

フォトリック結晶レーザーを搭載した LiDAR の開発に成功 ―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―

概要

京都大学工学研究科の野田進教授、吉田昌宏助教、メーナカ デ ゾイサ講師、石崎賢司特
定准教授、國師渡研究員（ローム株式会社から京都大学に常駐）等のグループは、北陽電機
株式会社と共同で、フォトリック結晶^{注1}レーザーを搭載した光測距システム（LiDAR,
Light Detection and Ranging）^{注2}の開発に世界で初めて成功し、フォトリック結晶レー
ザーがスマートモビリティ応用に向けて極めて有効であることを示すことに成功しました。

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、すなわち、ロボット、農機、建
機、自動車等の自動運転の実現のためには、光測距システム（LiDAR）は、極めて重要です。
このような LiDAR システムの心臓部の光源には、小型・安価という特徴をもつ半導体レー
ザーの活用が必須ですが、従来の半導体レーザーは、高出力時に、ビーム品質^{注3}が著しく
劣化するとともに、非点収差や、大きなビーム拡がりのために、複雑なレンズ系を用いてビ
ームを整形してから用いる必要があり、部品やその精密な調整にコストがかかり、かつ空間
分解能を劣化させるという課題がありました。また、動作波長の環境温度依存性が大きいた
めに、太陽光等の背景光の影響が大きくなるという課題もありました。

研究グループは、高出力動作時にも、高ビーム品質で、狭い拡がり角をもつビーム出射が
可能で、動作波長の温度依存性が少ないフォトリック結晶レーザーの開発を進めて来まし
たが、今回、さらにフォトリック結晶レーザーの性能を向上させるとともに、本レーザーを
搭載した LiDAR の開発に世界で初めて成功しました。この成果は、フォトリック結晶レー
ザーが今後の超スマート社会を支える光源として極めて有望であることを示すものです。

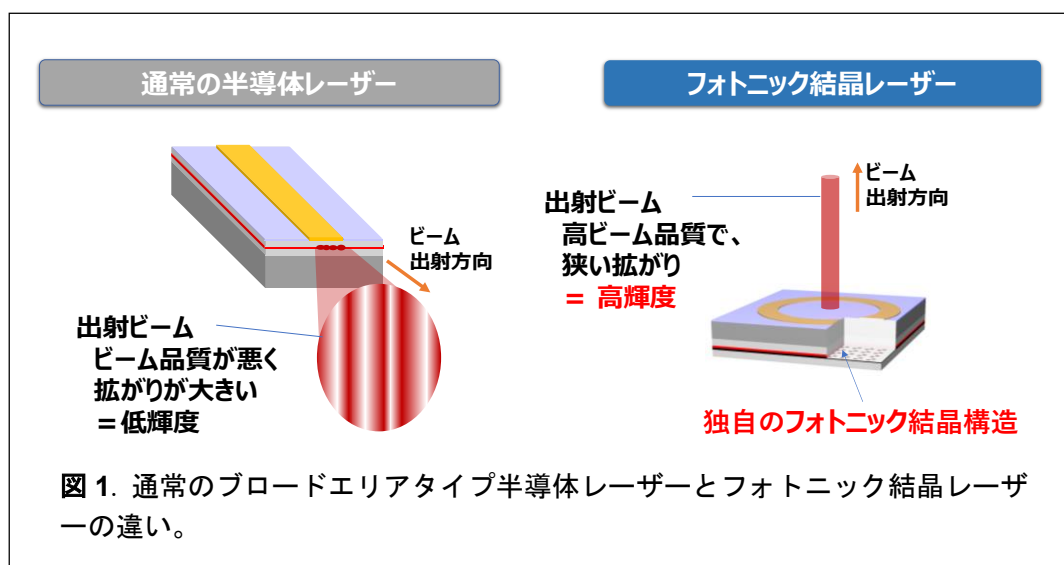
本研究成果は、様々な学会等で発表予定ですが、直近では、2020 年 7 月 13 日～16 日に
開催される、米国光学会（Optical Society of America）の Advanced Photonics Congress (On-
line) において発表予定です。また、今回、開発に成功した、LiDAR へ搭載可能なフォトリ
ック結晶レーザーは、京都大学光・電子理工学教育研究センター内に設置した光・量子拠点
より、MTA（Material Transfer Agreement）を介して、世の中への提供が可能です。

