



令和2年7月17日

京都大学

量子科学技術研究開発機構（QST）

科学技術振興機構（JST）

電氣的に2次元ビーム走査可能な新たな フォトニック結晶レーザーチップの開発に成功

概要

京都大学大学院工学研究科の野田進教授、坂田諒一同研究科大学院生、メーナカ デゾイサ講師、石崎賢司特定准教授、井上卓也助教等のグループは、高ピーク出力かつ高ビーム品質のレーザー光を、電氣的かつ2次的に走査可能な新たなフォトニック結晶レーザーチップの開発に世界で初めて成功しました。この成果は、スマートモビリティを筆頭に、高度物体認識、アダプティブ照明など様々な分野への応用にとって極めて重要な成果と言えます。

ロボットや自動車の自動走行にはLiDAR^{注1}と呼ばれる光センシング技術が必須とされます。LiDARでは、光ビームを走査して障害物を察知しますが、一般に、ビーム走査は、機械式、すなわち鏡を機械駆動することで行っており、システムサイズが大きくなることや、信頼性や安定性の面で課題を抱えています。そのような背景のもと、最近、非機械式のビーム走査方式の研究が活発化してきましたが、出射光の光出力が非常に低く、また波長可変型の大型のレーザー光源が別途必要である点など、多くの課題があります。

本研究グループは、今回、新たに、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チップの開発に世界で初めて成功しました。具体的には、フォトニック結晶の格子点をナノアンテナとみなし、その位置とサイズを同時に変調した新たなフォトニック結晶を考案するとともに、この結晶を内蔵したレーザーチップを開発することにより、高出力・高品質ビームを、電氣的に、2次的に自在に走査することに成功しました。この成果は、新しいLiDARシステムの構築にもつながり*、今後のスマートモビリティ、ひいては超スマート社会(Society 5.0)の進展にとって重要な成果と言えます。

本研究成果は、2020年7月17日(日本時間)、国際学術誌「Nature Communications」のオンライン版で公開されます。

なお、本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「次世代フォトニクス」研究領域および、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)のもとに行われました。

*本研究で実現した電氣的ビーム走査技術を用いた新しいLiDARシステム開発については、(株)ブルックマンテクノロジーと共同で行っています。

1. 背景

2次元レーザービーム走査技術は、ロボットや自動車の自動走行に代表されるスマートモビリティを筆頭として、高度物体認識やアダプティブ照明など様々な分野への応用にとって極めて重要です。レーザービームの走査は、通常、機械方式、すなわち、鏡を機械駆動して行いますが、システムサイズが大きくなること、信頼性や安定性、動作速度などに課題があります。そのような課題の下、最近、非機械方式のビーム走査技術の研究が、活発化しつつありますが、ビーム走査時のレーザー光出力が、ピーク値で、数 mW から精々10mW程度に限られている点、また、外部に波長可変型の大型レーザー光源が別途必要な点など、多くの課題を抱えています。従って、コンパクトで非機械式の、高出力・高ビーム品質な、2次元ビーム走査デバイスの実現が極めて重要です。

本研究グループは、そのような非機械式ビーム走査デバイスの実現のために、これまで、独自のフォトリック結晶レーザー^{注2)}技術をベースに研究を行ってきました。フォトリック結晶レーザーは、微小な空孔格子点が2次元的に並んだナノ構造体を内蔵した半導体レーザーで、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をもちます。通常は、フォトリック結晶レーザーは、面垂直方向に光を出射させるように設計しますが^{注3)}、本研究グループは、別途、ビーム走査のために、異なるフォトリック結晶を重ねるという手法^{注4)}や、あるいは、格子点位置に注目し、位置に変調を加えるという手法^{注5)}を、並行して、提案・開発してきました。しかしながら、これらの方法では、それぞれ、1次元方向のみしかビームが走査出来ないこと、また、2次元的にビーム走査が出来ても、出力が十分得られない等の課題を有していました。

2. 研究成果

上記のような背景のもと、本研究では、独自のナノアンテナ理論を構築することにより、任意の方向にビーム出射可能で、高出力・高ビーム品質動作が可能な新たなフォトリック結晶構造を考案しました。図1(a)は、今回考案した、格子点の位置に加え、サイズにまで変調を加えた、「複合」変調フォトリック結晶の概念図を示しています。図1(b)に示すように、複合変調の際には、ビームを出射させたい方向の情報（回折ベクトル \mathbf{k} ）を載せ、これによって、光ビームを自由空間における任意の方向 $[(\theta, \phi)$ および $(\theta, \phi+180^\circ)]$ に出射させることを可能とします。

