

氏 名	かわしましょういち 川島 祥 一
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2838 号
学位授与の日付	平 成 19 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 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	3 次元フォトニック結晶による光伝搬制御に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 野 田 進	教 授 木 本 恒 暢	准教授 川 上 養 一
--------	--------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、3次元フォトニック結晶導波路による光伝搬制御を目的とし、始めに、数値解析による導波路の設計と光伝搬現象の解析を行い、その結果をもとに面内導波路と垂直導波路を実際に作製、最後に、光学特性の測定と評価を行った一連の研究成果をまとめたものであり、全7章からなる。

第1章は序論であり、フォトニック結晶に関する研究動向、およびフォトニック結晶の研究によって期待される効果について述べ、本論文の位置づけ、目的を明示している。

第2章では、始めに、ストライプ積層型3次元フォトニック結晶の基礎特性について述べ、続いて、従来解析されていた3次元フォトニック結晶導波路の特性とストライプ積層型3次元フォトニック結晶の作製方法、そして、基礎光学特性を実験的に評価するための光学測定系について述べている。

第3章では、複数層に線欠陥を導入した面内導波路を、時間領域差分法 (Finite-Difference Time-Domain method ; FDTD法) により解析した結果を述べている。まず、フォトニック結晶を構成する1本の誘電体ロッドの上下を、2本のドナー型線欠陥で挟んだ導波路を解析している。次に、1本の誘電体ロッドを除去したアクセプタ型線欠陥の上下を、先に解析したものと同種の2本のドナー型線欠陥で挟んだ導波路の解析を行っている。これら2つの導波路は、2本のドナー型線欠陥で挟まれた中央の誘電体ロッドの有無のみが、構造上の差異である。それにもかかわらず、一方は、その誘電体ロッドに電磁界が局在する導波路、もう一方は、ロッドを除去した空気領域に局在する導波路といったように、性質の全く異なる導波路が、それぞれ形成されることを明らかにしている。また、導波路のストライプ積層数と伝搬損失の関係を解析し、先述した2本のドナー型線欠陥を導入した導波路は、ストライプ積層数17層程度で数dB/cmという、従来の面内導波路よりも低損失な伝搬が可能であることを示している。

第4章では、ストライプ積層方向へ光が伝搬する3次元フォトニック結晶垂直導波路の数値解析結果を述べている。平面波展開法とFDTD法による両解析結果より、アクセプタ型欠陥を導入した8層垂直導波路内を伝搬する光は、完全フォトニックバンドギャップ内に形成される縮退した導波モードに結合することを明らかにした。さらに、垂直導波路を構成する基本周期の構造位相、つまり、ストライプの積層順序によって、導波路の透過スペクトルに偏光依存性が生じることも同時に明らかにしている。

第5章では、従来よりも、高い精度で再現性良く3次元フォトニック結晶を実現することを目的に、作製手法に関する技術開発について述べている。まず、GaAsストライプ構造の矩形性改善を目的に、そのストライプ構造の作製手法を、 CH_4 と H_2 の反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching; RIE) から、HIとXeの誘導結合プラズマ (Inductively Coupled Plasma; ICP) エッチングへと変更している。これにより、数値解析モデルを忠実性良く再現することに成功している。また、精密積層工程においては、ウエハ接触直前の状態での位置合わせを実現させることを目的に、従来の精密積層装置に改良を施している。その結果、ウエハの面内位置の高精度な制御、ウエハ間隔の精密制御、ウエハ同士の接触検知、2枚のウ

エハの平行度測定、これらが確実に実行できるようにしている。さらに、位置合わせ手法に関しては、十字型の主尺・副尺を利用した位置合わせプロセスを新たに導入し、より汎用性の高い手法へと発展させている。また、3次元フォトニック結晶のさらなる多層化への対応として、薄膜状態での再加熱プロセスを新たに導入し、作製歩留まりの向上を図っている。これらの改良により、3次元ナノ構造の作製が、高い精度で再現性良く実現可能となった。その改良した作製プロセスを用いて、光通信波長帯域に完全フォトニックバンドギャップをもつ4層および8層3次元フォトニック結晶を作製した結果を述べている。走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope; SEM）によって、その構造を観察した結果、ウエハ面内2mm角の積層精度が、定常的に70nm（フォトニック結晶の周期に対し10%）以内を達成していることを示した。さらに、それらの光学特性を測定することによっても、良好な結晶が得られていることを示し、本論文で改良した作製手法の有効性を述べている。

第6章では、第5章で開発した新しい作製プロセスを用いて、光通信波長帯域の3次元フォトニック結晶導波路を作製した結果と、光学特性の測定結果について述べている。まず、第3章で設計した積層数9層の面内導波路を作製し、SEMによる構造観察を行うことで、その完成度を評価している。次に、第4章で解析したアクセプタ型8層垂直導波路を、4種類の基本周期構造で作製した結果を示している。そして、光学測定を行った結果、特定帯域の光が、垂直導波路を伝搬することを明らかにし、さらには、基本周期による偏光制御も、同時に、実証している。最後に、アクセプタ型の面内導波路と同型垂直導波路を互いに接続した9層3次元光配線構造を試作した結果について述べている。その光学測定結果からは、垂直導波路へ入射した光が、面内導波路を介して、別の垂直導波路より射出していることが明らかとなり、3次元フォトニック結晶による3次元光伝搬制御を初めて実証している。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめるとともに、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、3次元フォトニック結晶による光伝搬制御に関する研究成果をまとめたものである。3次元フォトニック結晶内に、線欠陥を導入して得られる光導波路は、微小空間において自在な光伝搬制御が可能な光学素子として期待されている。本論文では、ストライプ積層型3次元フォトニック結晶導波路に関して、数値解析による構造設計から、実際の導波路作製、そして光学測定までの一連の研究成果を報告している。本研究で得られた主な成果は、次のようにまとめられる。

1. まず、結晶内の複数層に線欠陥を導入した3次元フォトニック結晶面内導波路に関して数値解析を行っている。その結果、空気領域に光が強く局在する導波路や、積層方向への伝搬損失が少ない導波路の設計に成功している。
2. 続いて、ストライプ積層方向へ光が伝搬する3次元フォトニック結晶垂直導波路の数値解析を行っている。その結果、導波路を構成する基本周期を適切に設計することで、伝搬光の偏光制御が可能であることを明らかにした。
3. さらに、これら解析した面内導波路と垂直導波路を、高い精度で実現するため、従来の作製手法に改良加えている。その改良した作製手法を用いて、3次元フォトニック結晶の作製を行い、70nm以内の積層精度が定常的に達成できることを示した。
4. 最後に、本論文で解析した面内導波路と垂直導波路の作製結果、および光学測定結果について述べている。面内導波路に関しては、複数層に線欠陥が精度良く積層された9層面内導波路の作製に成功している。また、積層数8層の垂直導波路を作製し、垂直方向への光伝搬と、基本周期構造による偏光制御の結果を同時に示している。これは、3次元フォトニック結晶垂直導波路を初めて実証した成果である。さらに、それら面内導波路と垂直導波路を互いに接続した3次元光配線構造の試作にも成功し、特定帯域の光が伝搬したことを観測している。これは、フォトニック結晶による3次元光伝搬制御を、光通信波長帯域において、初めて実証した成果といえる。

以上、本論文は、3次元フォトニック結晶による光伝搬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19年6月26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。