

## 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—

### 概要

京都大学工学研究科の野田進教授、井上卓也助教、森田遼平博士課程学生、メーナカ デゾイサ講師、石崎賢司特定准教授等のグループは、短パルス（数 10 ピコ秒<sup>注1</sup>）かつ高出力（数 10～100 ワット以上）で動作可能な新しいフォトニック結晶レーザー<sup>注2</sup>の開発に成功しました。これは、スマート加工を可能とする微細加工や、高精度光センシング、バイオイメージングなどの幅広い応用にとって、極めて重要な成果と言えます。

製造現場における無人化が進む中、加工条件を自動的かつ精密に最適化するスマート加工の実現のため、熱の影響を受けない超精密加工が可能な短パルス・高ピーク出力レーザー光源の実現が求められています。また、車の自動運転に代表されるスマートモビリティ分野においては、アイセーフかつ高分解能な光測距（LiDAR）<sup>注3</sup>を実現するため、数 10 ピコ秒以下の極めて短いパルス幅をもつ高ピーク出力光源が必要とされています。さらに、バイオ分野においても、高分解イメージングを可能とするため、短パルス・高ピーク出力光源が必須とされています。特に、小型、安価、可搬、高制御性という特徴をもつ半導体レーザーで、このような短パルス・高ピーク出力動作を実現することは、システムの大幅な小型化・低コスト化を実現する上で極めて重要と言えます。

研究グループは、高出力・高ビーム品質（＝高輝度）を有し、極めて狭い拡がり角をもつビーム射出が可能な半導体レーザー：フォトニック結晶レーザーの開発を進めて来ましたが、今回、さらにデバイス内部に、利得領域<sup>注4</sup>と吸収領域<sup>注5</sup>を2次元的に分布させるという新しいコンセプトに基づき、数 10 ピコ秒以下という短パルスかつ、数 10W～100W（将来的にはキロワット級も可能）という高ピーク出力動作が可能な新しいフォトニック結晶レーザーの開発に成功しました。この成果は、上述の様々な応用にとって、極めて重要な成果と言え、今後の超スマート社会実現の鍵を担う光源として期待されます。

本研究成果は、2021年3月4日に、英国科学誌 Nature Photonics のオンライン版に先行掲載され、2021年4月号の印刷版にて正式出版予定です。本研究は、NEDO 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発、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）および科研費（20H02655）のもとに行われました。

## 1. 背景

パルス幅が数 10 ピコ秒以下と短く、数 10~100W 以上のピーク出力をもつレーザー光源は、熱の影響を抑制した超微細レーザー加工、アイセーフと高距離測距を両立する高分解能 LiDAR、非線形効果を利用した高分解イメージング等、幅広い用途で利用が期待される重要な光源です。このような短パルス・高ピーク出力動作可能な光源を小型、安価、可搬、高制御性という特徴をもつ半導体レーザーで実現することは、応用上極めて重要です。

半導体レーザーにおいて短パルス発振を実現する有力な方法の 1 つとして、受動 Q スイッチングと呼ばれる手法があります。この手法では、最初に、あえてレーザー発振が生じにくい状態を作ります。具体的には、レーザー内部に、光の増幅を行う利得領域<sup>注 4)</sup>に加えて、光の吸収領域<sup>注 5)</sup>を設けて余分の負荷を与えるようにします。この場合、利得領域に通常よりも多くの電流を流し、より多くのキャリア (=電子・正孔対) を蓄積しなければ、発振状態に至らないようになります。電流を十分に流して、発振が一旦始めると、発振により生じたレーザー光が吸収領域に侵入し、その吸収が一気に飽和し、負荷が瞬時に軽くなります。その結果、利得領域に蓄積したキャリアが光として一気に放出され、短パルス発振が得られるようになります。しかし、従来の半導体レーザーにおいては、大面積で光を制御して単一モード動作<sup>注 6)</sup>を維持する機構が存在しません。そのため、十分なピーク出力を得るために、多くのキャリアを貯めようとして、利得領域や吸収領域の面積を拡大すると、動作が不安定になり、パルス波形やビーム品質の著しい劣化が生じるようになります。その結果、前述の応用で必要とされるような、数 10~100W 以上の高ピーク出力をもつような短パルス動作を実現することは極めて困難でした。

