

(論文内容の要旨)

本論文は、フォトニック結晶レーザにおけるビーム出射方向制御に関する成果をまとめたものであり、7章から成る。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持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る。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であり、レンズを用いなくとも1°未満の小さいビーム拡がり角を得ることが出来る。この特徴はビーム出射方向制御を行う上で極めて重要であり、フォトニック結晶レーザによりこれまで実現出来なかったデバイス単体でのビーム出射方向制御が可能となると期待される。本論文は、このフォトニック結晶レーザにビーム出射方向制御機能を持たせるための検討についてまとめたものである。また、理論的に予測したモデルと実験結果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。

第1章は序論であり、研究背景、フォトニック結晶レーザおよび従来の出射方向可変デバイスについて概観した上で、本論文の位置付け、目的を明確にしている。

第2章では、正方格子フォトニック結晶において面内2次元定在波状態が形成される原理を述べ、フォトニック結晶内部における光波の結合状態など、従来のフォトニック結晶レーザの動作原理を述べた上で、斜め方向へのビームを得るためには、波長が格子定数と一致しない点（非 Γ 点）からの発振が必要であることを示している。

第3章では、斜め方向ビームを得るために必要な条件、すなわち波長と格子定数が一致しない場合（非 Γ 点）における発振が偶発的に得られた実測例を2つ示している。

第一の例はV字形状格子孔を用いたデバイスからのものであり、ビーム出射方向は $\pm 2.2^\circ$ であると説明している。また、得られた斜めビームは狭い拡がり角を有し、電流を注入した領域全体からの大面積発振を観測したことを示している。

第二の例は回転非対称なV字形状格子孔4つを一組とした2重周期の組み合わせ格子孔に関するものであり、ブリルアンゾーンの大きさが小さくなることを反映してバンド構造には折り返しが観測されたと説明している。また、 Γ 点から大きく離れた非 Γ 点において発振が得られ、 $\pm 8^\circ$ の斜め方向ビームが得られたとともに、大面積2次元発振であることを反映して狭い拡がり角のビームが得られたことを示している。第3章の結果から、非 Γ 点において発振した場合においても、ビーム出射角の大小に関わらず大面積発振が維持され、狭いビーム拡がり角のビームが得られることを実測面から確認している。

第4章では、人為的に非 Γ 点にバンド端をつくりだすための理論検討結果を示している。任意の波数にバンド端を作り出すためには、任意の大きさの逆格子ベクトルを与える必要があるとの観点から、正方格子の基本逆格子ベクトルよりも微小な逆格子ベクトルが必要となること

を示している。この考察を元に、正方格子と長方格子という格子定数の異なる格子構造を組み合わせた異周期複合フォトニック結晶により、それらの基本逆格子ベクトルの差分に対応する逆格子ベクトルを生み出すことを考案し、正方格子と長方格子の格子定数差を変化させることによって、任意の大きさの微小な逆格子ベクトルをつくりだすことが可能であるとの結論を導いている。さらに、異周期複合フォトニック結晶に関し、バンド構造、面内における光波の結合状態についての理論検討を加え、新しくバンド端が生まれることを示している。また、新たに生まれたバンド端のモード特性について FDTD 法と呼ばれる数値解析手法を用いた解析を行い、その電界分布が長周期の包絡周期関数を有することを示している。この包絡周期関数では隣接する腹部分の位相が互いに逆であることを反映して、通常の回折格子とは異なり斜め方向のみへの出射ビームが得られることも述べている。これらの結果から、正方格子と長方格子を組み合わせることで、その格子定数差に応じた任意の方向への出射ビームが得られることを理論的に確認することに成功している。

