

京都大学	博士（工学）	氏名	岩 橋 清 太
論文題目	フォトニック結晶レーザの共振特性に与える格子構造の包括的解析と機能性向上		
(論文内容の要旨)			
本論文は、次世代の半導体レーザとして期待されているフォトニック結晶レーザにおいて、その共振特性を決定する格子構造に着目し、その包括的解析と機能性の向上に向けた検討を行った結果をまとめたものであり、7章から構成される。フォトニック結晶とは、周期的屈折率分布をもつ光材料であり、本レーザでは、これを2次元的に作製したものをレーザ共振器として利用する。フォトニック結晶内では、固体結晶において周期ポテンシャルにより電子のエネルギーに対してバンド構造が形成されるのと同様の原理で、光子のエネルギーに対してフォトニックバンド構造を形成する。バンド構造中では、バンド端と呼ばれる光の群速度が零となる点が存在し、その点では、2次元的な定在波状態が面内全体にわたって形成されるため、フォトニック結晶を共振器とするレーザが実現できる。このように、フォトニック結晶レーザは、広い面積において2次元共振状態を形成することを特徴とするレーザであり、面上部に出力光を取り出すことで、原理的に、出射ビームの狭拡がり角や形状制御、高出力単一モード発振、出射方向制御など優れた機能を持つ。従来、こうした機能は、共振状態を形成する基本となる格子構造に、孔形状制御や結晶の複合など、付加的要素により実現されてきたが、格子構造そのものに対する共振特性の解析は行われていなかった。本研究では、共振原理の根幹である格子構造を包括的に理論・実験双方から解析し、共振特性を明らかにすると共に、その物理的解釈を与えている。さらに、一般化された格子構造による拡張された自由度を生かして、単一モード高出力化や、高次偏光ビームの生成、出射角制御などの機能性向上を実証している。 第1章は序論であり、研究背景として、従来型のレーザと比較したときのフォトニック結晶レーザの特徴と機能性を概観した上で、本研究の位置づけが議論されている。 第2章では、本論文の主題であるフォトニック結晶レーザの全体像と、その格子構造について示されている。まず、フォトニック結晶レーザについて、デバイス構造と作製手法、基礎的な動作原理について説明されている。次に、フォトニック結晶共振器の格子構造について理解するため、一般的な観点から、格子構造が従来用いられてきた正方格子や三角格子を含む、5種類に分類されることが示されている。各構造において、2次元の共振状態が形成可能かを調べた結果、面心長方格子と正方格子と三角格子の3種類の格子構造において実現されることが明らかになった。正方格子と三角格子は、面心長方格子の特殊な場合と考えられるので、面心長方格子の格子角度θを変化させ、系統的に調べることで、従来の正方格子と三角格子も含め、2次元共振モードの包括的な理解が可能であることが示された。			

第3章では、対称性に起因する本レーザの共振特性の性質を明らかにしている。群論を応用することで、共振モードの数や対称性、各共振モード間の直交性などが導かれる。本論文で基本なる面心長方格子の共振モードは、互いに直交関係にある4つの非縮退モードで構成され、各モードの対称性が示されている。一方、正方格子と三角格子では対称性が異なり、縮退モードを含む状態が形成されるが、各格子の間の関係を調べることで、縮退モードの起源やその物理的な解釈が明らかにされている。また、これらの対称性解析は、モード選択性（第4章）やビーム形状（第5章）、出射方向の制御（第6章）などの機能向上に向けた設計においても、重要な知見を与えている。

第4章では、基本次の Γ 点モードに着目し、面心長方格子を基本として、格子構造の変化に伴う様々な共振特性の振る舞いが系統的に解析されている。理論では、バンド構造や電磁界分布、放射モードについて解析が行われた。実験では、バンド構造やビームパターン、偏光状態、閾値利得などを評価し、面心長方格子において、単一モード2次元発振が初めて実証された。こうした解析の結果、従来の正方格子、三角格子における特性の理解や、格子構造の自由度が拡張されたことによる新たな特性が示された。さらに、この基本 Γ 点モードを利用して、高出力単一モード発振の検討が行われた。その結果、世界最高の出力2Wの単一モード高出力動作が実現された。

