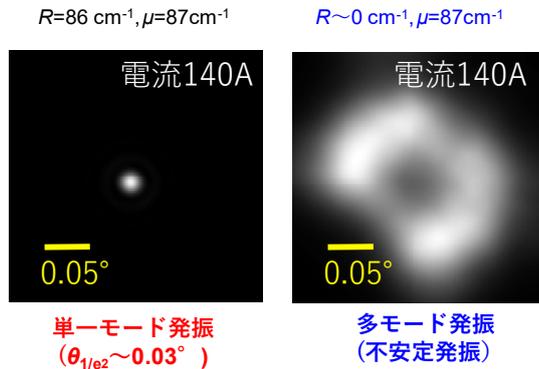
図 3.(a)超大面积単一モード動作の実現に向けて設計した2重格子フォトニック結晶の模式図。重心間距離(d)および2つの空孔の大きさのバランス(x)を変化させることで、 $\kappa_{1D} + \kappa_{2D}$ (または R と I) の自在な制御が可能となります。(b)フォトニック結晶レーザーの全体像の模式図。フォトニック結晶層と裏面反射鏡の距離 t_{pclad} を変化させること等で、 μ の大きさを自在に制御することが出来ます。

以上で設計したデバイス構造をもとに、電流を注入した際の光とキャリアの相互作用も考慮しながら、電流・光出力特性や出射ビーム形状等の詳細な発振特性の解析を行いました。はじめに、直径3mmのフォトニック結晶レーザーにおいて、 R と μ を 80 cm^{-1} 程度に低減した構造について、発振特性を解析した結果を図4(a)に示します。また、参考のため、 R のみを極端に低減した場合($R \sim 0\text{ cm}^{-1}$)の解析結果も、同図に合わせて示します。両者を比較すると、 R と μ を同程度に低減した構造において単一モード発振が得られ、100Wを超える光出力と極めて狭いビーム拡がり角($\theta_{1/e^2} \sim 0.03^\circ$)の単峰なビームが得られることが明らかになりました。一方、 R のみを極端に低減した構造では、発振が不安定化し、出力の減少とビーム拡がり角の大きな増大が生じることが判明し、 R と μ のバランスを適切に保つことが重要であることも明らかとなりました。以上の結果を踏まえて、 R と μ のバランスを保ちつつ、両者をさらに低減したフォトニック結晶レーザーに対して、直径を10mm Φ まで拡大した際の発振特性を解析した結果を図4(b)に示します。本設計では、単一モード発振を維持しながら、1kW級の光出力とさらに狭いビーム拡がり角($\theta_{1/e^2} < 0.01^\circ$)の単峰なビーム形状が得られることが明らかとなりました。

(a) **3 mmΦ設計**

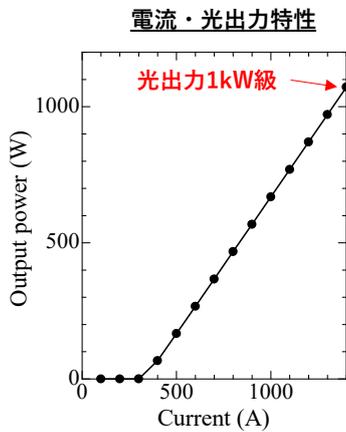


ビーム形状



(b) **10 mmΦ設計**

$R=45\text{ cm}^{-1}, \mu=44\text{ cm}^{-1}$



ビーム形状

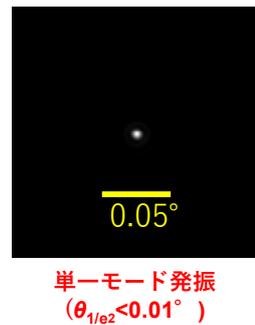


図 4.(a)3mmΦフォトニック結晶レーザーの発振特性の解析結果。 R と μ を同程度に低減した場合に、安定した単一モード発振が得られ、100W級の光出力が実現可能であることがわかります。(b) 10mmΦフォトニック結晶レーザーの発振特性の解析結果。 R と μ をさらに低減した設計により、単一モード発振による単峰なビーム形状を維持したまま、1kW級の光出力が得られることが理論的に示されました。

