

京都大学	博士（工学）	氏名	鈴木 克 佳
論文題目	多方向同時エッチングによる 3 次元フォトニック結晶の一括形成		
（論文内容の要旨） 本論文は、次世代の光材料として期待されている 3 次元フォトニック結晶を簡便に実現可能な新規作製法の提案と実証を行った結果をまとめたものであり、6 章から構成される。フォトニック結晶は、光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ光ナノ構造体であり、光の伝搬を禁止するフォトニックバンドギャップを有するという特徴をもつ。特に、3 次元的な周期構造をもつ 3 次元フォトニック結晶においては、全方位に対してフォトニックバンドギャップが形成され、様々な光回路の実現の鍵を与えるものと期待されている。しかしながら、その実現には高精度な形成技術が要求され、高品質な 3 次元フォトニック結晶を簡便に作製することは困難であった。これを解決するために、本論文では、多方向から「同時に」斜め方向のプラズマエッチングを行う手法を開発し、1 回のエッチングにより 3 次元フォトニック結晶が一括形成可能であることを明らかにした。この結果は、3 次元フォトニック結晶の簡便な実現を可能とするものであり、3 次元フォトニック結晶を用いた研究の進展に大きく貢献すると期待できる。 第 1 章は序論であり、研究背景として、フォトニック結晶の現状及び、特徴をまとめた上で、本論文の位置付け、目的を述べている。 第 2 章では、本論文で実現を目指した 1 回のエッチングで形成可能な 3 次元フォトニック結晶の特徴について述べている。新たな作製法では、3 方向から同時に斜め方向のエッチングを行うことで、1 回のエッチングにより 3 次元フォトニック結晶が形成できる。実際に作製するのに先立ち、本構造の代表的な構造パラメータである、エッチング孔半径、エッチング角度、フォトニック結晶深さ、側壁形状の目標値または、許容値を理論解析により明らかにしている。 第 3 章では、多方向同時プラズマエッチング技術の開発と、これによる 3 次元フォトニック結晶の一括形成について述べている。プラズマエッチングは半導体の微細加工に広く利用されており、3 次元フォトニック結晶の一括形成に有望な技術である。しかし、多方向から同時に高精度の斜め方向エッチングを行う手法は実現されていなかった。本論文では、エッチングの中心的な役割を果たす正イオンの軌道が、試料の表面に形成されるイオンシース内の電界によって決定されることに着目し、試料表面に金属から成るイオン軌道制御板を配置するのみで、多方向同時エッチングが実現できることを述べている。続いて、本技術を用いてシリコン基板上に 3 次元フォトニック結晶の形成を試みた結果、1 回のプラズマエッチングにより所望の 3 次元構造を形成することに成功している。また、多方向同時エッチング法と斜め方向のエッチングを複数回行う手法（順次エッチング法）を比較検討したところ、多方向同時エッチング法では、順次エッチング法では実現困難な構造が形成できることを明らかにしている。 第 4 章では、様々な 3 次元フォトニック結晶の光学特性評価を行った結果について述			

