

京都大学	博士（工学）	氏名	瀧 川 信 一
論文題目	複素平面波展開法を用いたフォトニック結晶レーザの解析に関する研究		
（論文内容の要旨） フォトニック結晶は周期的な誘電率（屈折率）分布を有する光ナノ構造であり、光を自在に制御する技術として注目されている。とりわけ半導体レーザと二次元フォトニック結晶を組み合わせたフォトニック結晶レーザは、大面積コヒーレント動作が可能になり、発振波長／放射ビーム形状が制御された新光源として期待されている。従来、フォトニック結晶の設計や解析には実数の誘電率を用いて行われることが多かった。フォトニック結晶の本質的な特徴であるフォトニックバンド構造（共鳴周波数分散特性）はこの方法で明らかにすることができる。例えばパッシブな誘電体で構成されたフォトニック結晶の解析などはこれに相当する。しかし、フォトニック結晶レーザには、光に対する利得や損失が存在し、それらはフォトニック結晶内を伝搬する光が感受する複素誘電率に虚部を与える。特に電流注入による利得が大きい場合や、光吸収や自由キャリアによる損失が大きい場合、複素誘電率虚部が実部に比べて無視できなくなり、フォトニック結晶の特性を変化させてしまう。このためフォトニック結晶レーザの特性を解明するため、利得／損失を統一的に扱うことが重要である。本論文は、そのフォトニック結晶レーザの利得、損失の解析に関して新しい手法を考案し、最適な設計手法を論じたものであって、5章から構成される。 第1章は序論であり、研究背景として、フォトニック結晶および半導体レーザの概要および、これまで行われてきたフォトニック結晶の利得／損失の研究課題について議論されている。 第2章は本研究の核となる複素平面波展開法の定式化について論じている。まず、実際のレーザ構造を反映させるため、各層が有する複素誘電率を用いての伝搬モードを計算することにより、複素有効誘電率を導いている。この複素有効誘電率の周期的変化をフーリエ展開する一方、フォトニック結晶レーザ内を伝搬する光をフォトニック結晶の逆格子ベクトルを用いて平面波に展開し、これらをマックスウエル方程式に代入することで各フォトニックモードに対する固有値方程式を導く計算手順について詳細に言及している。この時、利得や損失によるフォトニック結晶レーザ中の伝搬光の成長または減衰を複素波数ベクトルの虚部として扱うが、この波数ベクトル虚部の方向を展開平面波と平行にすることにより、波数虚部の精度を向上させたことを特徴としている。前記の固有値方程式を解くことにより、各フォトニックモードに対して、フォトニックバンド構造に加え、新たな知見として利得／損失分散特性を導出しフォトニック結晶レーザの特性を表す指針となることを示している。さらに、一次元および二次元フォトニック結晶レーザの実験結果との特性比較を行ない、複素平面波展開法がフォトニック結晶レーザの解析のために有効な手段であることを実証している。 第3章では、複素平面波展開法をテラヘルツ帯フォトニック結晶レーザに展開して			

