

京都大学	博士（工学）	氏名	勝 野 峻 平
論文題目	大面積（3mmΦ）高輝度フォトニック結晶レーザーに関する研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、直径 3mm（3mmΦ）の大面積共振領域を有するフォトニック結晶レーザーの高出力・高ビーム品質動作、すなわち高輝度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。 将来のスマート社会を支えるスマート製造においては、精密加工を可能とし、デジタル制御にも適したレーザー加工（光加工）技術が重要となる。現在、光加工用光源として、主に炭酸ガスレーザーやファイバーレーザーが用いられているが、これらは高輝度（1GWcm⁻²sr⁻¹）である一方で、大型で複雑、高コストかつ効率も低いという課題を抱えている。これらに対して、半導体レーザーは、小型・低コスト・高効率という特長を有する。しかし、従来の半導体レーザーは、出力増大に伴い多モード発振が生じ、ビーム品質が劣化するため、原理的に高輝度動作が困難（0.1GWcm⁻²sr⁻¹ 程度以下）であり、直接的な光加工への応用が阻害されてきた。本論文では、これらの課題を解決するため、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、3mmΦ の大面積共振領域における高ビーム品質動作を実現することによる、高輝度動作（輝度 1GWcm⁻²sr⁻¹）を実現した結果が述べられている。具体的には、フォトニック結晶における面内外の光波結合を適切に制御することで不要な高次のモードの放射損失を選択的に増大させ、その発振を抑制するという新たな設計指針に基づき、3mmΦ という大面積においても単一基本モード発振を可能にする二重格子フォトニック結晶構造を設計している。さらに、熱の影響を受ける連続動作（CW 動作）においても、この精密に制御された光波結合状態を維持するための温度補償構造を考案している。これらに基づき開発した 3mmΦ フォトニック結晶レーザーによって、単一モード CW50W 級動作の実現に成功し、半導体レーザーにおいて既存の大型レーザーに匹敵する輝度 1GWcm⁻²sr⁻¹ を達成している。また、フォトニック結晶レーザーの電力変換効率の向上を目指した検討も行い、その重要な要素技術となる、トンネル層を介して接合した複数の活性層（複数接合活性層）の導入を提案している。そして、2 接合活性層を導入したデバイスの開発に成功し、高スロープ効率動作を実証している。以上のように、本論文で実現された大面積高輝度フォトニック結晶レーザーは、今後のスマート製造における光加工をはじめとして、多岐にわたる分野の発展に寄与する重要な成果であるといえ、学術上のみならず産業応用上の意義も極めて大きいものである。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、既存の高輝度レーザーや半導体レーザーがそれぞれ抱える課題について述べられている。そのうえで、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半導体レーザーであるフォトニック結晶レーザーを、高ビーム品質を保ったまま大面積・高出力化することにより、これらの既存のレーザーの課題を解決可能であることが述べられている。			

