

# 高速自己変化可能なフォトニック結晶による高ピーク出力・短パルス光の発生 —超スマート社会を支える高精度光センシングやレーザー微細加工応用に向けて—

## 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、森田遼平 同特定研究員らのグループは、数 10 ピコ秒<sup>注1)</sup>以下という超短時間の間に、面内の共振波長分布が高速に自己変化可能なフォトニック結晶<sup>注2)</sup>を考案し、それを利用することにより、短パルス (<30 ピコ秒) かつ高ピーク出力 (>80 W) レーザー発振を実現することに成功しました。本成果は、フォトニック結晶における新たな物理現象の発現という学術的な意義があるとともに、将来の超スマート社会を支える高精度光センシングやレーザー微細加工応用にとっても、極めて重要な成果と言えます。

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精度光センシングや、熱の影響を受けない超精密なレーザー加工を実現するため、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。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してビーム品質が劣化するため、ピーク出力の限界がありました。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ニック結晶レーザー<sup>注3)</sup>に、可飽和吸収体<sup>注4)</sup> (光の強度が強くなるとともに、光の吸収が減少する物質) を導入することで、これまでに、パルス幅数 10 ピコ秒未満でピーク出力 20W 級の短パルスレーザー発振の実証に成功しています<sup>注5)</sup>。

今回、研究グループは、さらに高出力な短パルス発振を実現するための新たな工夫として、数 10 ピコ秒以下という僅かな時間の間に、面内の共振波長分布が高速に変化する自己変化可能なフォトニック結晶を考案しました。さらに、本フォトニック結晶を、フォトニック結晶レーザーの内部に導入することで、パルス幅 30 ピコ秒未満で、ピーク出力 80W 超 (これまでの 4 倍以上に相当) の短パルス発振を実現しました。