京都大学	博士（工学）	氏名	瀧 川 信 一
いる。テラヘルツ帯の光はセキュリティ、分光、医学に有用と期待されているが十分な性能を有する光源は存在していない。これは、テラヘルツ波が自由キャリア吸収、フォノン吸収を受けやすく、損失の影響が顕著に現れるためである。そこでこのテラヘルツ帯における二次元フォトニック結晶レーザのフォトニックバンド構造と利得／損失分散特性について論じ、高利得なテラヘルツ光源の設計指針を示している。特にフォトニック結晶レーザの共鳴周波数が第2対称Γ点にある場合、フォトニック結晶面からの面発光が得られるので、その放射特性を定式化し利得/損失分散特性に組み入れている。レーザモデルとしてテラヘルツ帯量子カスケードレーザが扱われており、フォトニック結晶の構造パラメータ（周期、アスペクト比）、利得空間分布、放射損失有無がレーザ性能に与える影響を議論し、最適化を行っている。その結果、フォトニック結晶面内で利得を一様に存在させモノポールモードで発振させることにより、低閾値／高効率面発光が得られることを示している。 第4章では、複素平面波展開法を緑波長帯フォトニック結晶レーザに展開し、利得に関し新しい知見を得ている。近年緑光光源として注目されている無極性／半極性窒化物半導体レーザには一軸性結晶であるため、利得が光伝搬方向によって異なる（非等方性利得）。これまでの平面波展開法では、非等方性利得を扱うことは困難であった。今回、屈折率楕円体の考えを複素平面波展開法と組み合わせることで、非等方性利得を扱うことに成功している。更に、伝搬光の利得／損失として複素周波数の考えを導入して非等方性利得を有する複度平面波展開法に対応している。具体的な解析は無極性面（m面）の緑帯正方格子フォトニック結晶 InGaAsN レーザで行っている。フォトニックバンド構造、利得／損失分散特性、および電磁界分布は、非等方性利得の高利得方向とフォトニック結晶 ΓX 方向が成す角に大きく依存することを明快にしている。特に、フォトニック結晶が有する対称性が非等方性利得によって変化することで、共鳴状態の変化が誘発されることを明らかにした。つまり、非等方性利得による一次元共鳴化は、二次元フォトニック結晶レーザの特徴であるコヒーレント大面積発光を阻害することを示した。その対策として、フォトニック結晶の格子点形状の最適化（円形からΓM方向に長軸がある楕円形状、長軸/短軸比 1.5～2 倍）により非等方性利得によって生じる対称性の変化を補完し、二次元共鳴の維持が可能であることを明確にしている。 第5章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめるとともに、今後の展望について述べている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、次世代半導体レーザ光源として期待される二次元フォトリック結晶レーザの解析において、利得／損失を統一的に扱う実用的デバイス設計法の確立を目標に研究した成果についてまとめたものである。従来の誘電率実部しか扱わない解析方法と異なり、複素誘電率を用いて平面波展開することで、世界に先駆けてフォトリック結晶レーザの利得／損失特性を示すことに成功している。この成果は、フォトリック結晶レーザ設計の指針を示すものであり、フォトリック結晶レーザの産業応用の拡大に繋がるものとして評価できる。本研究において、得られた主な成果は次のようにまとめられる。

1. フォトリック結晶レーザの利得／損失の解析手段として、複素平面波展開法を確立した。波数ベクトル虚部の扱いを詳細に検討し、フォトリックバンド構造だけでなく利得／損失分散特性を示すことにより、各フォトリックモードの特性が明確になり、より高い精度で設計・解析が可能になった。
2. 放射損失の定式化が平面波展開に対して行われ、デバイス構造に対する指針が明確になった。とりわけ、フォトリック結晶構造を最適化することにより高利得(低閾値)と高放射が両立できることを示したことは意義深い。
3. 利得の方向依存性(非等方性利得)に対するフォトリック結晶レーザの定式化およびその特性を明らかにした。今後、可視レーザ光源に向けて無極性／半極性窒化物の活用が高まるが、本解析手法はデバイス設計の上で不可欠になると予想される。
4. 上記3において非等方性利得の弊害(一次元共鳴の発生)を示し、その具体的対策として楕円格子点が有効であることを示した。比較的容易な方法で二次元共鳴を維持させることができ、実用性が高い。
5. 計算対象としたデバイスの波長帯が緑～赤外～テラヘルツ帯と広い範囲に渡っており、また実験との比較もなされ、よい一致を得ている。これは各波長帯において、複素平面波展開法の有用性を示している。

以上の成果は、様々な波長帯、材料で動作するフォトリック結晶レーザの設計における新たな指針を与えると同時に、誘電率虚部がフォトリック結晶に与える特性変化は興味深いものといえる。このように、本論文の成果は価値ある内容を多く含んでおり、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、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なった結果、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。