構築したナノアンテナ理論においては、フォトリック結晶内部の電界分布に対し、微小な空孔格子点を、光を放射するナノアンテナと見なします。この理論を用いて、それぞれのナノアンテナから光がどのように放射され、フォトリック結晶全体からどのような光出力が得られるかを検討しました。まず、位置やサイズを変化させない通常のフォトリック結晶の場合を考えます。図2(a)は、フォトリック結晶の共振状態（= M点共振状態^{注6)}）の電界分布と格子点、すなわちナノアンテナから放射される電界ベクトルを示しています。このフォトリック結晶には4つの共振可能な状態（モードA,B,C,D）が存在しますが、モードA・

Bでは各格子点(ナノアンテナ)からの放射電界ベクトルが、正味、ゼロとなります。また、モードC・Dでは隣どうしのナノアンテナにおける放射電界ベクトルが互いに打ち消し合うようになります。従って、いずれのモードの場合もフォトニック結晶全体から光放射は生じません。続いて、本研究で考案した複合変調フォトニック結晶の場合を検討した結果が、図2(b)に示されています。このとき、モードA・Bではナノアンテナの重心位置が変化することにより、放射電界ベクトルがゼロでなくなるとともに、隣り合うナノアンテナどうしが強め合いの干渉を生じるようになります。またモードC・Dでも、ナノアンテナの大きさを変調することで、隣どうしの放射電界ベクトルの打ち消し合いが無くなります。こうして、全てのモードA-Dで適切な光放射が生じるようになります。レーザー発振は、最も損失の少ない、すなわち、光放射が最も小さいモードで起こることから、位置とサイズを同時に変調することで、狙ったモードにおいて適切な放射強度(光出力)で安定に動作すること、すなわち、高出力・高ビーム品質動作が得られることが判明しました。ちなみに、以前に行っていた位置のみの変調では、モードC、Dにおけるナノアンテナ部の放射電界が打ち消し合い、光放射が殆どない状態で動作したため、光出力が極めて低かったことも判明しました。