なお、本研究は、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）および、JST 戦
略的創造研究推進事業 CREST「次世代フォトリックス」のもとに行われました。

1. 背景

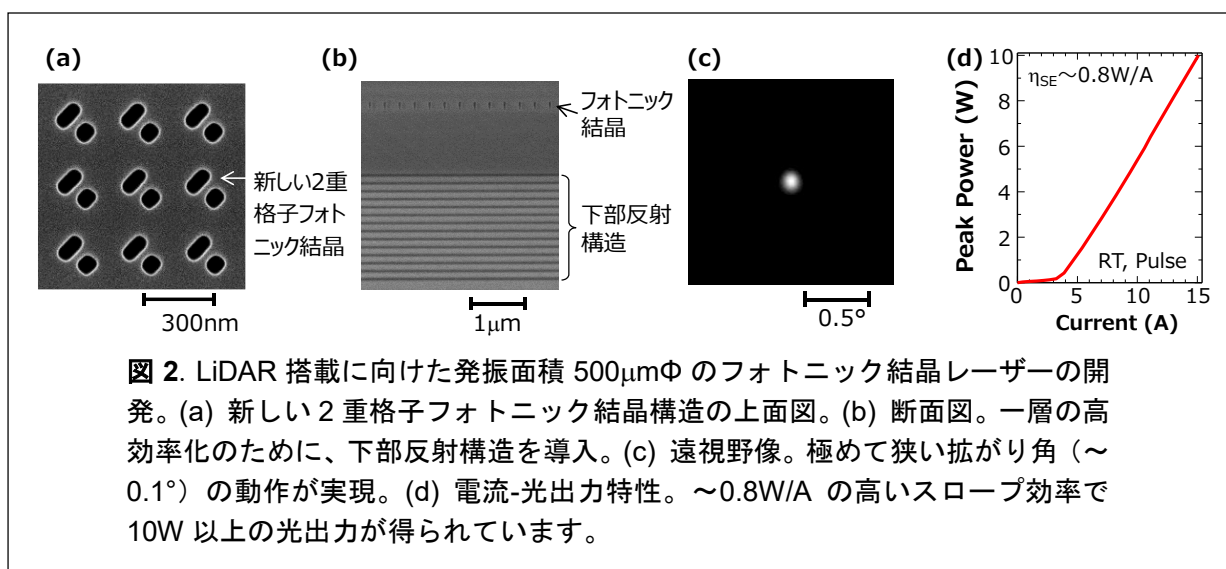
光測距システム（LiDAR）は、ロボット、農機、建機、自動車の自動走行などスマートモビリティを支える必須の光センシング技術と言えます。この LiDAR の心臓部の光源には、現在、小型・安価という特徴をもつ半導体レーザー（その中でも、光出力増大のため面積を拡大したブロードエリアタイプ）が用いられています（図 1 左）。このブロードエリア半導体レーザーにおいては、ビーム品質の劣化が激しく（＝低輝度^{注4)}）、かつ非点収差の存在のために、その使用時には、ビーム整形のための複雑な外部レンズ系とその精密な調整が必要となり、サイズ、コスト、性能に課題を抱えています。また、センシング時には、太陽光等の背景光の影響を抑えることが重要になりますが、通常の半導体レーザーは発振波長幅が広く温度依存性も大きいいため、広い帯域の光学フィルタしか用いることが出来ず、信号対雑音比が低いという課題もあります。

