

(続紙 1)

京都大学	博士 (工学)	氏名	石 崎 賢 司
論文題目	3次元フォトニック結晶の表面における光制御に関する研究		
(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において、その「表面」に着目することにより、新しい光制御手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、光の波長と同程度の周期的な屈折率分布をもち、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。これは、周期的な静電ポテンシャル中を運動する電子に対して、エネルギーバンドギャップが形成されることと類似した性質である。特に、3 次元状の周期構造からなる 3 次元フォトニック結晶は、全ての偏光状態の光に対応可能であり、さらに大面積においても構造的に頑強であるなどの特長を有する優れた光材料と位置づけられている。従来、3 次元フォトニック結晶による光制御においては、3 次元的に全ての方向に対するバンドギャップ効果を利用するため、周期構造の「内部」に人工的な欠陥や発光体を埋め込んだ構造が用いられてきた。これに対して、本論文においては、3 次元フォトニック結晶の周期性が終端される「表面」においても、光子を制御・操作することが可能であることが示されている。外部からの様々なアクセスや操作が可能となる表面において、光が安定して存在しうることを明らかにすると同時に、表面の構造を設計・制御することにより、表面での光の状態制御が可能となることを理論・実験の両面から明らかにしている。この結果は、フォトニック結晶による新しくかつ柔軟な光子操作の可能性を示すものである。 第 1 章は序論であり、研究背景として、従来のフォトニック結晶による光制御の実現例と課題を概観した上で、3 次元フォトニック結晶の「表面」を利用することにより期待される特長および利点が議論されている。 第 2 章においては、3 次元フォトニック結晶の表面における光の局在状態の形成について、理論的な検討結果が述べられている。本論文においては、ストライプ積層型 3 次元フォトニック結晶と呼ばれる、ストライプ状の誘電体の角柱が積層された 3 次元結晶について、その表面の特性が解析されている。本構造は、結晶構造作製および結晶内部への欠陥構造の形成に関して最も進展のある有効性の高い 3 次元結晶であることを指摘した上で、その構造表面においても光を局在させることが可能であり、表面応用に適した構造であることを明らかにしている。表面の光制御応用に向けた基礎として、結晶表面において光が存在し得る時間についての検討が行われ、8～16 層程度の積層構造からなる実現可能な 3 次元結晶の表面において、十分に長時間の安定した光閉じ込めが得られることを示している。 第 3 章では、人為的にフォトニック結晶の表面構造を設計・制御し、表面の所望の領域のみに光を局在させ、表面における光制御を実現する手法についての理論的な検討が行われている。第 2 章で明らかにした表面における光の状態は、表面内に一様に形成されるものである。これに対して、結晶表面の構造を制御することにより、表面内の必要な領域のみに光を存在させ 3 次元的な光閉じ込め状態を形成することが可能であり、光共振器や光導波路などの素子が形成できることを明らかにしている。第			

一に、表面モードギャップという、表面内の光の伝搬を禁止する波長域をもつ表面構造の解析が行われている。表面において、面内方向に対する周期構造をストライプ状から格子状のように、等方性を高めるように設計することにより、面内の全方向に対して、任意の偏光をもつ光の伝搬を禁止できることを述べている。このような偏光無依存性は、3次元フォトリソニック結晶に特有の効果であり、幅広い表面応用に向けた基礎的かつ重要な特性である。第二に、モードギャップをもつ表面に新たに欠陥を導入することにより、任意の位置のみに光を存在させることが可能であることを示している。数値解析に基づき、共振器・導波路などの光局在構造の設計を行い、共振器 Q 値や導波損失などの基本特性を明らかにしている。また、これらの素子において、表面内偏光や表面垂直偏光など、偏光状態の選択が可能であることを明らかにするなど、3次元結晶表面の特徴を明快にしている。