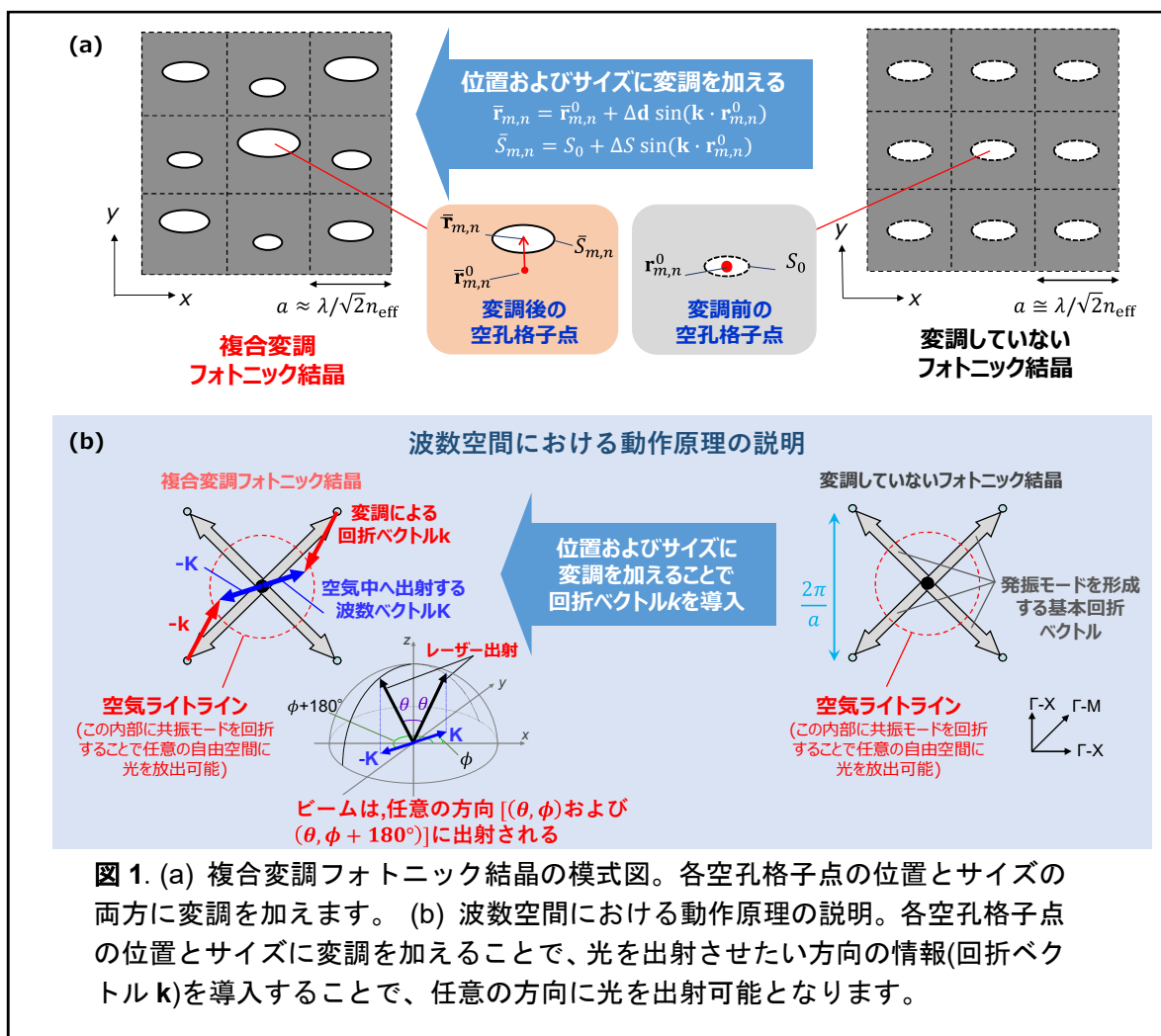