## 2. 研究成果

上述のような背景のもと、本研究では、独自のフォトリック結晶レーザー技術を用いて短パルスかつ高出力動作を同時に実現可能な新しいコンセプトの提案と、その開発・実証に成功しました。フォトリック結晶レーザー<sup>注 2)</sup>とは、微小な格子点が 2 次元的に周期的に並んだナノ構造体 (フォトリック結晶) を配置したレーザーであり、フォトリック結晶で生じる 2 次元的な光の定在波状態をレーザー発振に利用することで、大面積での単一モード動作を実現することが出来ます。

フォトリック結晶レーザーの特徴を活かした新しい短パルス・高ピーク出力動作を実現するためのコンセプトを図 1 に示します。同図(a)に示すように、光の増幅作用をもつ利得領域の周囲に、負荷として作用する吸収領域を 2 次元的に配置します。本方式では、フォトリック結晶レーザーのもつ大面積で安定な共振状態を形成可能という特徴ゆえに、利得領域を十分に広く設けることが出来、かつ、吸収領域も 2 次元的に自由に導入することが可能になります。この際、フォトリック結晶の形状として、同図右に示すように、2 重格子フォトリック結晶構造<sup>注 7)</sup>を用い、500 $\mu\text{m}$   $\phi$  以上の大面積でも安定して 1 つの基本モードで動作出来るように工夫します。その結果として、利得領域および吸収領域に十分に多くのキ

キャリアを蓄積することが出来るようになります。発振が生じると、一気に吸収領域の吸収が飽和し、蓄えられていた多くのキャリアが、瞬時にレーザー光に変換され、Qスイッチング動作が起こり、短パルスかつ高ピーク出力動作を安定して得ることが出来るようになりますと期待されます。