このような従来型の半導体レーザーの課題を打破し、LiDAR の小型化、低コスト化、さらには機能や性能の向上を可能とすると期待されているのが、フォトニック結晶レーザーです（図 1 右）。本レーザーは、独自のフォトニック結晶構造の活用により、原理的に、大面積でも単一モード^{注5)}の動作が可能という特徴を有しています。そのため、フォトニック結晶レーザーの発振面積を拡大して光出力を増大させても、ビーム品質を劣化させずに、極めて狭い拡がり角のビーム出射（＝高輝度動作）が可能となります。さらに、フォトニック結晶構造により規定された波長で動作するため、発振波長幅が狭く、かつその温度変化が小さいという特徴を有しています。これらの特長を活用することで、LiDAR 光源部に複雑なレンズ系が不要となり、部品点数が大幅に削減でき、かつ光学系の調整が不要で小型化・低コスト化が可能となります。また、極めて狭い拡がり角の円形ビームにより、空間的分解能の向上にも繋がります。さらに、狭い波長幅と小さな温度依存性から、狭帯域のフィルタを利用して、太陽光等の背景光の影響を極力低減することも可能です。すなわち、フォトニック結晶レーザーはスマートモビリティの発展に大きく寄与するものと期待されます。



2. 研究成果

上述のような背景のもと、本研究においては、フォトニック結晶レーザーの LiDAR への搭載を可能とすべく、まず、その性能のブラッシュアップを行いました。以前のプレス発表^{注6)}にて、大面積高ビーム品質動作を可能とする 2 重格子フォトニック結晶 (=2 つのフォトニック結晶格子を、x および y 方向におよそ 4 分の 1 波長ずらして重ねたフォトニック結晶構造) を提案しましたが、今回、さらなる高効率かつ安定動作を可能とし、かつ作製プロセスの簡略化が可能な新しい 2 重格子フォトニック結晶構造を考案・作製しました (図 2(a))。また、フォトニック結晶の上下に出射した光のうち、下方向へ出射された光を上方向へ反射させ、一層の高効率化と安定性が得られるように最適化された下部反射構造を導入しました (図 2(b))。これらの結果、直径 500 μm の発振面積のデバイスにおいて、これまで、最も狭いビーム拡がり角 $\sim 0.1^\circ$ (以前の 1/2 程度、ビーム品質 ~ 1.2 : 図 2(c)) を実現するとともに、これまでの 2 倍のスロープ効率 $\sim 0.8\text{W/A}$ で、ピーク光出力 10W 以上 (パルス動作) を得ることに成功しました (図 2(d))。



このようなフォトニック結晶レーザーから出射されたビームを、レンズを用いることなく長距離伝播させた様子を、図 3 に示します。比較のために、通常のブロードエリア半導体レーザーの場合の結果も示しています。通常のブロードエリア半導体レーザーでは、ビーム品質が悪く、また、縦横でビーム拡がりが異なり (非点収差があり)、かつ縦方向に極めて拡がりの大きなビームであることが分かります。ほんの数メートル先では、ビームが拡がり過ぎて、確認できなくなってしまうこともわかります。そのため、通常のブロードエリア半導体レーザーを用いる場合には、ビーム補正のために複雑なレンズ系が必要になります。それに対して、フォトニック結晶レーザーでは、レンズを用いなくとも、殆ど拡がることなく伝播し、30m という遠方においても、対称性のよい円形かつ $\sim 5\text{cm}$ という狭いビームスポットが得られています (1m 以下では、ビーム径が小さすぎて見えにくいことに注意)。

