

京都大学	博士 (工学)	氏名	和 泉 孝 紀
論文題目	フォトニック結晶レーザーの発振状態の動的制御に関する研究		
(論文内容の要旨) 本論文は、発振状態制御機構を導入したフォトニック結晶レーザーを開発し、機械学習や最適化法と組み合わせることで、熱・電気・光の複雑な相互作用が絡む連続波(CW)動作において、発振状態の動的制御を実証した成果をまとめたものである。 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することで、大面積コヒーレント動作が可能な半導体レーザーである。これまでに、フォトニック結晶レーザーについて様々な検討がなされ、動作時のデバイス状態を見越したデバイス設計や、デバイス作製・実装技術などにより、高出力かつ高ビーム品質動作やビーム出射方向制御、短パルス動作などの優れた動作を実証してきた。そのため、本レーザーは、光センシング(LiDAR)やレーザー加工、自由空間通信、宇宙応用などの幅広い分野への応用と、それによる各分野の発展が期待されている。今後、このようなフォトニック結晶レーザーへ発振状態制御機構を導入することができれば、例えば CW動作時の電気・熱・光の相互作用やデバイス作製時のゆらぎ等による影響の補正が可能となり、さらなる大面積デバイスでのコヒーレント動作ひいては超高輝度動作の実現に繋がることと期待される。また、同時にレーザー動作の物理の解明やデバイス設計へのフィードバックに繋がることが期待される。 本論文では、特に熱の影響も加わった CW 動作において、フォトニック結晶レーザーの発振状態の動的制御の実現およびその有効性を実験的に検証した結果が述べられている。具体的には、まず発振状態制御機構として分割電極構造および分割ヒーター構造を導入したデバイスの設計や作製・実装手法などについて検討されている。また機械学習や最適化法を活用し、同デバイスにおいて電流分布や温度分布などを適切に調整することで、予めデバイスがもつ温度勾配や歪み、動作時の環境外乱による発振状態への影響がある場合にも、ガウスビーム出射などのより理想的な発振状態を実現できることを実験的に示している。以上のフォトニック結晶レーザーの発振状態制御は、例えば大面積化に向けた設計技術などと組み合わせることで、大面積デバイスでのコヒーレント動作の実現へ結びつくなど、半導体レーザーのさらなる発展に繋がる成果である。以下に各章の要約を記載する。 第 1 章は序論である。まず研究背景として、従来の半導体レーザーの課題を挙げ、それを解決する新たな半導体レーザーとしてフォトニック結晶レーザーが紹介されている。また、これまでのフォトニック結晶レーザーに関する研究を概観した後、今後の高性能化のために、フォトニック結晶レーザーにおける発振状態の動的制御の実現が有効であることが述べられている。 第 2 章では、まず、典型的なフォトニック結晶レーザーの原理(デバイス構造、動作原理、解析手法、大面積化のための設計指針)について説明されている。その後、発振状態制御機構として分割電極構造を導入したフォトニック結晶レーザー、分割電極フォトニック結晶レーザーのコンセプトについて述べ、電流注入分布を様々に変化させた際の発振状態について数値解析を用いて検討されている。			

