

新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする
次世代フォトリソグラフィの基盤技術
2017年度採択研究代表者

2019年度 実績報告書

野田 進

京都大学大学院工学研究科
教授

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

§ 1. 研究成果の概要

近年、自動運転、セキュリティセンシング、ロボットの自動走行などへの関心が、世界的に高まり、LiDAR (Light Detection and Ranging) と呼ばれる、レーザーパルスを用いた障害物や不審物(者)のセンシング技術の開発が急務となっている。中でもキーデバイスとして開発が望まれているのが、ビーム出射方向を2次元かつ広範囲に走査可能な小型半導体レーザー光源である。本研究は、研究代表者独自のフォトニック結晶レーザーに、同じく研究代表者が、極最近、発明した「変調フォトニック結晶」という新たな概念を導入し、電氣的に高速かつ広範囲に2次元ビーム走査を可能とするチップを開発し、レーザービーム走査技術の新たな方向性を生み出すことを目指すものである。

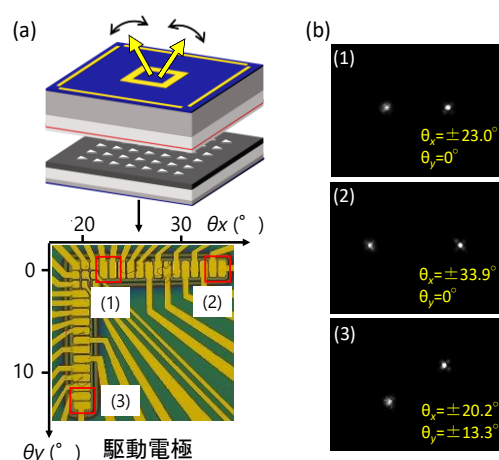


図 1-1: 変調フォトニック結晶レーザーの初期実証結果。(a) 作製したレーザーの模式図と電極形状、(b) 得られたビームの出射パターン。

本 CREST 研究開始直前の段階において、図 1-1 に示すように、変調フォトニック結晶による2次元ビーム走査の原理実証に成功していた。ただし、初期実証デバイスにはいくつかの重要な課題が存在していた。その1つは、光出力が mW レベルに留まり、かつ出力を上げるために面積を拡大した際に、モードが乱れ、不安定となることである。各種 LiDAR 応用へと展開するためには、数 W 以上の高出力かつ安定動作が望まれるため、変調フォトニック結晶の本質的・体系的理解を深め、高出力・高安定動作を可能とする変調フォトニック結晶構造を探索する必要がある。また、初期実証デバイスの角度走査は L 字状に限られ、2次元面内のより広範囲の走査を実現することが不可欠であり、望む角度ステップで、必要個数、マトリクス状にアレイ化したデバイスへと発展させていくことが重要である。そこで、以下の4項目について研究を進め、さらに、社会実装に向けた検討をも進めていくことを目指している。

- I. 変調フォトニック結晶の本質的・体系的理解と安定な高出力動作の実現 —理論—
- II. 変調フォトニック結晶の本質的・体系的理解と安定な高出力動作の実現 —実験—
- III. アレイ化2次元ビーム走査デバイスの作製
- IV. アレイ化2次元ビーム走査デバイスの特性評価

第2年次となる前年度(2018年度)の研究では、まず、上記課題の1つである、これまでL字状のビーム走査しか達成していなかったことに対して、2次元全面に渡る走査のためのマトリクス化の第一次検討を行った。図 1-1 の L 字走査の実証と同様の、安定動作に向けた検討前の変調フォトニック結晶構造を用いて、電極を、基板を挟んで直交して配置し、マトリクス駆動を可能とする構造を考案し、5mm 角サイズのチップで約 25°範囲の2次元ビーム走査を実証した。さらに、変調フォトニック結晶の本質的・体系的理解に関して、発振時のモード(あるいはビームパターン)の乱れを抑制し、安定動作を得るための検討を行った。発振の安定性を定量的に解析し、より深く議論す

るために、狙いとする発振バンド端である M 点のモードのみならず、モードの乱れを生じさせる発振点であるフラットバンドモードも解析可能な、有限系結合波方程式を新たに構築した。本手法により、楕円空孔を用いることで、所望のバンド端発振と、意図しないフラットバンド発振との閾値利得差 $\Delta\alpha$ が 5.1cm^{-1} という十分な大きさにまで増大することを明らかにするなど、安定な発振のための重要な知見を得ることができた。さらに、実験的にも、高出力動作を実現していくのに適した作製法である、MOVPE 法を用いた空孔埋め込み再成長法を用いたレーザー作製の検討を本格化させ、埋め込み再成長法による楕円空孔変調フォトニック結晶レーザーを試作し、設計方向へのレーザー出射を実証することに成功した。