本成果は、2023 年 1 月 27 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。

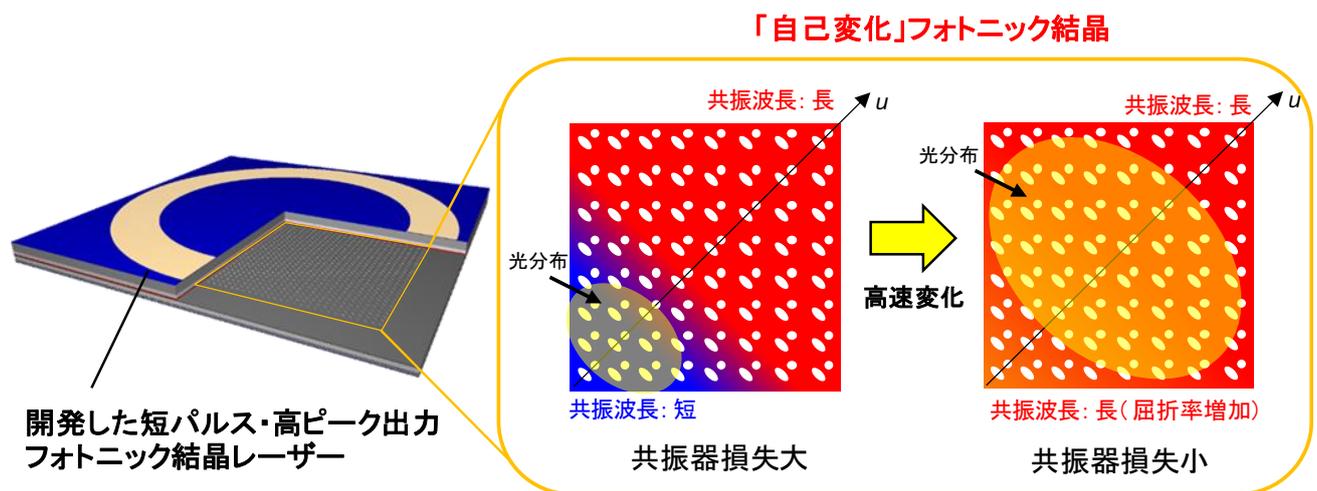


図: 「自己変化」フォトニック結晶に基づく短パルス・高ピーク出力レーザーの概念図。

## 1. 背景

パルス幅が数 10 ピコ秒以下と短く、数 10W~100W 以上のピーク出力をもつレーザー光源は、スマートモビリティ分野を支える高精度リモートセンシングや、スマート製造分野を支える超精密レーザー加工を実現する上で、極めて重要です。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、高速電気制御可能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手法としては、Q スイッチングと呼ばれる手法が知られています。本手法では、最初にあえてレーザー発振が生じにくい状態 (= 光の損失が大きい状態) を作り、レーザー発振が生じるまでに、通常よりも多くのキャリアをレーザー内部に蓄積させます。次に、光の損失が小さい状態に瞬時に変化させることで、それまでに蓄積されたキャリアを一気に光として放出して、ピーク出力の高い短パルス発振を得ます。これまで、本研究グループでは、高出力動作と高ビーム品質動作を兼ね備えたフォトニック結晶レーザーにおいて、その内部に可飽和吸収体を導入することで Q スイッチング動作を実現し、パルス幅数 10 ピコ秒未満、ピーク出力 20W 級の短パルス発振を得ることに成功していました<sup>注5)</sup>。

## 2. 研究手法・成果

上述のような背景のもと、本研究では、フォトニック結晶レーザーにおいて、ピーク出力のさらに高い短パルス発振を実現するための新たな工夫として、共振波長 (共振周波数) の面内分布が、高速に自己変化可能なフォトニック結晶の概念を提案・実証しました。図 1(a)に提案する自己変化フォトニック結晶を有するフォトニック結晶レーザーの模式図を示します。本構造は、レーザーの内部に含まれるフォトニック結晶層において、その周期  $a$  が面内一方向 (図では  $u$  軸方向) に徐々に増加していることを特徴とします。周期が大きな領域では、そこで共振する光の波長が長くなる (= 共振周波数が低くなる) ため、本フォトニック結晶は、場所によって共振周波数が異なります。このようなフォトニック結晶構造において、ピーク出力が高い短パルス発振が得られる原理を図 1(b)および 1(c)に示します。初期状態[図 1(b)]においては、上述した共振周波数の面内分布が生じており、その結果、デバイスの大部分 (図ではデバイスの右側) は、光のバンドギャップ<sup>注6)</sup>として働くため、光はデバイスの端部の狭い領域 (図ではデバイスの左端) に局在します。このとき、光はデバイスの外部により多く漏れていくため、初期状態は、光の損失が大きい状態となり、レーザー発振が生じるまでに、通常よりも多くのキャリアをレーザー内部に蓄積させます。一方、レーザー発振が開始されると、図 1(c)に示すように、光が発生した領域において多くのキャリアが消費され、その領域の屈折率が高速に変化することによって、共振周波数の高速な変化が生じます。このとき、デバイスの右側のバンドギャップの効果が大幅に弱まるため、光はデバイスの右側にも拡がるようになり、共振器損失が減少して、光は一気に増幅されるようになります。以上のように、提案するデバイスにおいては、フォトニック結晶の周期を面内で変化させる工夫によって、損失の大きい状態から小さい状態へと瞬時に自ら「変化」することによって Q スイッチング動作を生じさせることが可能であり、それによって短パルスかつ高ピーク出力なレーザー発振を生じさせることが出来ます。本手法は、従来の可飽和吸収体を利用した Q スイッチングの手法とは異なり、フォトニック結晶レーザーならではの新しい手法であると言えます。