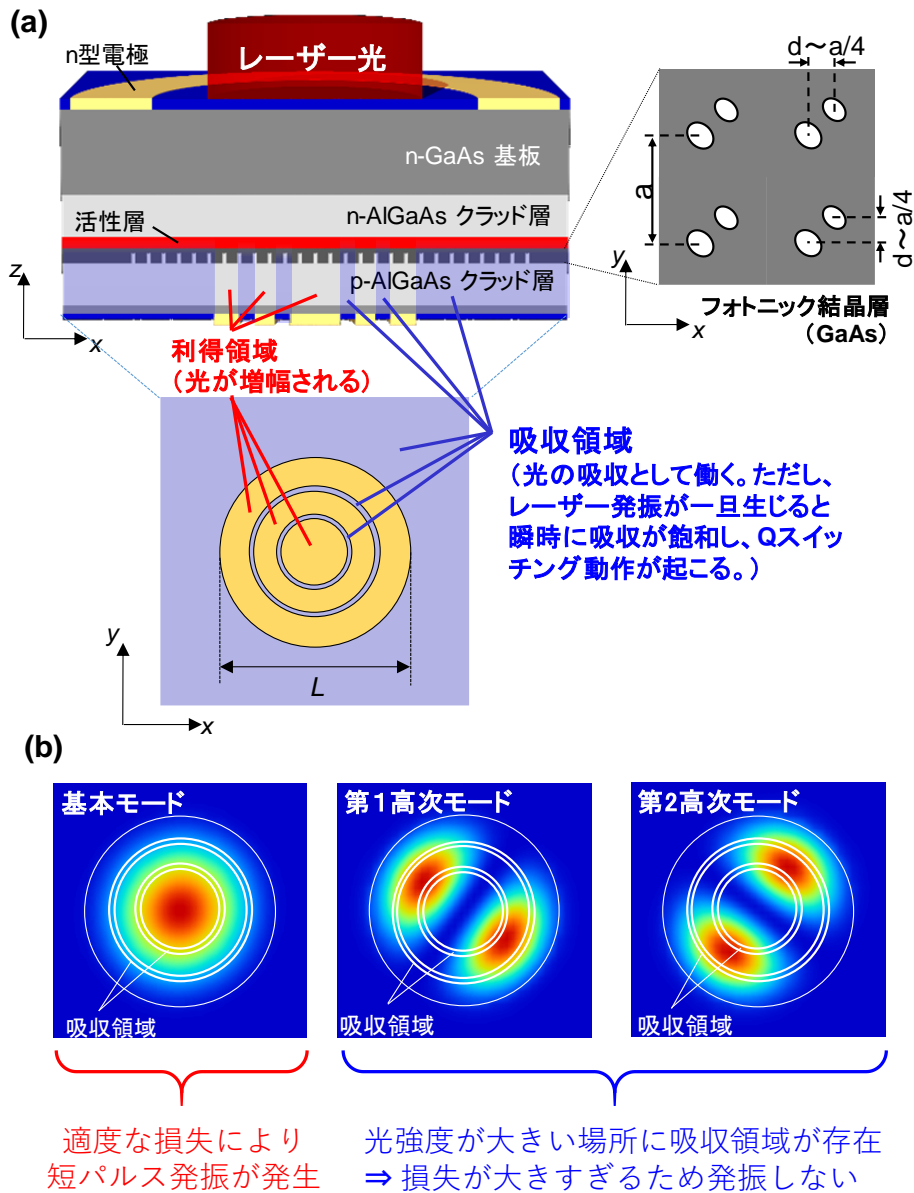


図 1. (a)利得と吸収を 2 次元的に配置した短パルスフォトニック結晶レーザーの模式図。(b)吸収領域の 2 次元的な配置の例。パルス発振の不安定化を招く高次モードの吸収損失を大きくして発振を抑制しつつ、基本モードに適切な大きさの吸収損失を与えることで、短パルス・高ピーク出力動作が実現可能となる。

本コンセプトに基づくフォトニック結晶レーザーにおいては、吸収領域の形状や配置に2次元的な自由度があるため、例えば、吸収領域を図1(b)に示すような形状・配置とすることで、発振の不安定化を引き起こす高次モードに対して、光の吸収をより起こりやすくし、一方で、狙った基本モードのみに対しては、Qスイッチング動作が適切に生じるような吸収のみに調整することで、基本モードで安定した発振が得られやすくなることも大きな特徴になっています。

なお、本フォトニック結晶レーザーに、電流を連続的(十分に長い時間)に注入すると、上述のQスイッチング動作が何度も繰り返し起こり、短パルス・高ピーク出力動作が繰り返し得られるようになります。また電流を数ナノ秒程度のみ流すと、短パルス・高ピーク出力を一回のみ得ることも可能です。さらに、数ナノ秒程度の電流を流すタイミングを様々に変化させると任意の時間に短パルス・高ピーク出力を出射することも可能になります。

上記のコンセプトに基づき、利得領域と吸収領域を2次元的に配置したフォトニック結晶レーザーの設計と作製を行いました。設計においては、活性層に蓄えられるキャリアにより光が増幅・減衰する効果、大面積デバイスで光が空間的に広がる効果、フォトニック結晶において光が相互に結合する効果等を全て考慮して、レーザーから生じる光強度の時間変化を解析することが出来る、新たな計算手法を確立しました。確立した計算手法をもとに、実際に設計・作製したデバイス構造を図2(a)に示します。光を増幅する利得領域の直径は $400\mu\text{m}$ Φとしており、その内部に、幅 $8\mu\text{m}$ のリング状の吸収領域を均等に2つ配置した構造としました。なお、今回作製したデバイスでは、発振波長を近赤外域の $935\text{nm}$ に設定しました。