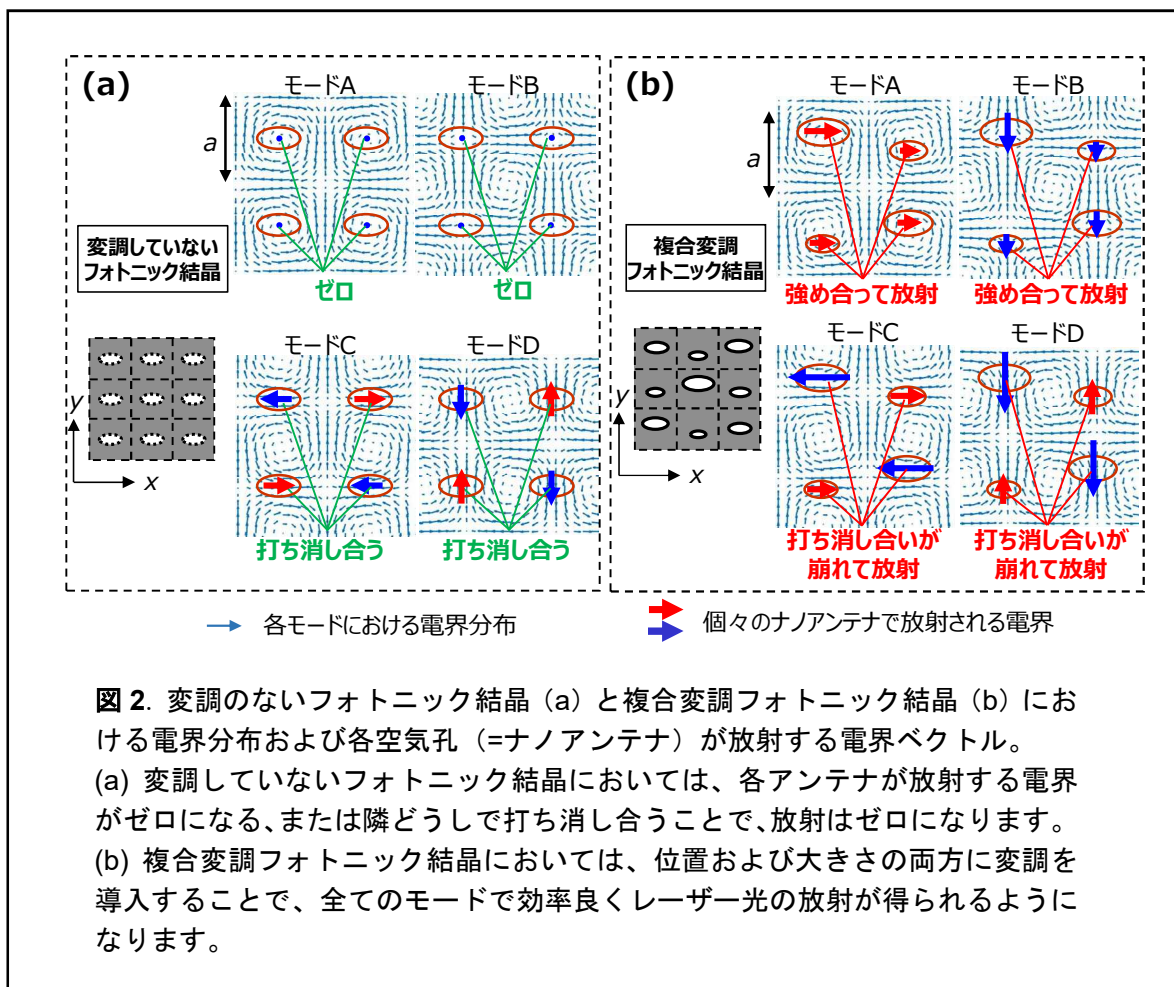