京都大学	博士（工学）	氏名	勝 野 峻 平
第 2 章では、まず、フォトニック結晶レーザーの動作原理、解析手法について述べられている。続いて、$3\text{mm}\Phi$ の大面積共振領域における基本単一モード発振を可能とするための結合係数制御について述べられている。具体的には、エネルギーが保存された面内の 2 次元的な光波結合を表すエルミート結合係数及びエネルギー損失を伴う放射波を介した 180° 回折による面内結合を表す非エルミート結合係数の両方を低減することで、光結合を総合的に弱めて $3\text{mm}\Phi$ の大面積共振領域に光を拡げ、不要な高次モードの放射損失のみを増大させることができ、単一基本モード発振が可能となることが述べられている。また、エルミート結合係数は二重格子構造の空孔形状によって、非エルミート結合係数は裏面反射鏡を含むデバイス層構造によって制御可能であることが述べられている。 第 3 章では、フォトニック結晶の CW 発振特性を解析するために、新たにキャリア・熱・光の相互作用を考慮した自己無撞着解析手法を構築している。そして、本手法による発振特性解析により、フォトニック結晶レーザーの CW 動作において、デバイス内部で生じる熱によるデバイスの温度上昇及び面内不均一な温度分布によって、ビーム形状が乱れ、単一モード発振を維持できなくなることが示されている。これを解決するための手法として、あらかじめ格子定数分布としてフォトニック結晶に導入する温度補償構造が考案されている。そして、具体的な温度補償構造の設計を行い、その温度補償構造と第 2 章で設計した二重格子構造を導入した $3\text{mm}\Phi$ デバイスの CW 発振特性解析により、単一基本モード CW 動作が期待できることが示されている。 第 4 章では、まず、$3\text{mm}\Phi$ という大面積共振領域全体で利得が得られるように、適切な電流注入を実現するための電極の設計が示されている。続いて、第 2 章及び第 3 章の結果に基づき $3\text{mm}\Phi$ フォトニック結晶レーザーの作製について述べられている。そして、CW 動作において、0.05° の非常に狭いビーム発散角を保ちながら 50W を超える高出力を得ることに成功し、その結果として既存の大型レーザーに匹敵する輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を達成している。さらに、この高輝度 CW 動作の応用の一例として、高輝度フォトニック結晶レーザー単一素子を光源として用いた、小型かつシンプルな構成の光加工システムによる、ステンレス板の加工の実証について述べられている。 第 5 章では、高輝度フォトニック結晶レーザーの電力変換効率の向上に向けた検討が行われている。まず、第 4 章で開発・評価したデバイスについて、電力変換効率や消費電力の分析がなされている。その後、電力変換効率の向上を目指すうえで重要な要素技術となる、トンネル層を介して接合した複数の活性層（複数接合活性層）が提案されている。そして、2 接合活性層を導入したデバイスを開発することにより、従来のフォトニック結晶レーザーの 2 倍超の高スロープ効率による動作を実証している。さらに、共振器損失の内、光出力に寄与しない内部損失を低減しつつ、活性層の積層数を増大することにより、電力変換効率の実現が期待される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。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、フォトニック結晶における面内外の光波結合を適切に制御することにより単一基本モード発振を可能とし、さらに、熱の影響を受ける連続動作(CW動作)においても精密に制御された光波結合状態を維持するための温度補償構造を導入した直径3mm(3mmΦ)の大面积共振領域を有するフォトニック結晶レーザーを開発することで、従来の半導体レーザーでは困難であった、大型レーザーに匹敵する高輝度CW動作を実証した成果をまとめたものである。本論文に示されている主な成果は次のとおりである。

1. フォトニック結晶レーザーの、高輝度CW動作(輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)を実現するために、3mmΦの大面积共振領域における基本単一モード発振を可能とするためのフォトニック結晶(二重格子構造)の設計を行った。併せて、デバイスの発熱・温度上昇の影響を受ける動作状態であるCW動作においても、上述のフォトニック結晶の設計により精密に制御された光波結合を維持するための温度補償構造を考案した。そして、以上の2つの検討に基づいて開発した大面积(3mmΦ)フォトニック結晶レーザーにより、50Wの高出力かつ単一モード発振、 0.05° の狭ビーム発散角による動作に成功し、その結果として大型レーザーに匹敵する輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を達成した。
2. 上述のフォトニック結晶レーザーの高輝度CW動作の応用の一例として、高輝度フォトニック結晶レーザー単一素子を光源として用いた小型かつシンプルな構成の光加工システムを構築し、ステンレス板の加工の実証に成功した。
3. 高輝度フォトニック結晶レーザーの電力変換効率の向上を目指すうえで重要な要素技術となる、トンネル層を介して接合した複数の活性層(複数接合活性層)を提案した。そして、2接合活性層を導入したデバイスを開発することにより、従来のフォトニック結晶レーザーの2倍超の高スロープ効率動作の実証に成功した。また、複数接合活性層の導入と併せて内部損失を低減することによって、電力変換効率の向上が実現可能であることを示した。

以上のように、本論文で実現した、大型レーザーに匹敵する高輝度CW動作を可能としたフォトニック結晶レーザーは、将来的に既存の大型レーザーを用いた光加工システムの置き換えを可能にするものと期待される。さらに、多岐にわたる分野の発展に寄与す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7年1月31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。

要旨公開可能日： 令和 7年 6月 23日以降