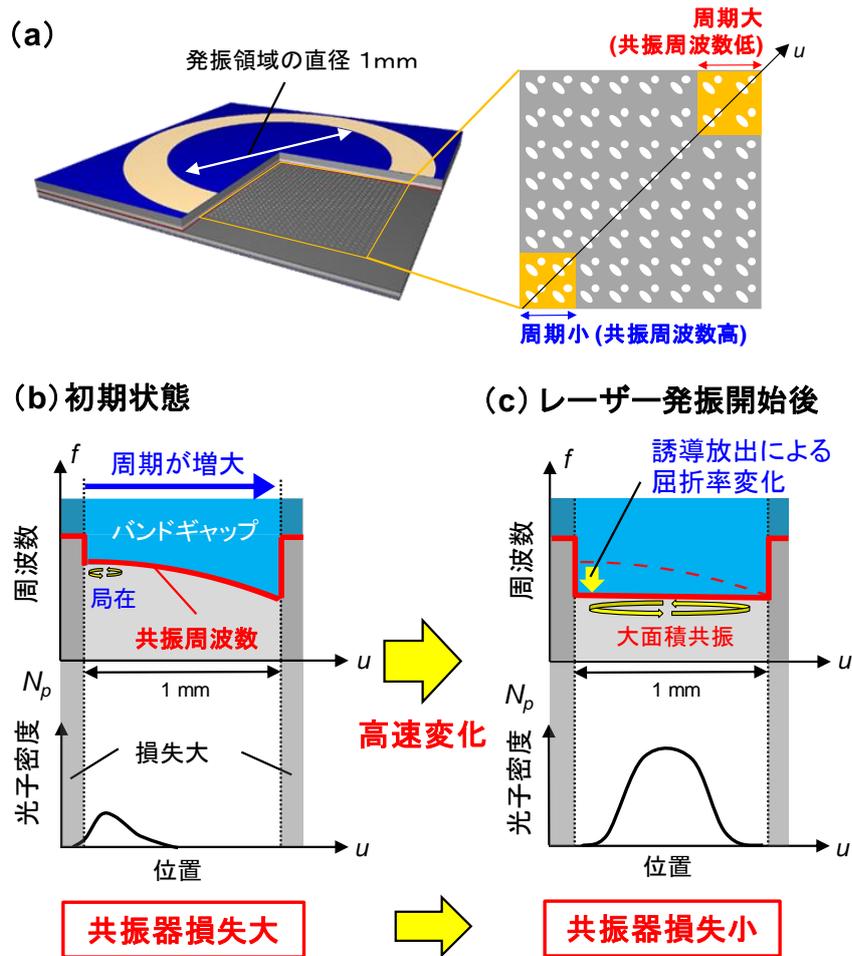
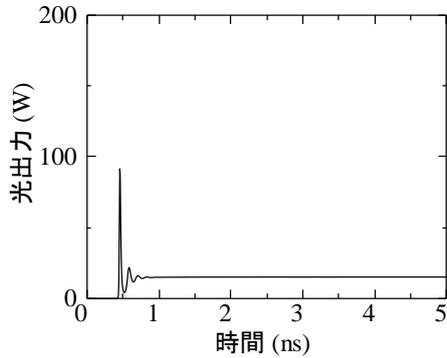


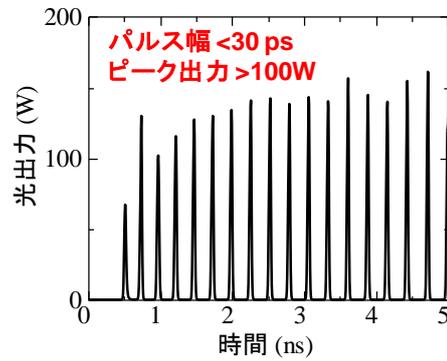
図 1.(a)提案する「自己変化」フォトニック結晶レーザーの模式図。(b)初期状態におけるデバイス面内の共振周波数の面内分布（上図）および光子密度分布の面内分布（下図）。初期状態では、バンドギャップの効果によって、光がデバイスの端部に追いやられ、損失の大きい状態となります。(c)レーザー発振開始直後におけるデバイス面内の共振周波数の面内分布（上図）および光子密度分布の面内分布（下図）。発振が始まると、屈折率が高速に変化し、面内の周波数分布の差が減少するため、光は大面積に拡がり、損失が小さい状態へと変化します。これにより、パルス幅が短く、ピーク出力の高いレーザー発振が実現します。

上記で説明した動作原理を確認するため、提案したフォトニック結晶レーザーの過渡応答解析を行いました。図 2(a)および図 2(b)に、共振周波数分布が一様である通常のフォトニック結晶レーザーと、提案する自己変化フォトニック結晶レーザーに、直流電流 20 A を注入した際の、光出力の時間変化の計算結果を示します。通常のフォトニック結晶レーザーでは、発振初期に光出力の振動が見られた後、一定の光出力が得られています。それに対し、提案する自己変化フォトニック結晶レーザーでは、パルス幅 30 ps 未満、ピーク出力 100 W を超える短パルス発振が断続的に得られていることがわかります。さらに、後者について、生成された光パルスの各瞬間における、デバイス内部の光子分布密度を計算した結果を図 2(c)に示しますが、時間の経過とともに、光が一方向に移動している様子が確認出来、上述の発振原理に従って、短パルスが生成されることが数値計算により確かめられました。

(a) 従来のフォトニック結晶レーザー



(b) 本研究で開発した自己変化フォトニック結晶レーザー



(c)