図 1. (a) 複合変調フォトニック結晶の模式図。各空孔格子点の位置とサイズの両方に変調を加えます。(b) 波数空間における動作原理の説明。各空孔格子点の位置とサイズに変調を加えることで、光を出射させたい方向の情報(回折ベクトル \mathbf{k})を導入することで、任意の方向に光を出射可能となります。



複合変調フォトニック結晶の効果を実証するために、様々な角度へ出射可能なように設計した 100 個の複合変調フォトニック結晶レーザーを集積したオンチップの 2 次元マトリックスアレイデバイスを作製しました。図 3 にデバイス裏面のアレイ電極構造および内蔵したフォトニック結晶の一例を示しますが、各レーザー領域は $150\ \mu\text{m}$ 角 (電流注入領域は直径 $100\ \mu\text{m}$)、で、 10×10 のマトリックス構造が、約 3mm の大きさに配置されています。溝状の構造と、絶縁層をうまく組み合わせるによって、全ての電極を裏面に集中させ、出射ビームを阻害しないように工夫しています。さらに、より深い溝状の構造で各レーザー囲うことで、各レーザー領域を電氣的に独立させ、電圧を印加した p および n ラインの交点にあるレーザーのみを駆動することができます。

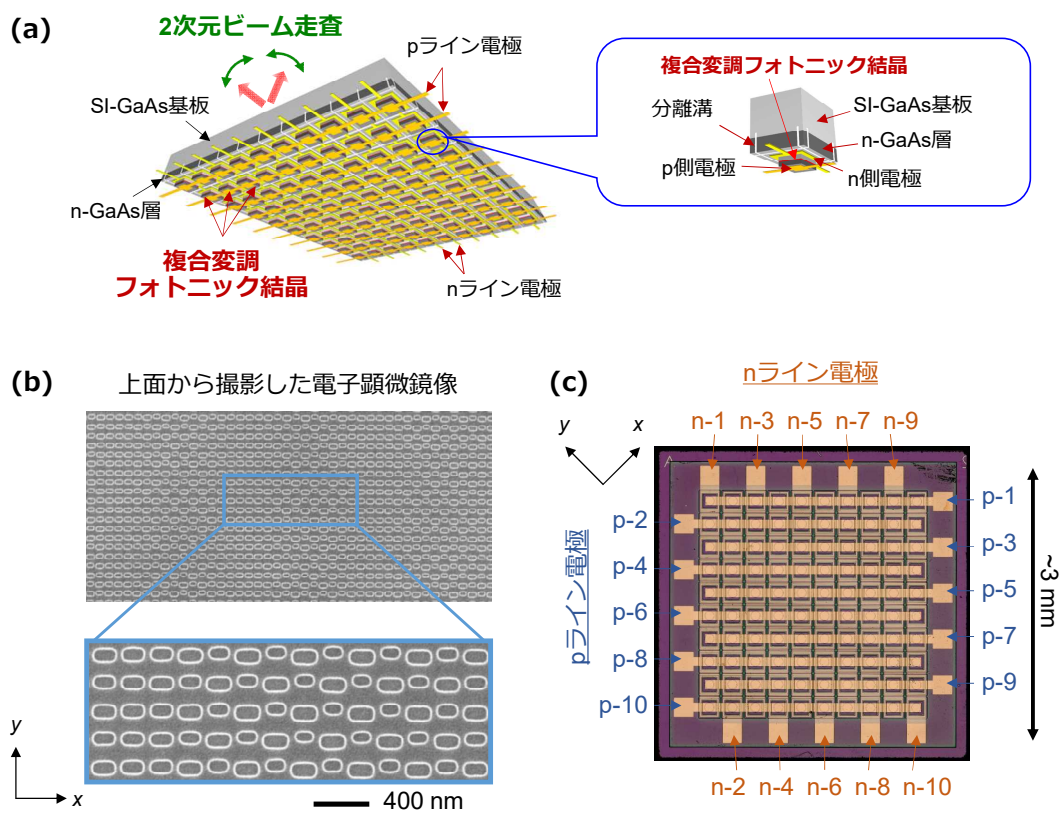


図 3. (a) 複合変調フォトニック結晶を内蔵した、レーザーアレイデバイスの模式図。10×10 のマトリクス状に様々な方向へ出射する、高出力レーザー(直径 100 μ m)が集積されています。(b) アレイデバイスに内蔵されている複合変調フォトニック結晶構造を上面から電子線顕微鏡で撮影した写真。(c) 今回作製した、複合変調フォトニック結晶レーザーアレイの裏面における電極構造の写真。

作製したデバイスに対して、まず、各レーザーの特性の評価を行いました。代表的なレーザーの電流-光出力特性と、遠視野像を図 4 (a)に示します。電流-光出力特性より、0.4W/Aのスロープ効率(電流に対する光出力の傾き)が得られ、ワット級の高いピーク出力が得られました。(極最近、5W 級の光出力も得られることも確認しています。) 遠視野像も、図 4(b)に示すように狙った 2 方向に対し、綺麗な単峰で、半値全幅で 0.7 度程度の非常に狭いビーム拡がり角が得られています。これより、本レーザーは、高い光出力まで安定に動作し、かつレンズ無しで動作可能なことが分かります。さらに、100 個のレーザーの均一性を評価するために、全てのレーザーのスロープ効率を測定・解析したところ、平均で 0.42W/A、標準偏差で 0.04W/A と均一かつ高い水準のスロープ効率が得られました。今後、裏面に反射鏡を導入するなどによって、0.8W/A 以上のさらなる効率の向上も期待されます。

