

氏 名	すぎ 杉 立 厚 志
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2420 号
学位授与の日付	平 成 16 年 9 月 24 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 物 性 工 学 専 攻
学位論文題目	二次元フォトニック結晶線欠陥レーザに関する研究

(主 査)
論文調査委員 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、半導体レーザや微小共振器レーザの高機能化を目的に、さらに将来の光集積回路への適用を視野に入れて、二次元スラブフォトニック結晶線欠陥と活性媒体を組み合わせた超小型レーザ「二次元フォトニック結晶線欠陥レーザ」に関する研究成果を纏めたものである。フォトニック結晶とは、周期的な屈折率分布構造を持つ新たな光材料であり、近年大きな注目を集めている。その特徴として、特定の波長の光に対して、その存在そのものを許さないフォトニックバンドギャップをもつこと、また、光の従来材料では得られない高い分散特性をもつことが挙げられる。このフォトニック結晶に周期の乱れ、すなわち欠陥を導入することで、フォトニックバンドギャップ中に特定の光を局在させることも可能となる。本論文は、これら光を自在に制御することの可能なフォトニック結晶と活性媒体を組み合わせた新たな超小型高機能レーザの実現に成功した結果を纏めたものであり、6章からなる。

第1章は序論であり、半導体レーザおよびフォトニック結晶に期待される特性を概観した上で、本論文の位置付け、目的を明確にしている。

第2章では、二次元周期構造をもつスラブ(薄板)状の二次元フォトニック結晶および線状欠陥を導入した線欠陥導波路に関する基礎検討を行っている。

第3章では、第2章で検討した二次元スラブフォトニック結晶線欠陥共振器と活性媒体を組み合わせたレーザデバイスについて、理論解析と実験結果について述べている。フォトニック結晶および活性媒体に関する設計を示し、それに基づき作製したデバイスで世界に先駆けてレーザ発振させた結果を示している。このレーザ発振原理について考察し、得られた発振が2次元フォトニック結晶スラブにおける線欠陥導波路モードのバンド端における群速度零に起因した発振であることを明らかにしている。特に、線欠陥モード解析を3次元時間領域差分法により詳細に行い、本レーザ発振が、導波路方向では分布帰還作用を、導波路垂直方向では分布ブラッグ反射作用を受けた2次元共振器効果に基づくことを明らかにしている。また本原理に基づき、線欠陥共振器の線欠陥幅を僅かに変化させることでレーザ発振波長を大きく変化させることが可能であることを新たに見出した。これにより微小共振器としての特質と組み合わせ、超小型波長可変レーザへの展開可能性を示すことに成功している。

第4章では、第3章で検討した二次元フォトニック結晶線欠陥レーザに点欠陥を集積し、デバイスの高機能化を図ることを試みている。線欠陥共振器と異なる共振波長をもつ点欠陥を導波路近傍に配置するだけで、レーザ光を垂直方向に取り出すことが可能という、極めて興味深い結果を得ている。この効果は、線欠陥に局在する光に点欠陥が作用することにより、点欠陥からの垂直方向への光の放射を強く起こすこと、と説明している。さらに、線欠陥導波路モードのバンド端は、導波路の埋められた周期穴を数個程度の長さで制限した欠陥、すなわちドナー型欠陥のモードに起因することを用いて、Q値の観点で点欠陥からの放射効率が解析できることを示している。この解析手法を用い、点欠陥が導波路から2列目、3列目へと離れるに従い点欠陥からの放射効率が大きく低下することを示すと共に、実験による検証にも成功した。さらに、偏光

特性についても理論解析と実験の一致した結果を得ることに成功している。

第5章では、光励起に代え電流励起による二次元フォトリック結晶線欠陥レーザの提案をも行っている。半絶縁 InP 基板上に n 型のエピ成長を行い、マスク形成による選択的な p 型材料拡散を行った上、水平面内の線欠陥導波路に一致させて pn 接合を形成するプロセスを提案している。更に提案したプロセスを実施し、pn 接合形成や、pn 接合と線欠陥導波路を $0.2\mu\text{m}$ 以下の精度で一致できることを実証した。また、温度特性に基づいた発熱解析を行い、本構造で電流励起することにより 20°C 程度に温度上昇を抑えてレーザ発振が可能なことを示している。更に、横方向電流注入構造スラブに関するキャリア、電流シミュレーションを行い、InP 半絶縁基板を用いる効果により、 $0.25\mu\text{m}$ 厚スラブ層に電流が注入された I-V 特性結果を得ており、pn 接合の機能を確認することに成功している。

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、半導体レーザや微小共振器レーザの高機能化を目的とし、さらに将来の光集積回路への適用を視野に入れ、二次元スラブフォトリック結晶線欠陥と活性媒体を組み合わせた超小型レーザに関する研究成果をまとめたものである。これまで、世界的に見てもフォトリック結晶の線欠陥を活用した微小レーザの研究例はなく、本研究で初めてレーザ発振を実現することに成功している。本研究で得られた主な成果は次のように纏められる。

1. 二次元フォトリック結晶線欠陥レーザのレーザ発振原理について考察し、得られた発振が2次元フォトリック結晶スラブ（薄板）における線欠陥導波路モード端における群速度零に起因した発振であることを明らかにしている。特に、線欠陥モード解析を3次元時間領域差分法により詳細に行い、本レーザ発振が、導波路方向では分布帰還作用を、導波路垂直方向では分布ブラッグ反射作用を受けた2次元共振器効果に基づくことを明らかにしている。更に、本原理に基づき、線欠陥共振器の線欠陥幅を僅かに変化させることでレーザ発振波長を大きく変化させることが可能であることを新たに見出した。これにより微小共振器としての特質と組み合わせて、超小型波長可変レーザへの展開可能性を示すことに成功している。
2. 続いて、上記二次元フォトリック結晶線欠陥レーザに点欠陥を集積し、デバイスの高機能化を図ることを試みている。線欠陥共振器の共振波長と異なる共振波長をもつ点欠陥を導波路近傍に配置するだけで、レーザ光を垂直方向に取り出すことが可能という極めて興味深い結果を理論および実験の両面から示すことに成功している。この効果は、線欠陥に局在する光が点欠陥と強く相互作用することにより、点欠陥からの垂直方向への光の放射を強く起こすことに基づくことを明らかにしている。
3. 更に、光励起に代えた電流励起による二次元フォトリック結晶線欠陥レーザの提案をも行っている。温度特性に基づいた発熱解析や、スラブ内電流シミュレーション結果などを示すとともに、実際のデバイス作製検証を行うことに成功している。

以上、本論文は、二次元フォトリック結晶線欠陥レーザの有効性とその可能性を世界に先駆けて示したものであり、学術上、実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16年8月17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。