

京都大学	博士（工学）	氏名	吉田昌宏
論文題目	高出力・高ビーム品質二重格子フォトニック結晶レーザに関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、二重格子フォトニック結晶という新たな共振器構造を考案し、大面積単一モード発振可能なフォトニック結晶レーザを開発することにより、従来の半導体レーザでは困難であった、高出力・高ビーム品質動作を実証した成果をまとめたものであって、6章から構成される。</p> <p>半導体レーザは、小型・安価・高効率・高制御性といった優れた特徴を有する一方で、出力増大のために発振面積を拡大すると、多モード発振となりビーム品質が劣化するため、高出力・高ビーム品質動作（すなわち、高輝度動作）の実現が、原理的に困難であるという課題を抱えていた。このため、従来の半導体レーザの輝度は、気体レーザや固体/ファイバレーザなどの輝度 $1 \text{ GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ に比べて、一桁程度低い値に留まっており、次世代のスマート製造やスマートモビリティにおいて重要となる、高度なレーザ加工や様々な光センシング（light detection and ranging: LiDAR 等）への応用が阻害されていた。本論文では、フォトニック結晶のバンド端共振効果を利用したフォトニック結晶レーザに着目し、従来では困難であった大面積単一モード発振を可能とする、新たなフォトニック結晶共振器構造を導入したレーザデバイスを開発することで、従来の限界を超える高輝度動作を実現した結果が述べられている。具体的には、2つのフォトニック結晶格子を重ね合わせた「二重格子フォトニック結晶」を考案し、これによりフォトニック結晶における光波の回折効果を適切に制御することで、従来構造と比較して、10倍以上の発振面積をもつ大面積レーザデバイスを開発している。そして、10 W 超級の高出力・高ビーム品質動作を実証し、半導体レーザとして世界最高レベルの輝度 ($300\sim 650 \text{ MWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) を達成している。さらに、その重要な応用の一例として、開発したレーザデバイスを用いたレンズフリーの LiDAR システムを構築し、その動作実証にも成功している。以上のように、本論文で実現された二重格子フォトニック結晶レーザは、従来の半導体レーザの高出力・高ビーム品質化における課題を克服するものであり、半導体レーザの応用分野を大きく拡張する飛躍的進展であると言える。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、従来の半導体レーザである、端面出射型レーザや垂直共振型面発光レーザについて、高出力・高ビーム品質動作における課題を概観したうえで、2次元フォトニック結晶のバンド端共振効果を利用した、大面積コヒーレント発振が可能なフォトニック結晶レーザを高出力・高ビーム品質化することによって、この課題の解決が期待できることが述べられている。</p> <p>第2章では、まず、フォトニック結晶レーザについて、動作原理、作製手法、および解析手法など、その基礎が述べられている。そのうえで、これまでにワット級の光出力を達成しているフォトニック結晶レーザ（発振面積 $200 \mu\text{m}^2$ 角）について分析を行い、高出力・高ビーム品質化に向けた課題が述べられている。具体的には、従来構造である単一格子フォトニック結晶では、フォトニック結晶における面内 180 度方向の1次元的な回折効果が大きく、面内光閉じ込め効果が強いために、さらなる出力増大に必要となる発振面積の拡大を試みた際に、基本モードのみならず、高次の共振モードも共振器内に強く閉じ込められることで多モード発振が誘起され、ビーム品質の劣化を招いてしまうことが示されている。そして、この課題を解決するためには、光波の回折効果を制御し、光閉じ込めを適切に弱めることを可能とする新たなフォトニック結晶共振器が必要であり、これが</p>			

フォトニック結晶レーザの高出力・高ビーム品質化のための鍵となることが示されている。

第3章では、前章で得られた指針に基づき、従来のフォトニック結晶構造の課題を解決し、基本モード発振を維持しつつ、大面積化を可能にする新たなフォトニック結晶構造として、二重格子フォトニック結晶が提案されている。本構造は、同一周期をもつ2つのフォトニック結晶格子を x 、 y 方向に $1/4$ 波長ずらして重ね合わせたものであり、それぞれの格子点において、 180 度方向に回折される光波の光路長差が $1/2$ 波長となることで打ち消し合い（消失性干渉）が生じ、面内フィードバック効果（光閉じ込め効果）を適切に弱めることが可能となる。具体的な格子点設計を行ったのち、本構造を導入したフォトニック結晶レーザを、MOVPE 法による空孔埋め込み再成長法により作製し、直径 $300\ \mu\text{m}$ の大面積での単一モード発振と、回折限界に近い高ビーム品質動作を実証することで、二重格子構造がフォトニック結晶レーザの高出力・高ビーム品質化に適していることが示されている。

第4章では、二重格子フォトニック結晶について、さらに設計の検討を行うとともに、二段階のドライエッチングを用いた新たな作製プロセスを開発することにより、直径 $500\ \mu\text{m}$ まで拡大可能な構造を実現している。これにより、まず室温パルス駆動において、ビーム品質 $M^2 \leq 2$ の高ビーム品質動作を維持しながら、従来を一桁上回る $10\ \text{W}$ 級の高出力を得ることに成功しており、これは輝度にして $300\ \text{MWcm}^2\text{sr}^{-1}$ に相当する。さらに、二重格子フォトニック結晶レーザの連続波 (CW) 動作についても述べられている。ここでは、CW 動作時に特に課題となるデバイスの発熱による温度上昇に対して、裏面反射構造を導入し出力効率向上を図ることによる発熱の低減や、放熱のためのデバイス実装技術の確立に関する検討などが行われている。その結果、フォトニック結晶レーザの CW 出力として、これまでで最高値となる $\sim 7\ \text{W}$ に迫る高出力動作を達成している。

第5章では、直径 $1\ \text{mm}$ を超える発振面積をもつ超大面積フォトニック結晶レーザに関する検討について述べられている。まず、そのような大面積化を可能とするために、前章までに述べられた 180 度方向の回折における消失性干渉だけでなく、 90 度方向の回折効果との相互作用についても着目した格子点設計が述べられている。格子点の構造パラメータの調整による回折効果の制御により、 180 度および 90 度回折効果の大きさを揃えて逆位相とすることで、直径数 mm の大面積においても単一基本モード発振が可能な設計が示されている。またこのとき、フォトニックバンド構造の観点からも議論が行われ、 Γ 点バンド端においてモードの縮退が生じ、Dirac cone に近い線形な分散関係が形成されるという興味深い現象が生じることが見出されている。設計に続いて、直径 $1\ \text{mm}$ の大面積フォトニック結晶レーザを作製することで、単一モード発振を実現するとともに、パルス駆動において、 $70\ \text{W}$ の高出力・高ビーム品質動作に成功し、輝度として最大の $\sim 650\ \text{MWcm}^2\text{sr}^{-1}$ を達成している。このような大面積フォトニック結晶レーザは、 ~ 0.1 度（半値全幅）という極めて狭い拡がり角をもつビームを、半導体レーザから直接出射可能であるという独自の特徴を有しており、外部レンズ系を必要としないレンズフリーでの応用を可能とし、レーザ加工およびセンシングシステムなどの大幅な小型化・簡素化が期待できる。ここでは、その重要な応用の一例として、距離センシング (LiDAR) への適用を試み、開発したフォトニック結晶レーザを実際に用いたレンズフリーの LiDAR システムを構築し、その動作実証を行っている。その結果、レーザから $30\ \text{m}$ 以上先の遠方に設置した検出物の形状および、検出物までの距離の計測に成功した結果が示されている。

第6章では、本論文において得られた成果が要約されるとともに、今後の展望について述べられている。