

京都大学	博士 (工学)	氏名	坂 田 諒 一
論文題目	複合変調フォトニック結晶レーザーによる高出力・高ビーム品質 2次元ビーム走査に関する研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、空孔の位置と大きさを変調した「複合変調フォトニック結晶」を新たに考案し、この結晶を内蔵するレーザーアレイチップを開発することによって、オンチップで、高出力・高ビーム品質で自在な2次元ビーム走査を実証した成果をまとめたものである。</p> <p>2次元レーザービーム走査技術は、自動車やロボットの自動走行の実現に必須なLiDAR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において極めて重要である。しかしながら、従来のビーム走査は、その多くが機械駆動方式であり、信頼性や安定性、動作速度、システムサイズなどに課題がある。このような背景の下、非機械方式のビーム走査技術の研究が活発化しつつあるが、光出力が数十mW程度に限られている点、外部に波長可変型の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る。近年、これらの課題を一挙に解決し得る手法として、変調フォトニック結晶レーザーが注目を集めている。変調フォトニック結晶レーザーとは、2次元フォトニック結晶のバンド端共振作用を利用した、大面積コヒーレント動作が可能な面発光型半導体レーザーであるフォトニック結晶レーザーにおいて、格子点へと変調を導入することで任意の方向へとビームが出射可能な半導体レーザーである。本論文では、フォトニック結晶における空孔をナノアンテナとみなすナノアンテナ理論を独自に構築することで、任意の設計角度へと高出力・高ビーム品質なレーザー光が出射可能な、空孔の位置と大きさを変調した「複合変調フォトニック結晶」を提案し、設計角度への、高出力(W級)および回折限界に近い単峰な高ビーム品質(&lt;1度)ビーム出射を実証した。さらに、様々な角度へ出射する、100個の複合変調フォトニック結晶レーザーを集積したアレイ構造を作製し、非機械式でオンチップな、高出力・高ビーム品質2次元ビーム走査を実現した。また、本デバイスの応用の一例として、本レーザーと従来のフラッシュ型LiDARシステムを組み合わせることで、従来のフラッシュ型LiDARにおける課題を克服した、新たなLiDARシステムの提案および原理実証をも行うと共に、任意の角度範囲を一括照射可能な新たな複合変調フォトニック結晶アレイチップの実証にも成功した。以下、各章の内容を要約する。</p> <p>第1章は序論である。まず研究背景として、従来の機械駆動式のビーム走査方式および非機械式であるオプティカルフェーズドアレイによるビーム走査方式の課題について述べている。次に、任意の方向へと出射可能な変調フォトニック結晶とそのビーム走査に関するこれまでの研究の現状および課題について述べている。</p> <p>第2章では、変調フォトニック結晶の動作原理と解析手法について説明している。変調フォトニック結晶においては各格子点を変調することで、外部への放射モードを持たない正方格子M点の共振状態へ、任意の方向へと出射するための回折ベクトルを導入している。また、変調フォトニック結晶レーザーの解析手法である3次元結合波理論についても説明し、特に変調フォトニック結晶の動作点であるM点およびその近傍の点に対して定式化を行っている。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	坂 田 諒 一
<p>第3章では、複合変調フォトニック結晶の提案について述べている。まず従来の位置変調フォトニック結晶における問題点の原因を、ナノアンテナ理論を用いることで解明すると共に、空孔の位置と大きさを同時に変調した複合変調フォトニック結晶において、高出力・高ビーム品質な動作が期待できることを示している。さらに、3次元結合波理論を用いて、複合変調フォトニック結晶レーザーの様々なパラメータを変化させた場合の特性について、詳細な議論も行っている。</p> <p>第4章では、第3章で提案した複合変調フォトニック結晶を、埋め込み再成長法によって形成し、本レーザーを100個内蔵したアレイチップの作製について述べている。本チップデバイスによって、アレイチップを形成する各エレメントレーザーにおいて、設計角度への、高出力 (&gt;0.7W) かつ回折限界に近い単峰な高品質 (&lt;1°) な動作を実証し、アレイチップをマイクロコンピュータで駆動制御することで、広い角度範囲において、非機械式かつオンチップな2次元ビーム走査を実現したことについて述べている。本デバイスは、任意のタイミング・順番での駆動、また複数方向への同時2次元ビーム走査も可能であるという特徴をも有している。</p> <p>第5章では、前章において開発に成功した、複合変調フォトニック結晶レーザーアレイ (解像点数100点) を、従来のフラッシュ型LiDARへと導入することで、反射率の低い物体の測距が困難であるという課題を克服しうる、新たなLiDARシステムの提案を行っている。また、提案したLiDARを作製し、その原理実証にも成功したことについても述べている。さらに、今回開発したLiDARシステムも含め、フラッシュ光源が要求される場面のために、複合変調フォトニック結晶において出射方向を面内で制御することによって、単一チップで任意のFOV (Field of View) でフラッシュ照射可能な新たな複合変調フォトニック結晶レーザーの提案および実証についても報告している。</p> <p>第6章は結論であり、本研究で得られた結果をまとめるとともに、今後の展開について述べている。特に、裏面に反射構造 (DBR 構造) を導入することによるスロープ効率の増大や、面積の増加を4倍程度に抑えながら解像点数を900倍程度増大させるデバイスの構想についても述べている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

フォトニック結晶レーザーは、2次元フォトニック結晶のバンド端共振作用を利用した、大面積コヒーレント動作が可能な面発光型半導体レーザーである。本レーザーは、フォトニック結晶の格子点の位置を変調することで、面垂直方向のみならず、任意の2次元方向へビームを出射することが可能である。本論文の主たる成果として、この変調フォトニック結晶レーザーにおいて、格子点の位置と大きさを同時に変調した「複合変調フォトニック結晶レーザー」を新たに考案し、本レーザーをマトリックス状にアレイ化することによって、高出力・高ビーム品質な非機械式2次元ビーム走査を実現した。本論文で得られた成果は次のとおりである。

1. フォトニック結晶の各空孔をナノアンテナとみなすナノアンテナ理論を独自に構築し、変調フォトニック結晶において、格子点の位置のみならず、格子点の大きさをも同時に変調することが、高出力かつ高品質なビームを出射するために重要であることを見出した。また、3次元結合波理論を用いて複合変調フォトニック結晶の特性に関して詳細な解析を行い、その特性を明らかにした。
2. 複合変調フォトニック結晶をマトリックス状にアレイ化したチップの開発を行った。複合変調フォトニック結晶の効果によって、設計角度への、高出力(>0.7W)かつ回折限界に近い単峰な高品質(<1°)な動作を実証した。アレイチップをマイクロコンピュータで駆動制御することで、広い角度範囲において、非機械式かつオンチップな2次元ビーム走査を実現した。
3. 上記の2次元ビーム走査チップの特徴を活かし、従来のフラッシュ型LiDARにおける課題、すなわち、反射率の低い黒い物体の測距が極めて困難であるという課題を克服し、新たなLiDARシステムの提案・実証を行った。また、複合変調フォトニック結晶面内において出射角度を徐々に変化させる設計によって、単一チップで任意のFOV(Field of View)でフラッシュ照射可能な新たな複合変調フォトニック結晶レーザーの実証にも成功した。

以上のように、本論文で実現された複合変調フォトニック結晶レーザーアレイは、機械機構や外部光学系が不要で超小型な、高出力・高ビーム品質な2次元ビーム走査を実現するものであり、今後のスマートモビリティを筆頭に高度物体認識やアダプティブ照明等、多岐の分野の進展に繋がる重要な成果であるといえる。このように、本論文は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年2月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。