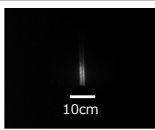
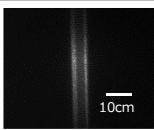
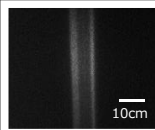
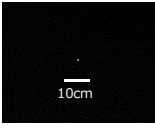
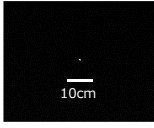
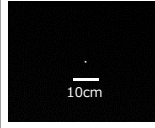
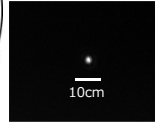
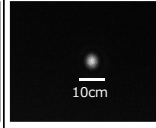
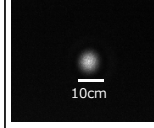
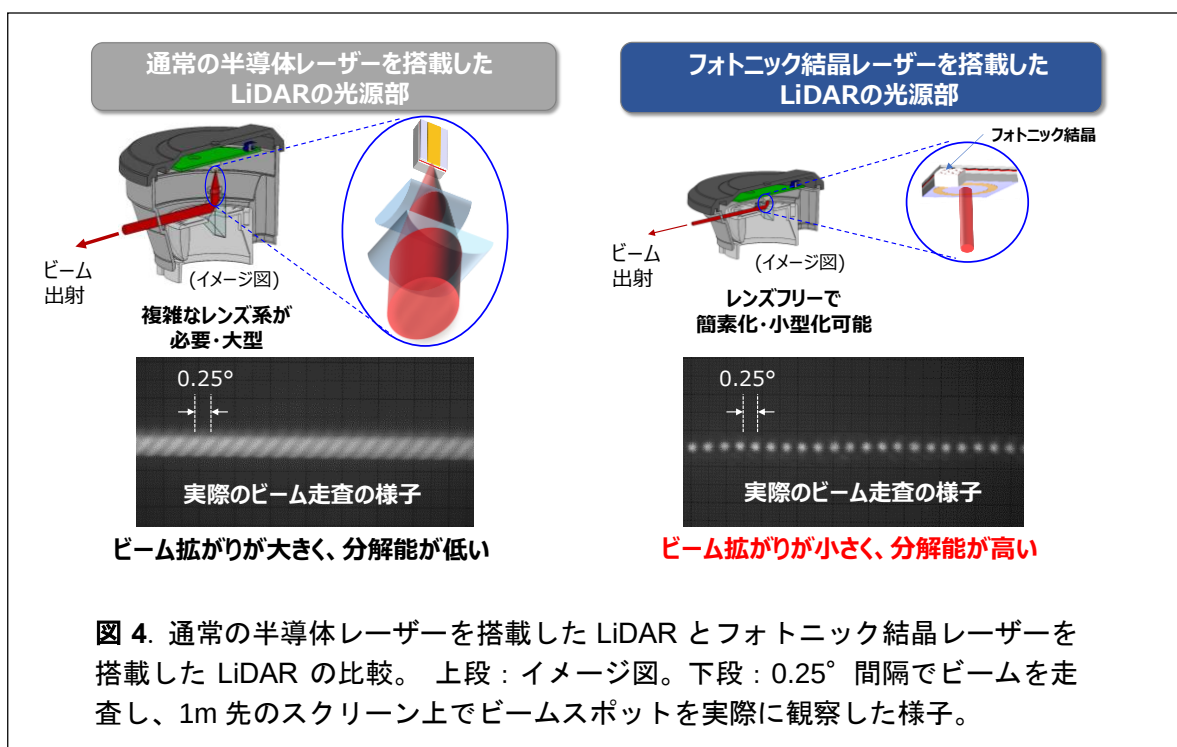
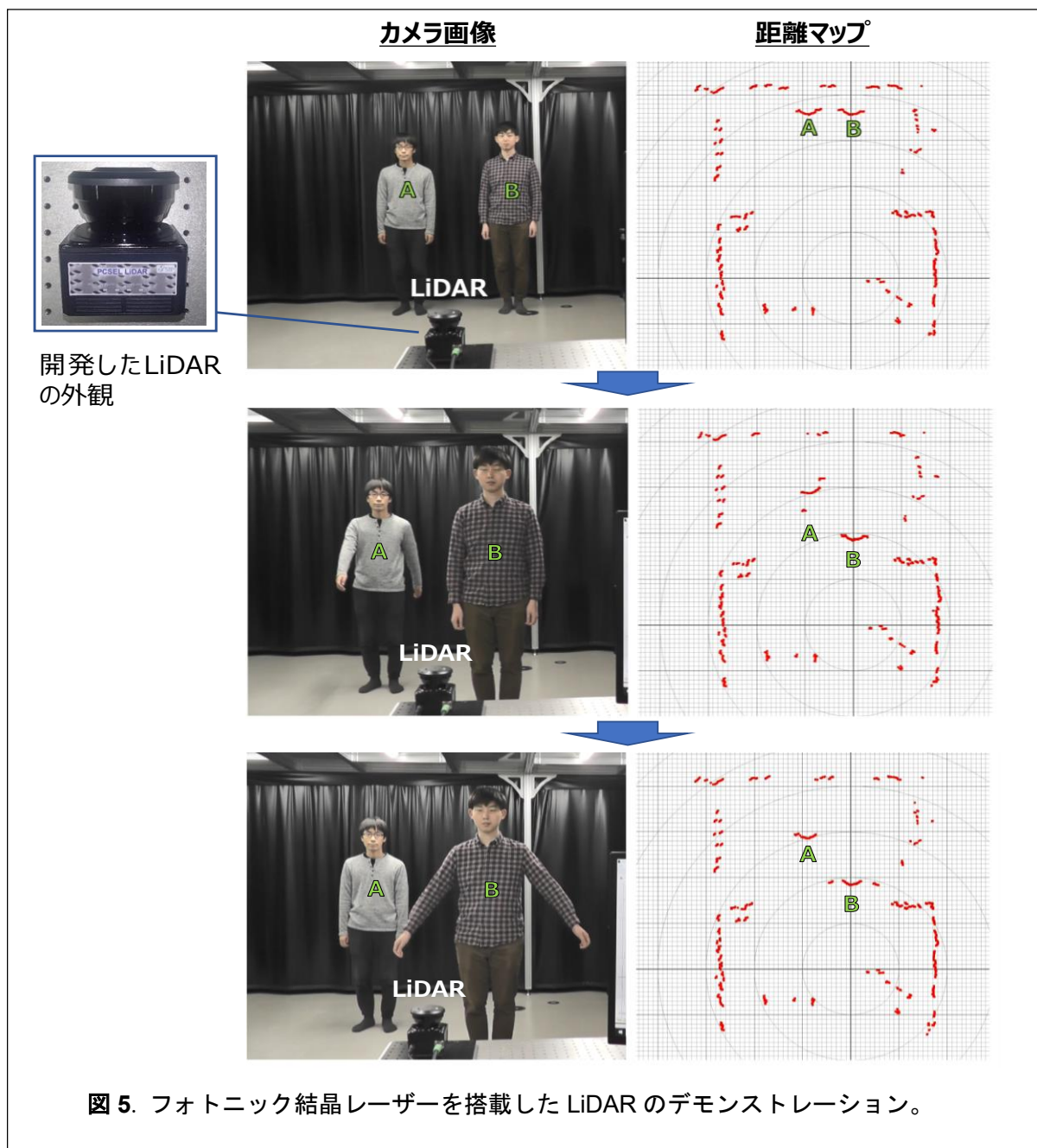
	15cm	50cm	1m	10m	20m	30m
通常の ブロード エリア 半導体 レーザー				確認不可	確認不可	確認不可
フォトニック 結晶 レーザー (500μmΦ)						