第3年次となる本年度(2019年度)の研究では、まず、前年度に引き続いて、変調フォトニック結晶の本質的・体系的理解を深めた。特に、研究開始段階において課題であった、光出力が mW レベルと低いという課題に対して検討を行った。この結果、初期の変調方式である空孔の位置のみに変調を与える方式においては、狙った方向への放射係数が小さく、光出力の増大が阻害されていることを見出すととも

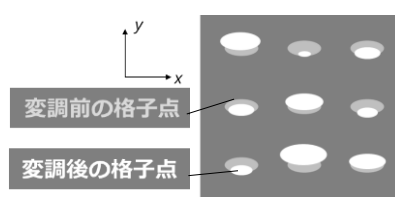


図 1-2: 孔の位置と大きさを同時に変調した「複合変調」の概念図。

に、空孔の位置とサイズの両方に変調を与えた「複合変調」(図 1-2)が、高出力かつ高ビーム品質の理想的なビーム走査レーザーを実現するための鍵となることを見出した。また、変調方式が特性に与える効果を見通し良く解析するための、新たなナノアンテナ理論をも構築した。以上を通じて、昨年度までに見出してきた安定動作のための楕円格子点の導入も含めて、変調フォトニック結晶の本質的・体系的理解を深め、安定・高出力動作が可能な変調フォトニック結晶レーザー、すなわち、複合変調フォトニック結晶レーザーのコンセプトを確立することに成功した。さらに、高出力・高ビーム品質動作を実現するために、「複合変調」フォトニック結晶構造を、MOVPE 法を用いた空孔埋め込み再成長法により導入し、図 1-3 に示すように、ワット級の高出力を得るとともに、高ビーム品質の動作を実証することに成功した。

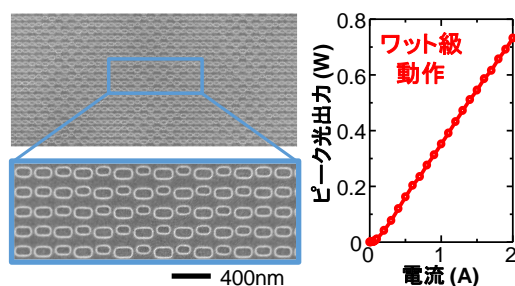


図 1-3: 複合変調フォトニック結晶レーザーの作製とワット級動作の実現。

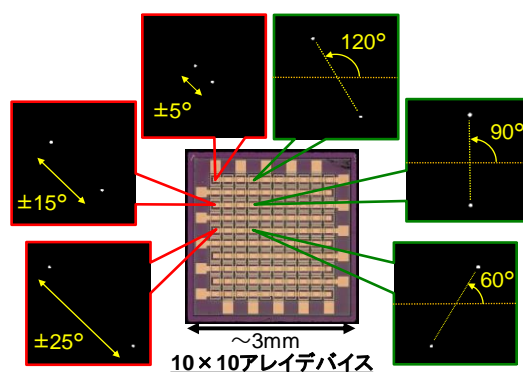


図 1-4: 複合変調フォトニック結晶レーザーの 10×10 アレイデバイスの作製と電気的 2 次元ビーム走査の実現。

以上に加えて、上記の複合変調フォトニック結晶を用いた 2 次元全面に渡るビーム走査の実現に向けて、2 次元マトリクスアレイ構造の開発を行った。本開発では、新たに、ビーム出射面を電極等で遮ることのない、裏面に電極を集約

したアレイ構造の形成法をも構築し、図 1-4 に示すように、当初計画をおよそ 1 年前倒して、10×10 アレイでワット級・高ビーム品質の広範囲 2 次元ビーム走査を実現することに成功した。また、併せて、社会実証へ向けた検討をも進めた。

【代表的な原著論文】

1. Yoshinori Tanaka, Atsuki Nishigo, Kyoko Kitamura, John Gellela, and Susumu Noda, "Modulated photonic-crystal surface-emitting laser with elliptical lattice points for two-dimensional coupling enhancement," AIP Advances, Vol. 9, Issue 11, 115204 (2019).
2. Kyoko Kitamura, Tsuyoshi Okino, Daiki Yasuda, and Susumu Noda, "Polarization control by modulated photonic-crystal lasers," Optics Letters, Vol. 44, Issue 19, 4718 (2019).
3. Kenji Ishizaki, Menaka De Zoysa, and Susumu Noda, "Progress in photonic-crystal surface-emitting lasers," Photonics, Vol. 6, Issue 3, 96 (2019).

§ 2. 研究実施体制

(1) 研究代表者グループ

- ① 研究代表者:野田 進 (京都大学大学院工学研究科 教授)
- ② 研究項目

本総合研究推進グループにより、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実現に向けた、理論検討および試料作製・評価を含めた本プロジェクト全体を遂行する。