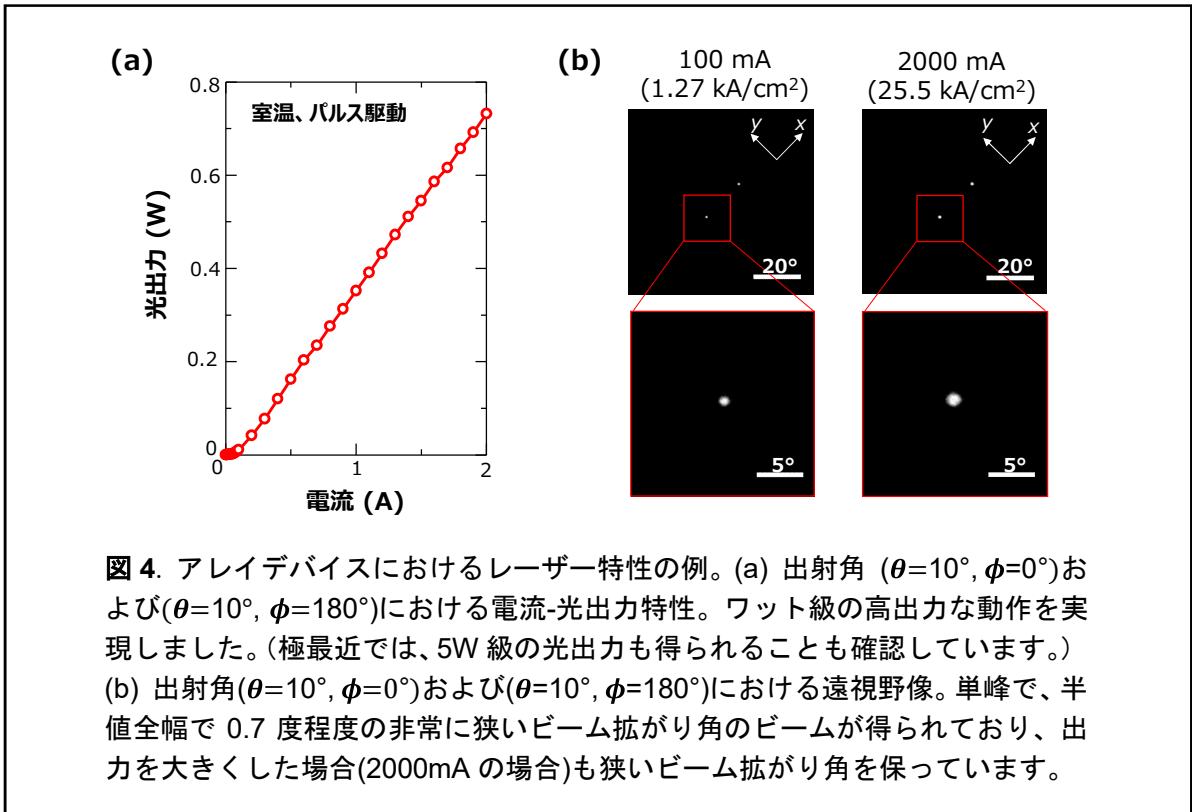
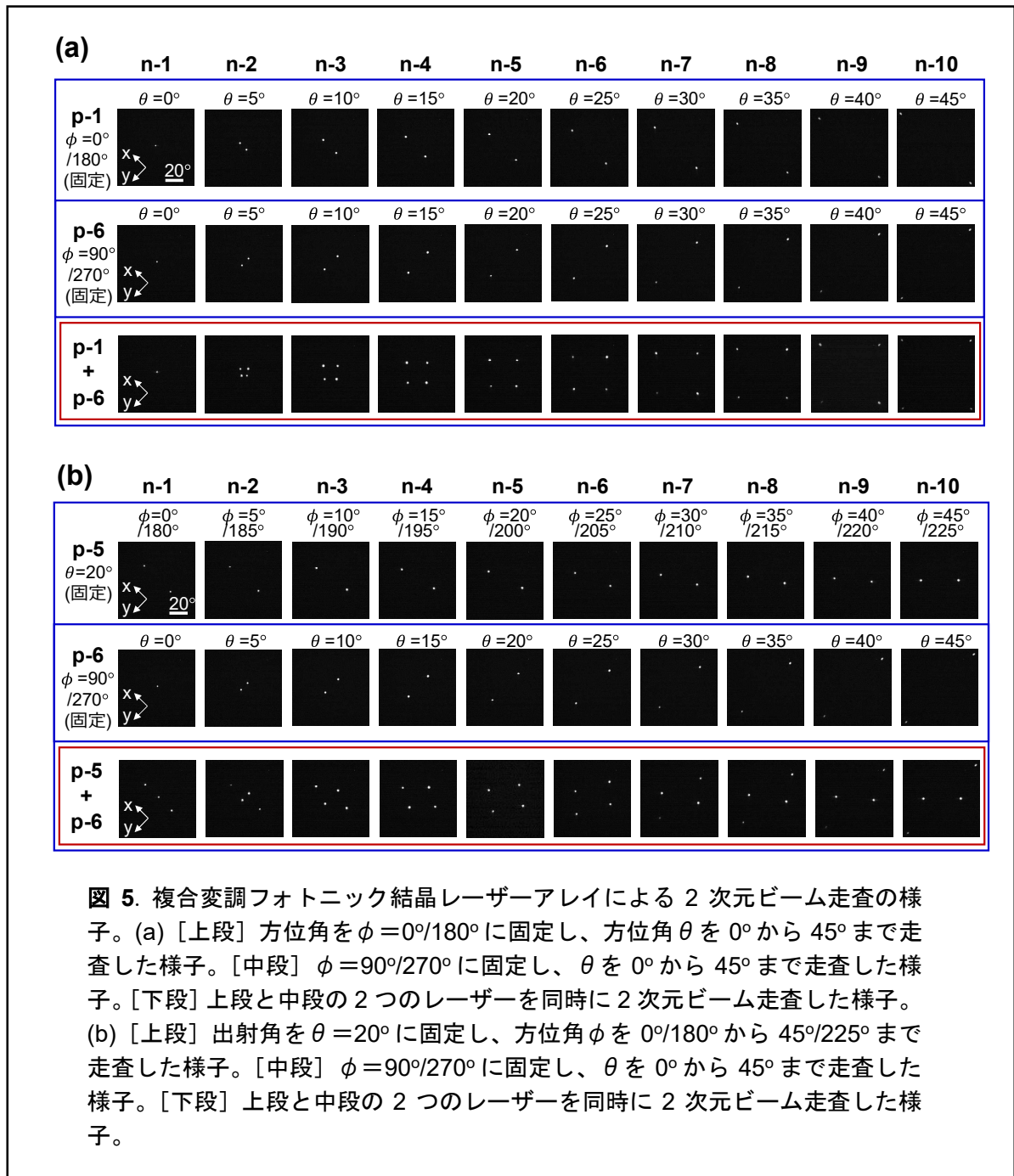