図 3. フォトニック結晶レーザーと通常のブロードエリア半導体レーザーの射出光を、レンズ無しで遠方まで伝播させた時のビームスポット。

このようなフォトニック結晶レーザーを搭載した LiDAR システム（2 次元センシングシステム）と、通常のブロードエリア半導体レーザーを搭載した LiDAR システムを比較した結果を図 4 に示します。通常のブロードエリア半導体レーザーの場合には、すでに述べたように、複雑なレンズ系を組み合わせる用いる必要があり、かつ、ビームの形状が乱れているために、ビームを走査した時にスポットに重なりが生じ、分解能が低下する様子が分かります（同図左下に実際に測定した様子が示されています）。これに対して、フォトニック結晶レーザーでは、極めて狭い拡がり角、かつ円形の高品質なビームであることから、レンズフリーで用いることが出来、かつまた、ビームスポットが明解に分解され、高い空間分解能を有することが分かります（同図右下に実際のビーム走査の様子が示されています）。



続いて、このように高い分解能が実現可能で、かつ、レンズフリーにより小型化が可能なフォトリック結晶レーザーを搭載した LiDAR システムを用いて、実際に、リアルタイムで測距を行った結果を、図 5 に示します。二人の人物 A, B が、移動する様子や、手を動かす様子などが、細かく捉えられている様子が見て取れます。このように、フォトリック結晶レーザーを搭載した LiDAR 開発に世界で初めて成功し、フォトリック結晶レーザーの有効性を示すことに成功しました。



本研究では、フォトニック結晶レーザーのさらなる光出力増大の可能性についても検討を行いました。そのために、フォトニック結晶レーザーの面積を直径 500 μm から、1mm へと拡大することを試みました。直径 1mm という大面積で、単一あるいは極少数のモードでの動作を可能とするために、図 2(a)に示す 2 重格子フォトニック結晶構造から、図 6(a)に示すような、2 重格子フォトニック結晶構造（空孔の形状のみならず、その距離をも精密に制御した構造）へと深化させました。その結果、 $\sim 70\text{W}$ という高ピーク出力（図 6(b)）（最大光出力は、用いた電源により制限）で、高ビーム品質動作を実現することに成功しました。このような高ピーク出力・高ビーム品質動作は、100m 超級の光測距をも可能にするものと期待されます。

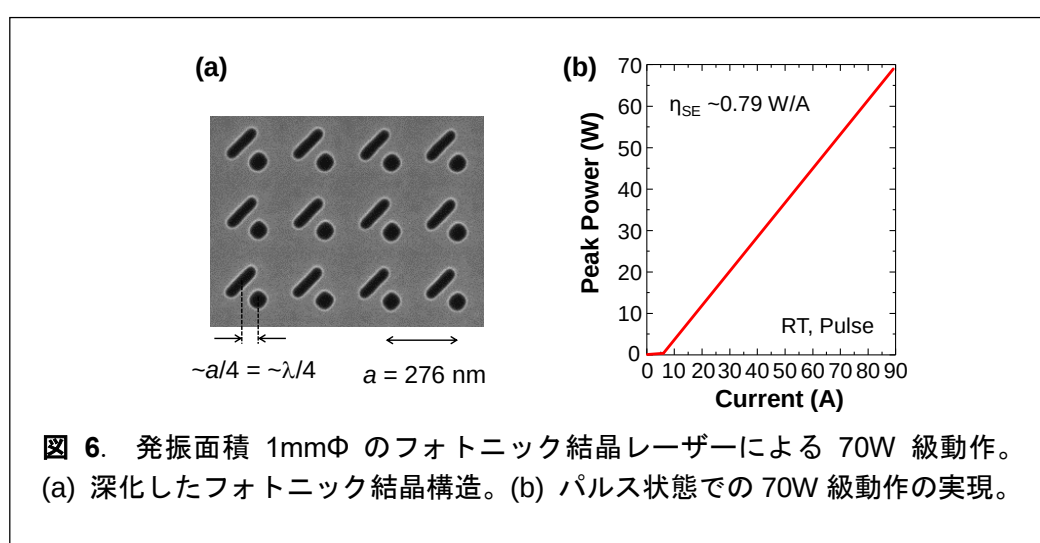


図 6. 発振面積 1mm Φ のフォトニック結晶レーザーによる 70W 級動作。
(a) 深化したフォトニック結晶構造。(b) パルス状態での 70W 級動作の実現。

3. 今後の予定、波及効果

今回、フォトニック結晶レーザーの大幅な性能向上とともに、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しました。今後、フォトニック結晶レーザーの優位性をさらに生かした実装や装置構成の工夫を行っていくことで、ますます、システムの小型化・簡略化、高性能化が進んでいくものと期待されます。また、今回、フォトニック結晶レーザーから出射されたビームは、機械式ミラーにより走査しましたが、今後、電氣的に 2 次元ビーム走査可能なフォトニック結晶レーザーをも開発し、より高性能化を推進していきます。