第 5 章では、第 4 章で得られた理論検討結果を実験的に確認した結果について述べている。まず、活性層の両面に位置精度良く 2 つのフォトニック結晶を作製するために、レジストレーション描画とウェハ融着法を組み合わせた手法を提案し、作製法を確立したことを述べている。次に、この手法を用いて異周期複合フォトニック結晶レーザのデバイス作製を行い、評価を行った結果を示している。実測されたバンド構造には正方格子と長方格子に由来するバンド構造がどちらも存在し、その Γ - X_1 方向の平坦バンド上に両者の複合効果により初めて生じると予測していた Γ 点に向かって上向きに伸びるバンドを観測している。また、正方格子と長方格子の基本逆格子ベクトルの差分の半分に対応する波数に、新たなバンド端の形成を確認している。さらに、この新たなバンド端からの発振を観測し、格子定数差に応じた方向への斜め出射ビームを観測している。また、その近視野像が 2 次元的に広がっていることから発振が 2 次元的な結合を伴うものであることを確認している。以上のように、異周期複合フォトニック結晶レーザにおけるビーム出射方向制御原理が正しいことを実験的に確認することに成功している。

第 6 章では、第 5 章までの検討により得られた知見に基づいて、単一デバイスからのビーム出射方向制御の検討を行った結果について示している。まず、場所により周期差が連続的に変化する異周期複合フォトニック結晶を有し、50 分割された電極を隣接する 3 個ずつオーバーラップさせながら駆動する周期差可変多電極構造デバイスを提案し、その作製法について説明している。次に、実測結果を示し、駆動場所に応じて近視野像の縞の間隔が変化するとともに、電流を流した領域の周期差に対応する斜め出射ビームを観測することに成功している。

第 7 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、オンチップでビーム出射方向制御を行うというレーザ分野における長年の課題に対して、これを解決する独自の構造の提案から作製手法確立、原理検証までをまとめたものであり、7 章から成る。フォトリック結晶レーザは、大面積での単一モードコヒーレント動作が可能であり、既存の半導体レーザでは実現が困難な 1° 未満の小さいビーム拡がり角を実現することが出来る。本論文では、この小さいビーム拡がり角を維持したままビーム出射方向制御機能を持たせるための検討を行い、ビーム出射方向を制御する条件の考察、具体的な原理モデルの提案、理論解析、デバイス作製法の確立、デバイスの実験的評価を行っている。さらに理論的に予測したモデルと実験結果の詳細な比較をも行い、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. フォトリック結晶レーザの格子間隔と波長が一致する定在波状態においては、ビーム出射方向は面垂直方向となるが、両者が一致しない定在波状態を作ることが出来れば、斜め方向への出射ビームが得られる。このとき、ビーム出射方向は格子間隔と波長のずれ量に対応して変化するので、格子間隔と一致しない任意の波長での定在波状態を作ることによって、ビーム出射方向を制御可能であることを見出した。これを実現するための具体的構造として正方格子と長方格子という格子定数の異なる 2 つのフォトリック結晶を組み合わせた異周期複合フォトリック結晶を提案し、両者の格子定数差に応じた任意の波長での定在波状態を確かに形成可能であることを理論的に示した。
2. 続いて、異周期複合フォトリック結晶レーザを作製するため、活性層の上下に位置精度よくフォトリック結晶を作製するための手法を確立し、デバイスの作製を行った。次に、そのフォトリックバンド構造上に理論的に予測した複合フォトリック結晶特有の構造が存在することを見出し、ビームパターンの評価によりビーム出射方向が理論予測に従って変化することを確認した。また、近視野像が 2 次元的に広がっていることから大面積コヒーレント発振が維持されていることを示した。さらに、理論的に予測した通り、波長がほとんど変化しない発振スペクトルが得られるなど実験的な評価結果が理論的予測と良く対応していることを示し、ビーム出射方向制御原理を実証することに成功した。
3. 格子定数差が連続的に変化する異周期複合フォトリック結晶を用いた多電極デバイスを作製し、単一デバイスからのビーム出射方向制御を実験的に示し、動的にビーム出射方向を制御するデバイスの実現に成功した。

以上、本論文は、フォトリック結晶レーザのビーム出射方向制御に関して極めて有効な手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 21 年 1 月 28 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。