図 4. アレイデバイスにおけるレーザー特性の例。(a) 出射角 ($\theta=10^\circ, \phi=0^\circ$) および ($\theta=10^\circ, \phi=180^\circ$) における電流-光出力特性。ワット級の高出力な動作を実現しました。(極最近では、5W 級の光出力も得られることも確認しています。)
 (b) 出射角 ($\theta=10^\circ, \phi=0^\circ$) および ($\theta=10^\circ, \phi=180^\circ$) における遠視野像。単峰で、半値全幅で 0.7 度程度の非常に狭いビーム拡がり角のビームが得られており、出力を大きくした場合(2000mA の場合)も狭いビーム拡がり角を保っています。

次に、上述のアレイデバイスを用いて、2次元ビーム走査の実証を行いました。アレイデバイスをマイクロコントローラーで制御することによって、100個のレーザーを好きな順序で、好きな速度で駆動することが出来、自在なビーム走査が可能となります。図5にビーム走査のスナップショットの一例を示します。同図(a) [上段および中段] のように一対のビームを、出射角 θ を 0° から 45° まで放射状に走査したり (ここに上段では、 $\phi=0/180^\circ$ に固定、中段では、 $\phi=90/270^\circ$ に固定)、また、同図(b) [上段] のように出射角 θ を固定 ($\theta=20^\circ$) して、方位角 ϕ を 0° から 45° (および 180° から 225°) まで円周上に走査することが出来ます。さらに、同図(a)および(b)の [下段] に示すように、それぞれの図の上段と中段の2つのレーザーを同時に駆動することも可能で、この場合、興味深いことに、4つのビームが同時に出射されます。ここに示したのは、ほんの一例で、任意の順番・タイミングでビームが走査できるので、自在なビーム走査が実現出来ます。このようなオンチップで、オンデマンドな高出力・高ビーム品質のレーザービーム走査は、従来のビーム走査方式では決して実現できないもので、後述するように、新たなセンシング方式など、様々な分野への応用が期待されます。



3. 今後の予定、波及効果

今回、複合変調フォトニック結晶という新たなフォトニック結晶構造を考案し、本フォトニック結晶を用いることで、高出力・高ビーム品質のレーザービームを 2 次元走査可能なオンチップデバイスの実現に世界で初めて成功しました。この成果は、極最近プレス発表

を行った機械式 LiDAR システム^{注7)}の小型化、高性能化につながるものと考えられ、今後のスマートモビリティにとって極めて重要な技術になっていくものと期待されます。なお、今回は、10×10のマトリックスアレイ構造で、解像点を100点としましたが、今後、デバイスサイズをわずか4倍にするだけで、解像点を900倍以上、すなわち、90,000点以上にすること^{注8)}も可能であると考えています。

また、さらに、本レーザーの特徴を活かした新たな LiDAR システム構築にも繋がっていくものと考えられます^{注9)}。例えば、現在、LiDAR システムとして、ビーム走査型の他に、フラッシュ型と呼ばれる全面一括光照射型の LiDAR システムが存在しますが、このフラッシュ型 LiDAR においては、周囲全面に光を一括して照射する故に、各点における光照射強度が十分に高くできないという本質的な課題があります。そのためこのシステムは、反射率の高い物体と反射率の低い物体が同時に視野に入った場合、反射率の低い物体から十分な反射信号が得られず、正確な距離計測ができなくなるという課題を抱えています。このフラッシュ型の LiDAR に、本研究で開発した複合変調フォトニック結晶レーザーチップを組み合わせれば、反射率の低い物体を見つけた瞬間に、その物体を狙って、本デバイスで、拡がり角の狭いビームを照射することで、反射率の低い物体に対しても測距が可能となり、新たな LiDAR システムの構築が期待されます。この用途においては、本デバイスに要求される解像点は、今回、実証した100点程度で十分な役割を果たすようになります。(極最近、(株)ブルックマンテクノロジーとの共同開発により、その初期実証にも成功しました。)

以上のように本技術は、スマートモビリティの発展に大きく寄与するとともに、他にも高度物体認識やアダプティブ照明など様々な分野の応用にもつながるものと考えられます。すなわち、来るべきスマート社会 Society 5.0 を支えるキー技術となりう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、以下の2つのプロジェクトのもとに推進されました。

