

氏 名	さか い きょう すけ 酒 井 恭 輔
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2732 号
学位授与の日付	平 成 19 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 電 子 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	2 次元フォトニック結晶レーザの結合波理論の構築

論文調査委員	(主 査) 教 授 野 田 進	教 授 北 野 正 雄	教 授 藤 田 静 雄
--------	--------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、2次元フォトニック結晶レーザの理論解析法の構築に関する成果をまとめたものであり、6章からなる。フォトニック結晶は、周期的な屈折率分布をもつ光ナノ構造であり、従来の材料では得られない新規な分散関係、すなわちフォトニックバンド構造をもつことを特徴とする。このバンド構造の端部（バンド端）は、様々な方向へ伝搬する光波の結合により、定在波状態を与える点であり、この点を利用することで、大面積での単一モードコヒーレント動作が可能になると期待されている。本論文は、この新たなレーザの解析を極めて見通しよく行うことができる理論の構築についてまとめたものである。また、理論に基づいたレーザ特性の計算と実験との詳細な比較を行い、理論の妥当性、有効性を示すことにも成功している。

第1章は序論であり、研究背景および2次元フォトニック結晶レーザの特徴を概観した上で、本論文の位置付け、目的を明確にしている。

第2章では、2次元フォトニック結晶レーザのデバイス構造、動作特性を示すとともに、実験的に得られた2次元的なレーザ発振の特性について述べている。さらに、これまで用いられてきた数値解析法である平面波展開法およびFDTD法について、その特徴と限界を明確に述べている。これに対し、新たな理論となりうる結合波理論の可能性を説明している。

第3章では、2次元の結合波理論の定式化について述べている。まず、周期構造中での光が、ブロッホ波と呼ばれる異なる波数をもつ多数の波の重ね合わせとなることを説明している。その中で、TM偏光では基本となる4波を、TE偏光では、さらに1つ次数の高い4波を加えた8波を用いた光の結合をモデル化することが、現実のデバイス特性を説明する上で、有効であることを示している。これらの4波（TM偏光）または8波（TE偏光）に対して、結合効果を表す光結合係数を導入し、解析モデルを提案している。さらに、結晶面に垂直方向への回折（面発光機能）について検討し、TM偏光ではその効果が小さく省略できること、TE偏光ではその強度が大きいため定式化に含める必要のあることを明らかにしている。これらの考察を元に、TE偏光、TM偏光の双方に対して、光の結合を表現する結合波方程式を導出している。これらの方程式を解くことにより、有限周期のフォトニック結晶に形成される定在波状態（共振モード）の閾値利得と周波数とが数値的に求められている。一方、無限な周期構造に対しては、バンド端での共振モードの周波数が解析式で与えられることを示している。導出した解析式は、光結合係数を用いて表され、複数あるバンド端の周波数差と光の結合との関係、およびその定量的な理解が可能になるという結論を導き出している。

第4章では、TM偏光に対する共振モードを計算し、その特性を検討している。無限周期構造とは異なり、有限の周期構造では、境界が存在するため、境界を端とする多数の包絡線が形成され、それぞれの包絡線に対して個別の共振モードが形成される。これらの共振モードのうち、包絡線が一山の基本モードが、バンド端の共振モードに対応することを、単位格子点周辺での電界分布を解析することにより、明らかにしている。また、基本モードの一つが最も低い閾値利得をもち、発振に到る可能性が高いことを見出すとともに、格子点の大きさにより最低の閾値利得をもつ基本モードが入れ替わることを明

らかにしている。この基本モードの入れ替わりを利用することで、発振モードの選択が可能になることを示している。さらに、境界での反射条件も検討し、反射の強度および位相を境界上で適切に分布させることにより、安定した単一モード発振を実現する方法を提案している。

第5章では、TE 偏光に対する共振モードを計算し、特にバンド端の共振モードに対応する基本モードの閾値利得を検討している。フォトニック結晶外部への放射損失を解析することで、各基本モードの閾値利得を決定する主たる損失を明らかにしている。さらに、各基本モードの閾値利得が実験結果と良く対応することを確認し、計算の妥当性・有効性を示すことにも成功している。

第6章は結論であり、本論文で得られた結果をまとめると同時に今後の展開について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、2次元フォトニック結晶レーザの理論解析法の構築について報告している。2次元フォトニック結晶レーザは、フォトニックバンド構造のバンド端における光の定在波状態を共振器として用いるもので、既存の半導体レーザでは困難である大面積での単一モードコヒーレント動作を可能にするものと期待されている。この新たなレーザの解析には、従来、平面波展開法およびFDTD法と呼ばれる数値計算法が用いられてきたが、両者とも、レーザ特性の基本的な物理的機構の理解を与えるものではなく、得られた結果の解釈と妥当性の判断が困難という問題があった。本論文では、周期的屈折率分布に基づく2次元面内での光の回折・結合現象を、より簡便にモデル化し、物理的に極めて見通しの良い理論の構築に成功している。さらに、実験との詳細な比較も行い、その妥当性・有効性を示すことにも成功している。本研究で得られた成果は、以下のようにまとめられる。

1. フォトニック結晶における光の回折・結合を記述する光波として、TM 偏光の場合には、基本となる4波を、TE 偏光の場合には、さらに1つ次数の高い波を4波加えた8波を用いることが、現実的なデバイス動作をする上で、有効であることを見出した。これらの4波(TM)、8波(TE)の回折・結合を表す結合波方程式を導いた後、バンド端のエネルギーを導出し、これらが、現実のデバイスの特性と極めて良好な一致を示すことを明らかにした。
2. 続いて、TE 偏光の場合に強く表れる上下方向への光の回折(面発光機能)をも取り込んだ計算を行い、各モードの閾値利得を導くと同時に、閾値利得と回折強度との関係を明らかにした。さらに、閾値利得と実験結果とが、うまく対応することを示すことに成功している。
3. 端面での反射等の影響を取り込んだ解析も行い、適切な端面反射の導入により、モードの選択性が格段に向上し、より安定な単一モードコヒーレント発振を実現することが可能になることを示した。

以上、本論文は、2次元フォトニック結晶レーザの極めて有効な解析法を確立したものであり、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18年12月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。