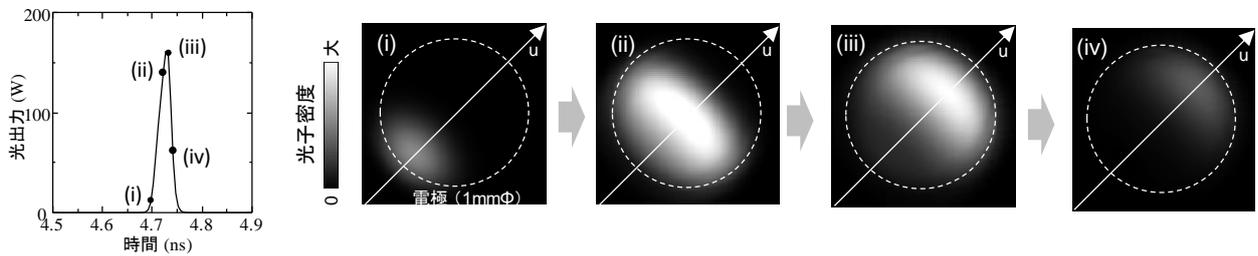


図 2.(a)従来のフォトニック結晶レーザーの光出力の時間変化の計算結果。(b)本研究で提案する自己変化フォトニック結晶レーザーの光出力の時間変化の計算結果。(c) 短パルス発振の各瞬間における光分布の計算結果。時間の経過とともに、光が一方向に移動している様子が確認出来ます。

以上の設計に基づき、実際にデバイスの作製を行い、そこから出射された光の強度が空間的および時間的に変化する様子を、ストリークカメラ<sup>注7)</sup>を用いて測定しました。注入電流 20 A のときに、得られたストリークカメラの画像を図 3(a)に示します。同図において、横軸は、光強度の時間変化を示しており、縦軸は、デバイスの u 軸方向の光強度の空間変化を示しています。同図において、時間方向に断続的に光が検出されていることから、作製したフォトニック結晶レーザーから断続的な短パルス光が出射されていることが確認できます。また、各パルスに注目すると、光が u 軸方向に移動している様子が観測され、図 2(c)に示した光の移動を実験的に観測することに成功しました。図 3(b)には、取得したストリークカメラの画像を空間的に積分することで得られた、光出力の時間変化を示します。パルス幅 30 ps 未満で、ピーク出力 80 W 以上（従来の 4 倍以上のピーク出力）の短パルス・高ピーク出力発振の実現に成功しました。

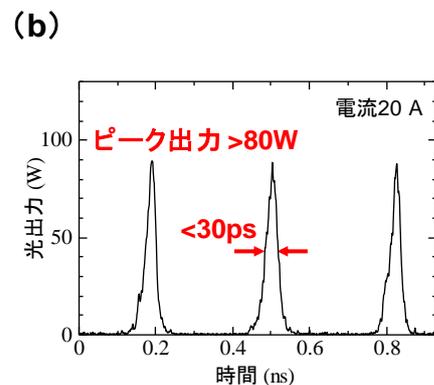
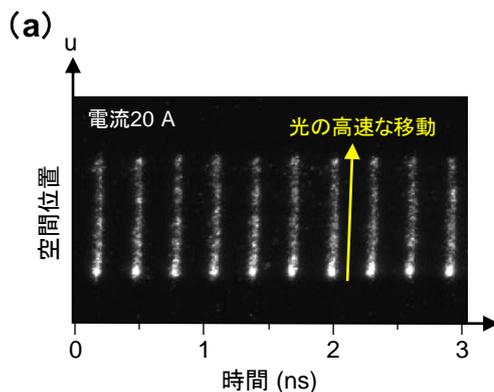


図 3.(a)作製した自己変化フォトニック結晶レーザーの空間的・時間的な光強度変化の測定結果。  
(b)作製した自己変化フォトニック結晶レーザーの光出力の時間変化の測定結果。パルス幅 30 ps 未満でピーク出力 80 W 超の短パルス・高ピーク出力発振の実現に成功しました。

### 3. 波及効果、今後の予定

今回、面内の共振周波数の分布を、高速に自己変化可能なフォトニック結晶を考案し、それをフォトニック結晶レーザーに導入することにより、30 ピコ秒未満という短パルスかつ、80W 以上（将来的には kW 以上も可能）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。従来の短パルス半導体レーザーでは、ピーク出力の高い短パルス発振を実現するために可飽和吸収体が必要とされてきましたが、本研究で、可飽和吸収体を利用せずともピーク出力の高い短パルス発振が実現可能であることが明らかとなったことは、レーザー分野にとって極めて重要な新しい成果であると言えます。

