

氏名	たなか よしのり 田中 良典
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第2656号
学位授与の日付	平成18年3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次元フォトリック結晶への3次元構造の導入と光制御

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

本論文では、2次元フォトリック結晶への3次元構造の導入と光制御についてまとめたものであり、6章からなる。フォトリック結晶は周期的屈折率分布をもつ新しい光ナノ構造であり、特定の波長域の光の存在を許さないフォトリックバンドギャップをもつことを特長とする。このフォトリック結晶に適切な人為欠陥を導入すると、微小光導波路や光ナノ共振器などが形成可能となる。最近では、例えば $10^6$ 程度のQ値をもつ光ナノ共振器が実現されるなど、従来にない光機能の実現がなされるようになってきている。本論文では、2次元フォトリック結晶中の光導波路や光ナノ共振器の設計手法として、従来の2次元面内の構造設計に加え、新たに3次元構造を形成するという手法を提案している。また、この手法に基づき、実際に、光ナノ共振器への3次元構造の導入による放射パターン制御、導波路への3次元構造の導入による偏波変換機能について理論と実験の両面から検討し、その可能性の実証に成功している。

第1章は序論であり、まず本研究の背景としてフォトリック結晶の現状およびフォトリック結晶によって期待される効果について述べられている。次に、本論文の位置付け、目的が述べられている。

第2章では、本研究における基本となる2次元フォトリック結晶の構造と基本動作について述べられている。また、2次元フォトリック結晶の特性の理論解析手法、試料の作製手法、評価手法についても合わせて述べられている。

第3章では、2次元フォトリック結晶共振器へ局所的3次元構造の導入による光制御の可能性に関する検討結果について述べている。本研究では、特に共振器とレンズ・ファイバなどの外部光学系との間の結合を考える場合に重要となる放射パターンに注目し、これらを局所的3次元構造導入により、制御することに関して検討を行っている。まず具体的な3次元構造としてナノ共振器に浅孔を導入した構造を検討し、その放射パターンについて理論解析を行うことにより、共振器からの放射パターンが制御可能なことを示している。特に、適切な加工形状を導入すると、外部光学系との結合に有利な単峰のピークが得られることを明らかにした。次に局所的3次元加工を実験的に導入する手法として、集束イオンビーム(FIB)の利用を検討し、その加工プロセスに関する詳細な実験的検討を行った。FIBは集束したガリウムイオンを試料に照射することによるスパッタリングにより微細な3次元構造を導入可能な装置であり、高い位置精度と大きな自由度で3次元構造を導入可能である。ただし加工に利用するガリウムが試料に残留することにより光吸収が生じ、共振器のQ値に大きな影響を与える。本論文ではガリウムの影響を除去するため、試料に高温加熱を施すことを提案し、真空中で2時間、 $800^{\circ}\text{C}$ の環境下で加熱することによりガリウムが除去可能であることを実験的に示した。以上の検討を元に、局所的3次元加工を施した2次元フォトリック結晶スラブ共振器の作製を行い、その近視野像を実験的に測定した結果について示した。その結果、3次元加工を施したナノ共振器は、単峰性の放射パターンを示し、理論解析結果とよく一致することが示された。

第4章では、2次元フォトリック結晶導波路への3次元構造の導入を検討し、極微小偏波変換機能が実現可能なことを示している。ここで提案した構造は2次元フォトリック結晶スラブ導波路に隣接する空気ロッドを斜柱としたものであり、2次元フォトリック結晶導波路中に波長板機能をもたせることが可能であることを示している。また、斜柱の配置方向を交互

に配置する、斜柱空気ロッドをもつ導波路の長さを最適化するなどの設計により、最適構造では波長約 60nm の帯域にわたり 1dB の損失で 90~100% の偏波変換効率が実現できることを明らかにした。さらに、プラズマエッチングと FIB を組み合わせることにより、斜柱空気ロッドを有する 2次元フォトニック結晶スラブの作製を行い、その評価を行った。その結果、損失は理論値よりやや大きいものの、80~90% の偏波変換効率が得られることを示した。

第 5 章では、2次元フォトニック結晶スラブに3次元構造の導入の影響について検討している。3次元構造の導入は、2次元フォトニック結晶スラブの構造に上下非対称をもたらすことを指摘し、上下非対称2次元フォトニック結晶スラブでは TE-like の導波路モードや共振器モードと TM-like スラブモードの間の結合が生じ、損失が生じうることを示した。さらに、このような TE-TM 結合による損失を防ぐために、TE-like モードと TM-like モードの双方に PBG をもつ構造についても述べられている。

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への3次元構造の導入と光制御について報告している。フォトニック結晶は光を自在に制御可能な光ナノ構造として近年大きな注目を集めている。そのうち、2次元フォトニック結晶は、スラブ構造の採用により、近年著しい進展を遂げている。一般に2次元フォトニック結晶の設計には、2次元面内のパラメータに着目した検討が行われているが、本論文では、新たな自由度として3次元構造を導入するという手法の提案を行うとともに、実際に、3次元構造の導入により、点欠陥光ナノ共振器からの放射パターン制御や極微小偏波変換機能などの光制御が実現可能なことを理論と実験の両面から実証しており、3次元構造導入の有用性を明らかにしている。本研究で得られた成果は、以下のようによまとめられる。

1. まず、2次元フォトニック結晶中の点欠陥光ナノ共振器への3次元構造の導入に関して検討を行っている。共振器からの放射パターンに着目して理論解析を行い、適切な3次元構造の導入により放射パターンの制御が実現可能であることを示した。さらに、集束イオンビームを利用した3次元構造の導入プロセスに関して検討を行い、加工に利用するガリウムイオンが与える影響およびガリウムイオンの除去法を示した。さらにこの手法を利用して作製した試料の放射パターン特性が理論解析結果とよく一致することを示した。
2. 続いて、2次元フォトニック結晶中の線欠陥導波路への3次元構造の導入に関して検討を行っている。ここでは、まず、導波路に隣接する空気ロッドを斜柱とすることにより、超小型偏波変換器が実現可能なことを、理論解析により実証した。次に集束イオンビームを利用した偏波変換器の作製を行い、実験的にも偏波変換機能が実現可能なことを示すことに成功した。本偏波変換器の長さは 3-4 $\mu\text{m}$  と非常に小さく、偏波ダイバーシティ機能の実現への重要な一歩を与えるものと評価出来る。
3. 2次元フォトニック結晶に3次元構造を導入した場合の影響についても検討を行っている。特に、上下非対称性が発現することに着目し、TE-like モードと TM-like モードの直交性が崩れ、光ナノ共振器の Q 値の低下などの損失が生じることを指摘している。また、この影響を防ぐための手段として、TE-like モードと TM-like モードの双方にバンドギャップを持つ構造利用の提案を行った。

以上のように、本論文は、2次元フォトニック結晶へ3次元構造の導入と光制御を世界に先駆けて実証したものであり、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2月9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。