

氏名	おかのまこと 岡野誠
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第2411号
学位授与の日付	平成16年7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	工学研究科電子物性工学専攻
学位論文題目	3次元フォトニック結晶光共振器及び光導波路に関する理論解析

論文調査委員 (主査) 教授 野田 進 教授 藤田 静雄 教授 北野 正雄

論文内容の要旨

本論文は、ストライプ積層型3次元フォトニック結晶を用いた光共振器及び光導波路に関する理論解析についてまとめたものであり、7章からなっている。

第1章は序論であり、本論文の位置付け、目的について述べている。

第2章では、本論文で用いた電磁界解析法である平面波展開法、時間領域差分法 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD法) について説明を行っている。特に、FDTD法においては、3次元フォトニック結晶線欠陥導波路用の吸収境界条件として、3次元フォトニック結晶埋め込み型 Berenger の PML 吸収境界条件の提案を行っている。

第3章では、群論を Maxwell 方程式で記述される電磁気学に適用する方法について説明を行っている。まず、時間依存項を $\exp(i\omega t)$ とおいた周波数領域における群論の定式化に関する検討を行った。次に、量子力学で用いられているスカラー場に対する射影演算子が、ベクトル場に対しても同様に適用可能であることを示し、電磁界のモードを射影演算子により分類する方法を提案している。本方法は、計算機上での実行が可能である。さらに、電流源(および磁流源)を含めた時間領域の Maxwell 方程式に対して群論の定式化を行い、誘電率分布が属する対称操作群の既約表現の基底ベクトル毎に、独立に解析を行うことが可能であることを明らかにしている。時間領域における群論の定式化は、本論文により初めて成されたものである。Maxwell 方程式への群論の適用は、フォトニック結晶の解析のみならず、より一般的な電磁界解析においても同様に利用可能なものと言える。

第4章では、第2章で述べた電磁界解析手法を用いて3次元フォトニック結晶中に点欠陥を導入(誘電体を付加)することで形成される微小光共振器の解析を行い、点欠陥の形状を直方体とし、かつその位置を上下にあるストライプの対角線に沿って配置することにより、幅広い波長域において単一モード動作可能な共振器が実現可能であることを示している。また、3次元フォトニック結晶の周期数が有限である場合の微小共振器の Q 値について解析を行い、Q 値と積層数との関係を明らかにしている。10層程度で、Q 値が1000を超えることを示している。

第5章では、大きな点欠陥体積をもつ多モード点欠陥共振器に関して、高次の点欠陥モードも含めて解析を行っている。デバイスの用途に適した特性をもつ点欠陥モードを利用することで、高性能なデバイスを実現できる可能性があり、高次モードに対して解析を行うことは重要である。但し、多モード点欠陥共振器の解析では、共振周波数間隔が小さくなるため、解析上モード同士の干渉が生じ、一般的手法では、解析が困難である。そこで、本章の解析では、この問題を解決するために、第3章で示された群論を用いた解析法を使用している。群論を用いてモード分類を行うことにより一度に扱うモード数が減少するため、解析は簡便化される。

第6章では、点欠陥共振器近傍に、人為的な線欠陥を導入することにより形成した微小導波路を配置し、両者の結合に関する解析を行っている。これは、点欠陥共振器により閉じ込められた光を導波路へ導く上での重要な知見を与えるものである。本解析においては、点欠陥共振器と線欠陥導波路の純粋な結合特性を評価するために、3次元フォトニック結晶埋め込

み型 Berenger の PML 吸収境界条件を用いて、導波路終端部における反射波の影響を除去することを試みている。点欠陥モード、線欠陥モードの対称性が異なる場合には、両者は結合しないが、構造に非対称性を導入することにより、結合状態が形成されることを明らかにしている。さらに、様々な結合構造に対して点欠陥モード、線欠陥モードの結合度を評価している。以上は、点欠陥共振器レーザを、3次元フォトニック結晶を用いた超小型光回路用の発光デバイスとして利用することを想定した場合、必須となる構造であり、超小型光回路実現に対して重要な役割をもつ。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果についてまとめている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、新しい光ナノ構造として期待されるフォトニック結晶中へ導入された人為欠陥中での光の振る舞いについての解析結果をまとめたものである。具体的には、ストライプ積層型3次元フォトニック結晶を解析対象とし、点欠陥を導入することにより形成される微小光共振器、および線欠陥を導入することにより形成される微小光導波路に関する理論解析を行っている。得られた主な成果は次のようにまとめられる。

1. 点欠陥を導入（誘電体を付加）することにより形成される微小光共振器に関して、平面波展開法、時間領域差分法の2つの手法を用いて解析を行い、点欠陥の形状を直方体とし、かつその位置を上下にあるストライプの対角線に沿って配置することにより、幅広い波長域において単一モード動作可能な共振器が実現可能であることを示している。また、3次元フォトニック結晶の周期数が有限である場合の微小共振器のQ値について解析を行い、Q値と積層数との関係を明らかにしている。10層程度で、Q値が1000を超えることを示している。解析においては、自らが作成した並列計算プログラムを用いることで、3次元電磁界解析における計算時間の大幅な短縮を図ることに成功している。
2. 点欠陥の大きさが大きくなり、モード数が多くなった場合についての解析法および解析結果についても検討を行っている。モード数が多くなった場合の解析法として、群論を用いたモード分類法が電流源（および磁流源）を含む時間領域のMaxwell方程式に対して有効であることを明らかにしている。実際に、時間領域差分法において、群論を用いたモード分類を行い、多くのモードをもつ点欠陥共振器の解析を簡便化することに成功している。本方法は、フォトニック結晶解析のみならず、一般の時間領域電磁界解析に対しても適用可能な方法である。
3. 最後に、上記、点欠陥共振器近傍に、人為的な線欠陥を導入することにより形成した微小導波路を配置し、両者の結合に関する解析を行っている。これは、点欠陥共振器により閉じ込められた光を導波路へ導く上での重要な知見を与えるものである。点欠陥共振器モードと線欠陥導波路モードの対称性が異なる場合には、両者が結合しないことを示した後、構造に非対称性を導入することで、結合状態が形成されることを明らかとしている。本解析は、点欠陥共振器レーザを3次元フォトニック結晶超小型光回路用の発光デバイスとして使用することを想定したものであり、超小型光回路の実現に向けての重要な知見を与えるものである。

以上、本論文は、3次元フォトニック結晶点欠陥共振器及び線欠陥導波路に関して、詳細な解析を行うと共に、新たな群論併用型の電磁界解析手法を提案するものであり、實際上、学術上、当該分野に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6月21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。