京都大学	博士（工学）	氏名	和 泉 孝 紀
第 3 章では、CW 駆動可能な分割電極フォトニック結晶レーザーを開発し、発振状態制御について実験的な検討がなされている。まず、動作時の発熱の影響を十分に低減しつつ、各電極への注入電流を個別に制御可能な分割電極フォトニック結晶レーザーの設計・作製・実装方法について議論されている。また、同デバイスを駆動するための駆動回路や測定系を構築した後、作製したデバイスを特性評価することで、CW 動作においてレーザー発振を確認するとともに、電流分布をランダムに変化させることで発振状態を反映したビーム形状が複雑に変化する様子を実証した結果が示されている。 第 4 章では、機械学習や最適化法(共分散行列適応進化戦略: CMA-ES)を活用した発振状態制御手法を提案し、前章で作製した分割電極フォトニック結晶レーザーの CW 動作において発振状態の制御手法についての実験的な検討がなされている。それらの実証実験を通じて、デバイスに予め温度の偏りがある場合にも、実験的に得られたビーム形状や人工的に生成したガウスビームを目標としたとき、目標ビーム形状と高い一致度のビーム形状が得られることが示されている。また、特に最適化法を活用した発振状態制御手法を用いた実験から、環境外乱などによる発振状態への影響が生じた場合にも、それを補正し、外乱発生前の発振状態に近いレーザー動作へと戻せることが示されている。さらに、以上の機械学習および最適化法を活用した発振状態制御についての実験に対する考察を踏まえつつ、CW 動作において理想的な発振状態を実現するための駆動条件についても数値解析を用いた議論がなされている。この議論により、特に狭発散角の FFP の実現には、デバイス動作時の共振領域内のバンド端周波数差(～屈折率差)を低減しつつ、よりガウス分布に近い放射光強度分布をもつことが重要であることが示され、そのために電流分布とは独立に屈折率分布の制御が可能なデバイスの実現が重要であることが述べられている。 第 5 章では、前章で言及のあった、電流分布とは独立に屈折率分布の制御が可能なデバイスとして、分割電極・分割ヒーターを導入したフォトニック結晶レーザーが提案されている。このデバイスでは、新たに導入した分割ヒーターによる温度分布の調整により、半導体材料の屈折率の温度依存性に由来し、屈折率分布の調整が可能であり、数値解析および分割ヒーターを導入した試作デバイスの実験結果から、ヒーターの駆動条件により発振状態を反映したビーム形状が変化することが示されている。そして、提案デバイスを試作し、発振状態制御に関する実験を行うことで、電流・温度分布を調整することで、電流分布のみを調整した場合と比べ、より理想的な発振状態が得られたことが述べられている。 第 6 章では、本論文において得られた成果を要約するとともに、今後の展望について述べられている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、特に熱・電気・光の複雑な相互作用が絡む連続波(CW)動作において、フォトニック結晶レーザーの発振状態の動的制御を実証した結果をまとめたものである。得られた主な成果は以下の通りである。

1. フォトニック結晶レーザーの CW 動作における発振状態の動的制御の実現のため、動作時の発熱の影響を十分に低減しつつ、分割電極構造を導入したデバイス、分割電極フォトニック結晶レーザーを開発した。これにより、CW 動作において各電極からの注入電流を調整し、電流注入分布を変化させることで、熱・電気・光のマルチフィジックスの相互作用を反映した複雑なビーム形状の変化を実験的に示した。
2. 分割電極フォトニック結晶レーザーの CW 動作において面内電流注入分布を適切に調整することで、予め温度分布に偏りがある場合にも、理想的なガウスビームなどの所望の発振状態が生成可能であることを実験的に示した。また、環境外乱により発振状態が変化した場合にも、動作条件の調整により外乱発生前に近い発振状態へと補正できることを実証した。これらの動作条件の調整方法として、CW 動作時の複雑な発振状態とデバイスの駆動条件を相関づける畳み込みニューラルネットワークや、リアルタイムの発振状態をもとに目標の発振状態を実現するための電流分布を探索する最適化法を活用した発振状態制御手法を提案した。
3. 分割電極フォトニック結晶レーザーの発振状態制御に関する実験により得られた考察などから、電流分布とは独立に共振領域内の屈折率分布を操作する制御自由度の導入が重要であることを見出した。そして、半導体材料の屈折率の温度依存性に着目し、新たに温度分布制御機構を導入したフォトニック結晶レーザーを提案した。また、その初期実証として分割電極・分割ヒーターを導入したフォトニック結晶レーザーを試作し、電流・温度分布の操作による発振状態制御を試み、より高ビーム品質なレーザー動作が得られることを実験的に示した。

以上のように、本論文で実現されたフォトニック結晶レーザーの発振状態の動的制御は、作製ゆらぎや環境外乱などによる発振状態への影響を補正しつつ、より高ビーム品質など優れたレーザー動作をオンチップで可能とするものである。本結果を今後大面積化に向けた設計技術などと組み合わせることで、超大面積デバイスにおけるコヒーレント動作の実現へと結びつき、広範な分野への応用とその発展に寄与することが期待される。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6年5月17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基本的に確認し、合格と認めた。ただし、論文内容の充実のために精査を加えた。

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。