京都大学	博士（工学）	氏名	鈴木 克 佳
べている。まず、作製した試料の反射・透過スペクトルを測定し、波長 1300 nm 付近に明瞭な反射率の増大 (>95%) と透過率の減衰(-15dB) を観測している。実験結果とシミュレーション結果は良く対応しており、現状で世界でもトップクラスの特性をもつ構造を、1 回のエッチングで形成することに成功している。次に、3 次元フォトニック結晶を用いた光制御を実現するために重要な、完全フォトニックバンドギャップ帯域制御を試み、可視光域から近赤外光域までの非常に広い波長域に亘って、完全フォトニックバンドギャップ帯域が制御できることを示している。また、このように簡便な形成が可能な 3 次元フォトニック結晶の積層による、より高品質な 3 次元フォトニック結晶の実現について検討している。作製に先立ち、完全フォトニックバンドギャップ幅の積層誤差依存性について数値解析を行っており、周期に対して 20%程度の誤差が生じても、完全フォトニックバンドギャップ幅はほとんど変化しないことを明らかとし、積層構造が実現可能であることを述べている。続いて実際に、ウエハ融着法を用いて 3 方向同時エッチング型 3 次元フォトニック結晶の積層を試みた結果、1 回積層するのみで、反射率~100%及び、透過率-30dB の光学特性を有する 3 次元フォトニック結晶が実現できることを明らかにしている。 第 5 章では、3 方向同時エッチング型 3 次元フォトニック結晶を用いた光制御の一例として、3 次元フォトニック結晶の表面を用いた光制御について検討を行っている。近年、3 次元フォトニック結晶の表面が、光制御の場として利用できることが明らかにされ、注目を集めている。本研究で開発した作製法を用いると、3 次元フォトニック結晶が簡便に形成可能であるが故、3 次元フォトニック結晶の表面を利用した光制御の実現が期待できる。まず、本 3 次元フォトニック結晶の表面における光の局在状態について数値解析及び、実験から明らかにしている。続いて、数値解析により適切な表面構造に点状の欠陥を導入することで表面における光共振器が実現でき、線状の欠陥を導入することで表面における光導波路が実現できることを明らかにしている。これらの結果は、3 方向同時エッチングによる 3 次元フォトニック結晶を用いた光制御を促進すると期待できる。 第 6 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、今後の展望について述べられている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、次世代の光材料として期待されている3次元フォトニック結晶を簡便に実現可能な新規作製法の提案と実証を行った結果をまとめたものである。3次元フォトニック結晶は、光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ光ナノ構造体であり、全方向に対する光の禁制帯であるフォトニックバンドギャップをもつことを特徴する。このような3次元フォトニック結晶は、光子を制御・操作するための次世代光材料と位置付けられ、様々な光制御の実現の鍵を与えるものと期待されている。しかしながら、その実現には高精度な形成技術が要求され、高品質な3次元フォトニック結晶を一括して簡便に作製することは困難であった。本論文では、多方向から「同時に」斜め方向のエッチングを行うというユニークな手法を実現し、わずか1回のエッチングにより3次元フォトニック結晶を一括形成することに成功している。本研究において得られた主な成果は次のとおりである。

1. 市販のプラズマエッチング装置内に、イオン軌道制御板を配置するのみで、多方向から同時に斜め方向のプラズマエッチングを行う独自の手法を開発した。この技術を用いて3次元フォトニック結晶の一括形成を試みた結果、わずか1回のプラズマエッチングにより、世界でもトップクラスの3次元フォトニック結晶が一括形成できることを示した。さらに、フォトニック結晶を用いた光制御を実現するために重要な、フォトニックバンドギャップ帯域制御を試み、可視光域から近赤外光域までの非常に広い波長域において、フォトニックバンドギャップ帯域を制御することに成功した。
2. 一括形成した3次元フォトニック結晶の積層による、より多周期の3次元フォトニック結晶の実現について検討を行った。まず、完全フォトニックバンドギャップ幅の積層誤差依存性について数値解析を行った結果、周期に対して20%程度の誤差が生じても、完全フォトニックバンドギャップ幅はほとんど変化しないことが明らかとなり、積層構造が実現可能であるということを示した。次に、実際に積層構造を作製し、その透過特性を評価したところ、特性が一桁以上向上することが明らかとなった。
3. 3次元フォトニック結晶を用いた光制御の一例として、3次元フォトニック結晶の表面を用いた光制御について検討を行った。まず、表面における光の伝搬状態を、実験・理論の両面から明らかとした。さらに、表面における光の状態が存在しない状況を実現し、その一部分に、意図的に周期性を乱した表面欠陥を導入することにより、表面における光ナノ共振器及び、光導波路が実現できることを理論的に示した。

本論文は、次世代の光材料として期待されている3次元フォトニック結晶の簡便な実現を可能とするものであり、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25年1月31日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。