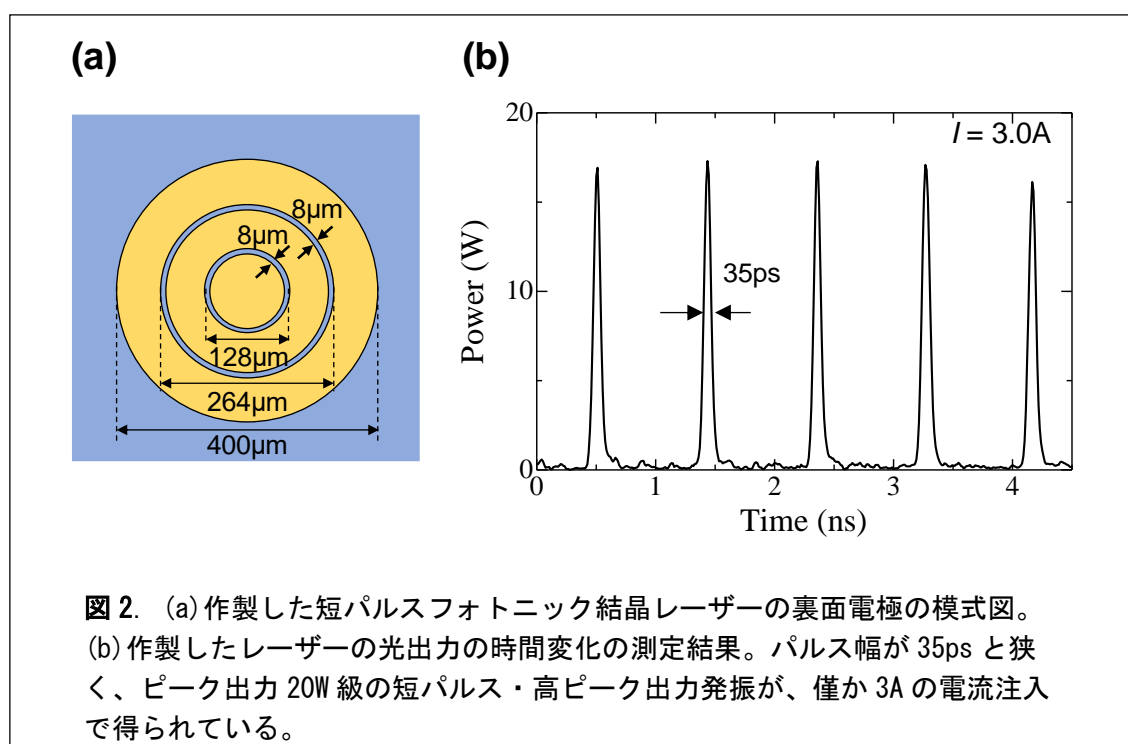


図 2(a)に示す利得領域、吸収領域をもつフォトニック結晶レーザーにおいて、電流 3A を注入した際に得られたレーザー光出力の時間変化の測定結果を図 2(b)に示します。パルス幅が 35ps と極めて狭いパルス発振が、断続的に発生している様子を確認することに成功しました。通常の近赤外半導体レーザーでは、3A の電流注入で、最大でも 3W 程度のピーク出力しか原理的に得られませんが、開発したレーザーでは、3A の電流注入で 20W 級のピーク出力が得られており、利得と吸収を 2 次元的に分布させる、という新しいコンセプトの優位性を実証することに成功しました。

上記の測定結果を踏まえ、さらなるピーク出力の向上を目指して、フォトニック結晶レーザーの利得領域と吸収領域の設計をさらに深化させました。こうして設計したデバイス構造（利得領域と吸収領域の配置構造）を図 3(a)に示します。本デバイスでは、利得領域の直径を 1mmΦまで拡大するとともに、リング状の吸収領域の数を 3 つに増やしており、吸収領域の配置と幅を調整することで、基本モードで安定したパルス発振が得られるように設計しています。さらに、フォトニック結晶の空孔形状についても、直径 1mmΦで単一モード発振が得られるように深化させた設計<sup>注7,8)</sup>を採用しました。設計構造について、直流電流 30A を注入した場合の光出力の時間変化を解析した結果、図 3(b)に示すように、パルス幅 40ps、ピーク出力 300W 級の短パルス・高ピーク出力発振が得られることが明らかとなりました。また、設計したデバイスを、ナノ秒程度の短い時間幅の電流注入により駆動した場合には、ピーク出力 300W 級の短パルス発振を、任意のタイミングで出射することも可能であることも確認できました。なお、光の増幅を行う活性層の材料や厚さを最適化することで、パルス幅のさらなる短縮（10~20ps 未満）や、ピーク出力のさらなる向上（>kW 級）の実現も期待されます。