第4章においては、表面の光局在現象および表面における光制御の実現に向けて、3次元フォトリソニック結晶を高精度に作製する技術の開発が行われている。周期的な誘電体構造を積層することによって得られる3次元フォトリソニック結晶を光通信波長域において実現するために、 ~ 100 nm以下の誤差範囲の精密積層が必要となることを明らかにした上で、再現性の高い精密積層技術の構築を行っている。具体的に、画像パターン認識を援用した精密な位置誤差評価手法と、評価結果を利用したフィードバック型の自動位置調整システムの開発を行っている。この結果、 ~ 25 nm程度の精度での位置誤差検出が可能であり、その結果として約100 nm以下の誤差範囲の精密積層が自動で得られたことが述べられている。また、開発したシステムにより実際に4層および8層の積層型3次元フォトリソニック結晶の作製し、シミュレーションと対応するバンドギャップ特性が得られたことを明らかにし、開発したシステムの有効性について議論している。

第5章においては、第2章および第3章において理論的に検討した表面における光制御を、実験的に評価した結果が述べられている。第一に、表面状態の形成可能性について明らかにするため、エバネッセント結合法を用いた評価手法の検討と評価系の構築を行い、3次元フォトリソニック結晶の表面のバンド構造を測定している。この結果、光の波長域において実際に表面に光が存在し得ることを示すことに成功し、さらに表面状態を介して表面に沿った光伝搬を生じることをも明らかにしている。第二に、8層積層結晶の表面において、表面モードギャップ構造および点欠陥共振器構造等を実現し、特性評価を行っている。この結果、表面のモードギャップを通信波長1,500 nm帯に得ることに成功するとともに、表面欠陥における所望の微小領域への局在状態を実現することに成功している。特に、このような表面欠陥モードの Q 値においては、これまでに報告されている3次元フォトリソニック結晶を用いて形成された微小共振器の中で、最高値 ($> 9,000$) が得られている。

第6章は結論であり、本論文において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、次世代の光材料として期待される 3 次元フォトニック結晶の「表面」に着目し、新しい光制御手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、光の波長と同程度の 3 次元状の周期屈折率分布をもち、いわゆるフォトニックバンドギャップを有することを特徴とする。このような 3 次元結晶は、3 次元的に全方向に対する光の操作・制御を可能とする光材料と位置づけられ、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。これまで、3 次元結晶を用いた光制御においては、結晶の「内部」に人工欠陥や発光体を埋め込み、3 次元全ての方向に対するバンドギャップ効果を利用することが不可欠と考えられてきたが、本論文では、3 次元フォトニック結晶の「表面」においても光子の制御・操作が可能であることを世界に先駆けて示すことに成功している。この成果は、外部からのアクセスや制御が容易な、全く新しい光子の操作法の実現に繋がるものと評価できる。本研究において得られた主な成果は、次のようにまとめられる。

1. 3 次元フォトニック結晶の表面における光の局在特性を理論的に明らかにすると同時に、エバネッセント結合法を用いた実験評価により、結晶表面における光のバンド構造を明らかにし、確かに 3 次元結晶の表面に光の状態が形成され、安定して光が存在し得ることを実証した。さらに、表面の状態を介して、表面を光が伝搬可能であることを、実験的に観察することに成功した。
2. 3 次元結晶の表面構造の設計・制御を行うことにより、任意の表面位置に光を強く局在させることが可能であり、表面での 3 次元的な光制御が実現できることを理論的に見出した。まず、結晶表面に光の状態が存在しない状況の形成が可能であることを示し、さらにこの表面の一部分の構造を乱した表面欠陥を導入することにより、所望の位置に光を局在させることが可能であることを明らかにした。
3. 理論検討において得られた表面光制御の実現のため、3 次元結晶構造を精密に高い再現性で作製する技術を開発し、設計どおりの表面構造の実現に成功した。この結果、表面欠陥による局在状態の形成を実験により明らかにすることに成功した。驚くことに、得られた表面欠陥モードの Q 値は、これまでに報告されている 3 次元フォトニック結晶を用いて形成したナノ共振器の中で、世界最高値 (9,000 以上) を達成している。

以上の成果は、フォトニック結晶による新たな光子操作法を与えると同時に、金属の表面におけるプラズモンポラリトン効果などの表面光現象との関連性から、物理的にも興味深いものといえる。3 次元結晶表面においては光吸収損失がないことから、新しいセンシング応用や、高効率な光-物質の相互作用の場としても大いに期待される。このように、本論文の成果は、学術上、実際上、価値ある内容を多く含んでおり、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 22 年 2 月 1 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。