3. 波及効果、今後の予定

今回、フォトニック結晶レーザーの内部における、光波のエルミート結合および非エルミート結合の大きさに着目した理論解析を行うことにより、超大面積デバイスで単一モード発振を実現する条件を定式化することに成功するとともに、100W~1kW級の光出力が得られる具体的なデバイス構造の設計にも成功しました。本研究により、フォトニック結晶レーザー単体で、CO₂レーザーやファイバーレーザー等の従来の大がかりな加工用レーザーに匹敵する単一モード光出力が実現可能であることが理論的に明確に示されました。

今後は、今回設計を行った超大面積(3~10mmΦ)フォトニック結晶レーザーを実際に作製し、計算で予測されるような100W~1kW級の単一モード動作を実現していく予定です。現在、設計光源の実現に向けて、大面积デバイスの作製技術および放熱・実装技術を確立している段階であり、今後も継続して研究開発を進めていくことで、超大面積・単一モード動作の実現が可能になると考えています。近い将来には、設計に基づき作

製したフォトニック結晶レーザーをレーザー加工装置や金属 3D プリンタ等に搭載することにより、これらの装置の大幅な小型化・低コスト化・低消費電力化が進むとともに、衛星間光通信や医療用レーザーメス等の新たな用途への展開が期待されます。

本研究で構築した、エルミート結合および非エルミート結合を考慮した統一的な理論解析手法は、近年世界的に研究が活発化している、非エルミート物理分野の発展にも寄与するもので、本成果の学術的な意義も極めて大きいと考えられます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、主に、以下のプロジェクトのもとに推進されました。

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「フォトニック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、フォトニック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。)

また、併せて、日本学術振興会 科学研究費助成事業 特別推進研究 (22H04915)、基盤研究 B (20H02655) の援助も受けています。

<用語解説>

注 1) 単一モード発振・多モード発振：モードとは、レーザー内部の光の共振状態を表します。単一モード発振とは、安定した 1 つの共振状態のみでレーザー発振が生じる様を表し、このとき、理想的な狭い拡がり角のビームが得られます。一方、多モード発振とは、複数の共振状態で同時にレーザー発振が生じる様を表します。一般的な半導体レーザーでは、出射面積を拡大するほど、複数のモードでの発振が生じ、レーザーから出射される光が、空間的に大きく拡がってしまいます。

注 2) フォトニック結晶レーザー：2 次元フォトニック結晶 (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) プレス発表「新たなフォトニック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 –」を参照。

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

注 4) プレス発表「フォトニック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 –」を参照。

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

注 5) プレス発表「短パルス・高ピーク出力動作可能な新しいフォトニック結晶レーザーの開発に成功 – 超微細加工、高精度光センシング、バイオイメージング等への応用に向けて –」を参照。

https://www.kyoto-u.ac.jp/sites/default/files/2021-03/210304_noda-725229c784f1d4c836f62635515f82c2.pdf

注 6) フォトニック結晶レーザーに用いられているフォトニック結晶構造は、進行波のみが結晶中を伝搬する場合には、光が上下方向へと放射されますが、進行波がフォトニック結晶により回折を受けて、回折波が生じたとき、進行波と回折波の上下方向への放射が適度に打ち消し合うように工夫されています。これにより、上下方向に適度に光が放射され、光出力が面垂直方向に得られるようになっています。

<研究者のコメント>

CO₂レーザーやファイバーレーザーの光出力に匹敵する単一モード半導体レーザーの実現は、レーザー応用に関わる全ての研究者の長年の夢と言っても過言ではなく、今回、その実現可能性を理論的に示すことが出来たことは、大変嬉しく思います。今後は、本研究で提案したフォトリック結晶レーザーを実証し、レーザー加工を始めとして、多岐に亘る応用に展開していきたいと考えております。(野田)

<論文タイトルと著者>

タイトル：General recipe to realize photonic-crystal surface-emitting lasers with 100-W-to-1-kW single-mode operation (和訳：100W~1kW 級単一モードフォトリック結晶レーザー実現のための一般的レシピ)

著者：Takuya Inoue^{†,*}, Masahiro Yoshida[†], John Gelleeta[†], Koki Izumi, Keisuke Yoshida, Kenji Ishizaki, Menaka De Zoysa, Susumu Noda^{*}

([†]: These authors are contributed equally to this work.)

(*: Corresponding authors: T. Inoue and S. Noda)

掲載誌：Nature Communications DOI：10.1038/s41467-022-30910-7