様々な調査機関の調べによると、LiDAR 等のセンシング分野は、今後、極めて大きな市場をもつことが予測されています。フォトニック結晶レーザーによりもたらされる、簡略化されたシステム、高い分解能、高い信号対雑音比等の特徴から、市場での大きな優位性が期待されます。さらに、今後、ビーム走査機能などを付加してスマート化していくことで、非機械式の LiDAR の開発も可能となり、より付加価値の高いセンシングシステムの構築へと繋がっていくことが期待できます。

また、このようなレーザーは、センシングのみならず、加工・製造（精密加工、金属加工等含む）、さらには医療・生命科学等の分野において、既存の大型の高輝度レーザー（ガスレーザーやファイバーレーザー）との置き換えを可能とし、小型・安価・低消費電力・高制御性の半導体レーザーがメインプレーヤーとして適用されていくようになると期待されます。これらは、超スマート社会（Society 5.0）を支える鍵となり、そのインパクトは極めて大きいと言えます。

なお、今回、LiDAR 搭載用に開発したフォトリソニック結晶レーザーは、京都大学光・電子理工学教育研究センター内に設置した光・量子拠点より、MTA（Material Transfer Agreement）を介して、世の中への提供が可能です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、以下の2つ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）：研究開発課題「フォトリソ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、フォトリソ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。）
- ・ JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「次世代フォトリソニクス」：研究課題「変調フォトリソニック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。2次元ビーム走査フォトリソニック結晶レーザーの開発と LiDAR 応用を推進することを目的とするもの。）

<用語解説>

注1) フォトリソニック結晶：光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ光材料で、様々な光制御が可能な光ナノ構造として注目されています。

注2) 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を用いました。

注3) ビーム品質：レーザービームの集束性、発散性の指標です。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 が小さいほど、ガウスビームに近く、 $M^2=1\sim2$ が理想的なビーム品質と言えます。通常の半導体レーザーでは、高出力化のため、ビーム出射領域を、数 $10\mu\text{m}\sim100\mu\text{m}$ 程度に増大すると、ビーム品質が著しく劣化し、 $M^2>\text{数 }10\sim100$ となります。

注 4) 輝度：単位面積、単位立体角あたりの光出力と定義され、ビーム拡がりをおいかに狭くできるか、あるいはレーザー光をおいかに強く集光できるかを示す指標となります。高輝度化を実現することは、高度なセンシングや将来の光加工への応用上、極めて重要です。上述したビーム品質と密接に関係します。

注 5) 単一モード動作：モードとは、半導体レーザーの動作の形態を表します。単一モード動作とは、発振状態が安定した 1 つの形態のみで動作する様を表します。半導体レーザーが単一モードで動作することにより、上記、注 4) で述べた理想的なガウスビームに近いビームが得られ、高ビーム品質動作が実現されます。

注 6) プレス発表「新たなフォトリ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ー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ー」
(http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2018/181218_1.html)

<研究者のコメント>

1999 年に、フォトリ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 級のフォトリック結晶レーザーの実用化を開始し、さらに、2018 年には、2 重格子フォトリ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。今回、この概念をさらに発展させ、フォトリック結晶レーザーの性能を飛躍的に向上させるとともに、LiDAR システムへの搭載に初めて成功しました。これはまさに、フォトリック結晶レーザーのもつ大面積でコヒーレント発振可能という特長（他の半導体レーザーでは実現が困難な特長）を明快に示した結果であると言え、超スマート社会 (Society 5.0) におけるスマートモビリティの発展に大きく貢献することが期待されます。今後、フォトリック結晶レーザーの一層の高輝度化とスマート化、さらには、その社会実装を目指し、研究を進めていきたいと思っています。

[発表情報]

様々な学会等で発表予定ですが、直近では、以下の国際学会で発表予定です。

学 会 名： OSA Advanced Photonics Congress (On-line).

日 時：(現地時間) 2020 年 7 月 16 日 10:30-11:00 (午前、米国東部)

(日本時間) 2020 年 7 月 16 日 23:30-24:00 (午後)

セッ ション名、Room 名：Lasers and Laser Materials, Virtual Room-E.

タイトル： “Tailored Photonic Crystals for Advanced Semiconductor Lasers (invited)”

発 表 者： Susumu Noda