また、既に述べたように、本研究で開発した短パルスフォトニック結晶レーザーは様々な分野への波及効果が期待されます。例えば、今回開発した半導体レーザーを、スマートモビリティ分野で不可欠となる LiDAR に適用することにより、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（> 200 m）が可能となると期待されます。さらに、本研究で提案した自己変化フォトニック結晶レーザーに、可飽和吸収体の導入を組み合わせることで、ピーク出力 kW 級の短パルス・高ピーク出力も実現可能になると期待され、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への適用をはじめとして、様々な分野の発展に大きく寄与するものと期待されます。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、主に、以下のプロジェクトのもとに推進されました。

- ・ 日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究 B (20H02655)：研究課題「屈折率勾配を導入したフォトニック結晶レーザーによる短パルス・高出力発振の実現」(研究責任者 井上 卓也) (2020 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に共振周波数の面内分布をもつフォトニック結晶を導入することで、短パルス・高ピーク出力発振を実現することを目的とするもの。)
- ・ 日本学術振興会 科学研究費助成事業 特別推進研究 (22H04915)：研究課題「究極の光デバイス実現に向けた非エルミート・ナノフォトニクスの開拓」(研究責任者 野田 進) (2022 年度から推進中。本プロジェクトは、フォトニック結晶における非エルミート性の積極的な制御を通して、非エルミートナノフォトニクスとも呼ぶべき新しい学術分野の創出を目的とするもの。)
- ・ 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、併せて、JST CREST の援助も受けています。

#### <用語解説>

**注 1) ピコ秒**：1 ピコ秒は  $10^{-12}$  秒に相当します。光は 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ません。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ります。また、上記

のような極めて短い光の伝搬長と高いパワー密度を利用することで、レーザーセンシングの分解能を大幅に向上することが出来ます。

**注 2) フォトニック結晶**：光の波長と同程度の空間周期で屈折率が変化する人工ナノ構造のことです。フォトニック結晶の内部における光の伝搬は、通常の物質の内部の光の伝搬とは大きく異なっており、光の伝搬が禁止される「バンドギャップ（注 6 参照のこと）」や、2 次元的な定在波状態が生じる「バンド端」が形成されます。

**注 3) フォトニック結晶レーザー**：フォトニック結晶の内部において生じる、2 次元的な定在波状態をレーザー発振に利用して、面垂直方向に光を出射するレーザーのことです。面積を拡大しても、単一波長でのレーザー発振を維持することが可能であり、高出力と狭いビーム拡がり角を両立可能な次世代半導体レーザーとして注目されています。

**注 4) 可飽和吸収体**：光の強度が強まるにつれて、光を吸収する作用が弱まる物質のことです。可飽和吸収体をレーザーの内部に導入すると、最初は光を吸収し、損失の大きな状態となりますが、レーザー発振が始まると、光の吸収作用が弱まり、損失が一気に減少するため、高いピーク出力のパルス発振を得ることが出来ます。

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

**注 6) バンドギャップ**：光の伝搬が禁止された波長帯域のことです。バンドギャップに含まれる波長の光をフォトニック結晶に入射すると、光は強く反射されます。

**注 7) ストリークカメラ**：入射した光の空間的および時間的な変化を同時に取得することが出来る特殊なカメラのことです。本研究では、ストリークカメラを用いて、フォトニック結晶レーザーの出射光が空間的・時間的にどのように変化するかを測定しました。

#### <研究者のコメント>

フォトニック結晶の設計の工夫のみで、短パルス・高ピーク出力なレーザー発振が実現出来たことは、我々が当初予想していなかった驚くべき結果であり、学術的にも産業的にも極めて重要な成果であると考えています。今後は、本研究で実証した短パルスフォトニック結晶レーザーのピーク出力をさらに向上し、センシングやレーザー微細加工を始めとする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、井上）

#### <論文タイトルと著者>

タイトル：Self-evolving photonic crystals for ultrafast photonics (和訳：超高速フォトニクスのための自己変化フォトニック結晶)

著者：Takuya Inoue<sup>†,\*</sup>, Ryohei Morita<sup>†</sup>, Kazuki Nigo, Masahiro Yoshida, Menaka De Zoysa, Kenji Ishizaki, Susumu Noda\*

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

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

掲載誌：Nature Communications DOI：10.1038/s41467-022-35599-2