第5章では、高次の Γ 点モードに着目し、次数の異なる Γ 点間での相互作用と、それに起因する新たな共振特性について、詳細な解析がされている。高次の Γ 点を包括的に調査すると、基本次の Γ 点モードでは、モード数は4つであるのに対し、8つ或いは12となる特異な状態が存在することが示された。こうした条件では、一般点では実現できない複雑な対称性のモードが存在し、それを反映するビーム形状や偏光が得られることが明らかになった。実験では、所望の高次の Γ 点モードにおける単一モード発振に成功し、モード形状の対称性を反映した様々な偏光を有するビームが観測された。これらのビームは、ベクトルビームの観点からも解析され、高次の偏光を有する、非常に特徴的なビームであることが明らかになった。

第6章では、非 Γ 点モードに着目し、格子構造の変化に伴う様々な共振特性の振る舞いが系統的に解析されている。理論では、非 Γ 点においても、バンド端と2次元の定在波状態が形成されることが示された。実験では、バンド構造と発振スペクトルを測定し、非 Γ 点で単一モード発振が確認された。また、非 Γ 点の特徴は、その波数に応じた方向への偏向ビーム出射であり、格子構造を様々な変化したデバイスを作製し、 10° から 45° までのビーム出射角制御に成功した。

第7章は結論であり、本論文において得られた成果をまとめるとともに、今後の展開について述べている。

氏 名	岩 橋 清 太
-----	---------

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、フォトニック結晶レーザの共振特性を決定する格子構造に着目し、その包括的解析と機能性の向上に向けた検討を行った結果をまとめたものであり、得られた主な成果は、次のとおりである。

1. 格子構造に対する共振特性の本質の理解のために、対称性の観点から解析が行われた。まず、一般的に2次元格子を分類し、面心長方格子と呼ばれる格子が、2次元の共振状態を形成できる格子であることを明らかにした。従来用いられてきた正方格子と三角格子は、面心長方格子に含まれると考えられるので、面心長方格子の格子角度を変化させ、包括的に調べることで、2次元共振モードの包括的な理解が可能であることが提案された。また、群論を導入した解析が行われ、面心長方格子の基本 Γ 点モードでは、互いに直交関係にある4つの非縮退なモードで構成されることや、正方格子と三角格子で現れる縮退モードの物理的解釈など、格子構造に対する共振モードの本質が明らかにされている。
2. 面心長方格子を基本として、格子構造の変化に伴う様々な共振特性の振る舞いが理論・実験双方から系統的に詳細な解析が行われている。理論面では、バンド構造や電磁界分布、放射モードなどが解析され、従来の特異的な条件（正方格子、三角格子）を含めた特性の理解と共に、格子構造を拡張したことによる新規な特性も示された。実験では、バンド構造やビームパターン、偏光状態、閾値利得などを評価され、面心長方格子の Γ 点や非 Γ 点において、良好な単一モード2次元発振が初めて観測されると共に、従来の格子では得られない様々な特性が示された。
3. 面心長方格子の導入により格子構造の設計自由度が格段に広がったことを利用し、機能性向上の検討が行われた。まず、基本 Γ 点モードを利用して、高出力単一モード化に向けた検討が行われ、フォトニック結晶レーザの中では世界最高の2Wの単一モード動作が実現された。また、高次 Γ 点モードの特殊な対称性を利用し、高次の偏光を有する特殊なビームパターンが観測された。さらに、非 Γ 点モードを利用し、格子構造を様々に変化させたデバイスを作製し、 10° から 45° までのビーム出射角制御に成功した。こうした様々な機能性の実証は、レーザ加工など既存のシステムの高性能化だけでなく、超小型レーザプロジェクタやカプセル型レーザメスなどの新規な応用分野への展開も期待される。

以上の成果は、フォトニック結晶レーザの共振モード形成の物理的な理解を与えると同時に、応用に向けた様々な機能性の向上に成功しているため、今後の半導体レーザの進展に大きく貢献するものと期待される。このように、本論文の成果は、学術上かつ実用上、価値ある内容を多く含んでおり、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、平成24年1月30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。