- ・ JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「次世代フォトニクス」：研究課題「変調フォト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。LiDAR 応用に向けて、フォト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と学術基盤の構築を主たる目的としています。今回、新方式の基本コンセプトを生み出しました。)
- ・ 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。フォトニック結晶レーザーの高出力化、ビーム走査技術などの各種技術を統合して、社会実装可能なシステムとして、Society 5.0 実現化を目指す各種企業へ提供すること等を目的としています。本成果に関わる新方式に関しても、す

に複数企業との連携を開始しています。)

<用語解説>

- 注 1) 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一つです。近年、ロボットの自動走行や、自動車の自動運転、顔認証や物体の認識に不可欠な技術の一つとして、注目を集めています。
- 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—」参照。(http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2018/181218_1.html)
- 注 4) プレス発表**「ビーム出射方向を自在に制御可能な半導体レーザーの開発に成功」参照。(http://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news_data/h/h1/news6/2010/100503_1.htm)
- 注 5) 位置のみに変調を加える手法** : 我々は、この手法により形成されるフォトニック結晶を、「変調」フォトニック結晶と呼んでいます。今回の成果は、格子点の位置のみならず、サイズまでも変調したもので、これまでの変調フォトニック結晶と区別する意味で、「複合変調」フォトニック結晶と名付けています。
- 注 6) M点共振状態** : 通常のタイプのフォトニック結晶レーザーでは「 Γ 点共振状態」を用いるためビームは垂直に出射します。一方、(複合)変調フォトニック結晶においては、そのままではビームを出射しないM点共振状態を利用します。図1(b)に示すように、図中45°方向の4つの基本波からなるM点共振状態(そのままでは出射しない)は、変調の回折効果によってライトラインの内部へ回折され、任意の2次元方向へビームを出射させることができます。
- 注 7) 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—」参照。(2020年6月30日、京都大学、QST、JSTより共同プレス)
(http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2020/200716_1.html)
- 注 8)** この90,000点を超える高解像点なデバイスの構想の詳細については、出版論文のサプリメンタリー・インフォメーション(サプリメンタリーノート7)に詳しく述べています。
- 注 9)** この新しいLiDARシステムの詳細に関しては出版論文のサプリメンタリー・インフォメーション(サプリメンタリーノート8)に詳しく述べています。

＜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、さらに、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）の実現に成功しました。さらに、極最近、この概念をさらに発展させ、フォトニ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成功しました。これらにおいては、レーザー光は、フォトニック結晶面に対して垂直方向に出射し、ビーム走査を行う際には、機械式で行っていましたが、今回、非機械式、すなわち電氣的に広範囲に2次元ビーム走査出来る技術までも開発することに成功することが出来ました。これはまさに、フォトニック結晶レーザーのもつ高輝度性に加え、高機能性（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ます、超スマート社会（Society 5.0）の発展に大きく貢献することが期待されます。今後、フォトニ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。

[論文情報]

タイトル：“Dually modulated photonic crystals enabling high-power high-beam-quality two-dimensional beam scanning lasers”

著者：Ryoichi Sakata[†], Kenji Ishizaki[†], Menaka De Zoysa[†], Shin Fukuhara, Takuya Inoue, Yoshinori Tanaka, Kintaro Iwata, Ranko Hatsuda, Masahiro Yoshida, John Gjelleta, and Susumu Noda*（[†] These authors contributed equally to this work. *Corresponding Author.）

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

掲載誌：Nature Communications

DOI：10.1038/s41467-020-17092-w

[お問い合わせ先]

＜研究に関すること＞

野田 進（ノダ ススム）

京都大学 大学院工学研究科 教授

Tel：075-383-2315

E-mail：snoda[at]kuee.kyoto-u.ac.jp

< J S T 事業に関すること >

嶋林 ゆう子 (シマバヤシ ユウコ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

Tel : 03-3512-3531 Fax : 03-3222-2066

E-mail : crest[at]jst.go.jp

< S I P 事業 (光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術) に関すること >

岡村 康行 (オカムラ ヤスユキ)

量子科学技術研究開発機構 イノベーションセンター SIP 推進室

Tel : 03-6683-9069 Fax : 03-6683-9438

E-mail : sip-info[at]qst.go.jp

< 報道担当 >

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[at]mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

量子科学技術研究開発機構 イノベーションセンター SIP 推進室

Tel : 03-6683-9069 Fax : 03-6683-9438

E-mail : sip-info[at]qst.go.jp