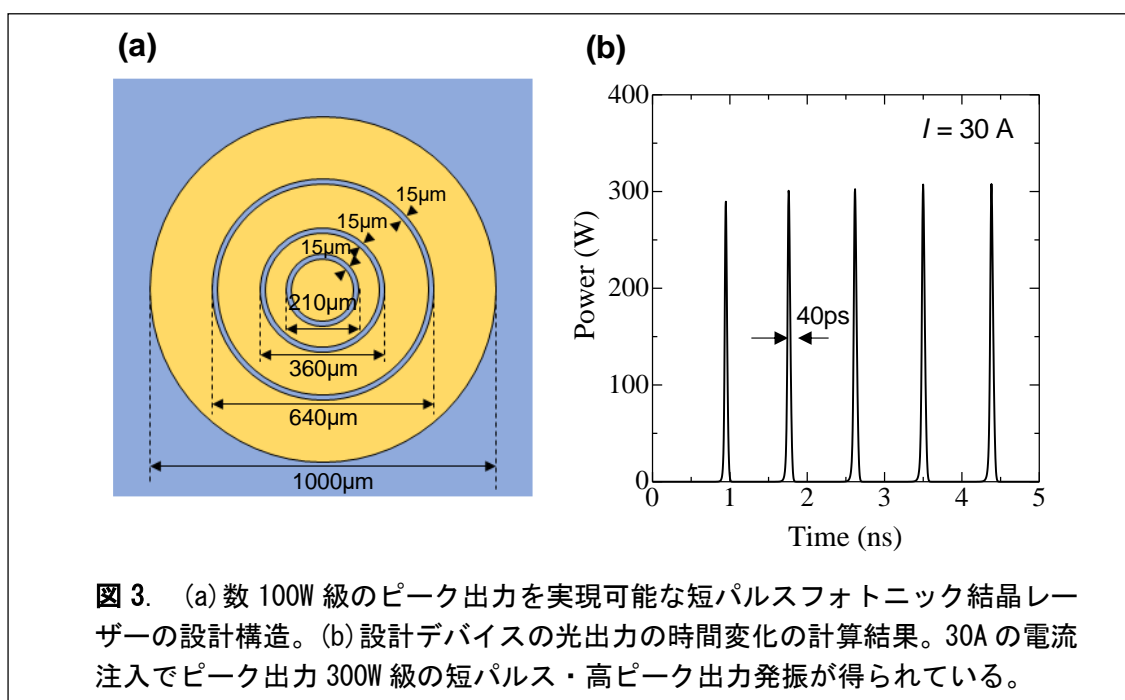


図 3. (a) 数 100W 級のピーク出力を実現可能な短パルスフォトニック結晶レーザーの設計構造。(b) 設計デバイスの光出力の時間変化の計算結果。30A の電流注入でピーク出力 300W 級の短パルス・高ピーク出力発振が得られている。

### 3. まとめと波及効果

今回、フォトニック結晶レーザーに、利得領域と吸収領域の 2 次元的な分布を導入するという新しいコンセプトを採用することで、数 10 ピコ秒以下という短パルスかつ、数 10W~100W（将来的には kW 級も可能）という高ピーク出力動作が可能なレーザーの開発に世界で初めて成功しました。

本研究成果は、すでに述べたように、様々な分野への波及効果が期待されます。例えば、直近の応用では、スマートモビリティ分野で不可欠となる LiDAR において、人間の目への安全性（アイセーフ条件）を確保しつつ出来るだけ遠くの物体の測距を可能とするため、パルス幅 100ps 未満でピーク出力 100W 級のレーザーの開発が要求されています。今回開発した半導体レーザーは、上記の要求をまさに満たすものであるため、本光源を LiDAR に搭載することでセンシングの性能が大幅に向上することが期待されます。

さらに、ピーク出力 kW 級の短パルス・高ピーク出力レーザーは、集光時のエネルギー密度が多く、材料の加工閾値（ $\sim J/cm^2$ ）に達するため、本研究で提案・開発した短パルス・高ピーク出力フォトニック結晶レーザーを用いることで、従来は不可能であった半導体レーザー単体でのレーザー微細加工が実現し、スマート加工分野の発展に大きく寄与するものと期待されます。今後は、今回開発した短パルス・高ピーク出力フォトニック結晶レーザーのピーク出力のさらなる向上（kW 級）の実現に向けて、デバイス構造のさらなる深化を進めるとともに、銅等の高反射金属や炭素繊維強化プラスチック（CFRP）等の微細加工応用を見据えて、発光波長の短波長化（青色等）にも取り組む予定です。

以上のように、今回開発した短パルス・高ピーク出力フォトニック結晶レーザーは、将来のスマート社会（Society 5.0）の実現に向けて、多方面から大きく貢献することが期待されます。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、主に、以下の 2 つ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「フォトニック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 年度から推進中。本プロジェクトは、次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発の一環として、フォトニック結晶レーザーの短パルス化および短波長化の実現を目的とするもの。）
- ・ 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（管理法人：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、一部、基盤研究 B（20H02655）の援助も受けています。

## <用語解説>

- 注 1) ピコ秒:** 1 ピコ秒は  $10^{-12}$  秒に相当する。光は 1 秒間に地球 7 周半分の距離 (30 万 km) を伝搬することが出来るが、1 ピコ秒の間には、わずか 0.3 ミリメートルしか伝搬することが出来ない。このような極めて短い時間にレーザー光のエネルギーを集中させることで、様々な物質を、発熱による溶融を生じさせることなく、高精細に加工することが可能になる。また、上記のような極めて短い光の伝搬長と高いエネルギー密度を利用することで、レーザー光を利用したセンシングの分解能を大幅に向上することが出来る。
- 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) 光測距 (LiDAR):** Light Detection and Ranging (LiDAR) は、レーザー光を用いたリモートセンシング技術の1つです。近年、ロボットの自動走行や、自動車の自動運転に不可欠な技術の一つとして、注目を集めています。本研究で開発した短パルス・高ピーク出力レーザーは、ToF (Time-of-Flight) 方式と呼ばれる、パルス状のレーザー光を出射し、それが被検出物にて反射・散乱されて戻ってくるまでの時間差から距離を計測する手法への適用が期待されます。その際、アイセーフ、すなわち、人間の目への安全性に十分注意する必要があります。
- 注 4,5) 利得領域、吸収領域:** 電流を注入し、光を増幅する領域を利得領域と呼びます。一方、電気を流さず、光を吸収する領域を吸収領域と呼びます。利得領域、吸収領域のどちらの領域にも、活性層と呼ばれる共通の層が含まれています。利得領域として活用する際には、電気を流すことで、この活性層にキャリア (電子・正孔対) を蓄積することで光の増幅作用が生じさせます。一方、吸収領域として、活用する際には、電気を流さず、活性層を、光を吸収する損失体として用います。なお、利得領域への十分なキャリアの蓄積により、レーザー発振が開始すると、利得領域で発生したレーザー光が、吸収領域に侵入し、吸収領域の活性層においても、そのレーザー光を吸収することでキャリアが発生し急激に吸収が小さくなるようになります。
- 注 6) 単一モード動作:** ここでの文脈でのモードは、横モードとも呼ばれます。モードとは、レーザーの内部の光の発振形態を表します。発振形態には、基本モードと呼ばれる最も安定した発振形態以外に、動作の不安定性をもたらす高次モードが存在します。単一モード動作とは、基本モードのみで動作する様を表します。レーザーが、基本モードで動作することにより、動作が安定し、また外部に取り出されたレーザー光の集束性が向上します。従って、高度なセンシングや将来の光加工への応用においては、単一モード動作するレーザーが要求されます。

注 7) 2 重格子フォトニック結晶構造：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—」を参照のこと。

[https://www.kyoto-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 8) 深化した 2 重格子フォトニック結晶構造：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—」を参照のこと。

[https://www.kyoto-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)

### <研究者のコメント>

1999 年に、フォトニック結晶レーザーを発明して以来、着実に研究開発を進め、2014 年に 0.2W 級のフォトニック結晶レーザーの実用化を開始し、2018 年には、2 重格子フォトニック結晶の概念の導入により、高輝度動作 ( $300\text{MWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$  以上) の実現に成功することができました。さらに、2020 年には、光源の性能をさらに向上させて LiDAR システムへ搭載や電氣的 2 次元ビーム走査の実現にも成功しています。今回、これまで開発を進めてきたフォトニック結晶レーザーにおいて、「利得と吸収を 2 次元的に分布させる」という新しい概念を取り入れることにより、数 10 ピコ秒以下という短パルス幅で数 10W~100W 以上の高ピーク出力動作可能な、新たなフォトニック結晶レーザーのコンセプトの創出と開発に成功しました。短パルス・高ピーク出力フォトニック結晶レーザーは、将来のスマート社会 (Society 5.0) の実現に向けて、多方面から大きく貢献することが期待されます。今後、フォトニック結晶レーザーの一層の深化とその社会実装を目指し、研究を進めていきたいと考えています。

### <論文情報>

タイトル：“Photonic-crystal lasers with two-dimensionally arranged gain and loss sections for high-peak-power short-pulse operation”

著者：R Morita<sup>†</sup>, T. Inoue<sup>†\*</sup>, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda<sup>\*</sup>

(<sup>†</sup>: These authors are contributed equally to this work.)

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

所属： Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University Kyoto 615-8510, Japan

掲載誌：Nature Photonics

DOI：10.1038/s41566-021-00771-5.