

氏 名	ソ 宋	ボ 奉	シ 植
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)		
学 位 記 番 号	工 博 第 2421 号		
学位授与の日付	平 成 16 年 9 月 24 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	Hetero Photonic Crystals and Their Applications (ヘテロフォトリック結晶とその応用)		

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

近年、光エレクトロニクスに革新をもたらす新しい光ナノ構造としてフォトリック結晶が大きな注目を集めている。フォトリック結晶とは、周期的な屈折率分布をもつ人工的な構造であり、光子に対してその存在を禁止するフォトリックバンドギャップを有するという特長がある。このフォトリック結晶内に様々な欠陥を導入することにより、フォトリック結晶内部に微小共振器や光導波路の形成が可能であり、従来にない高機能光デバイスの実現が期待される。しかしながら、これまで、フォトリック結晶の研究は単一周期の結晶が主流であった。本論文はさらに一歩進んだ概念として、周期の異なるフォトリック結晶からなる「ヘテロフォトリック結晶」を提案するとともに、ヘテロフォトリック結晶における光子の振る舞いを解明し、それに基づいた新機能光ナノデバイスに関する理論解析及び実験結果についてまとめたものであり、8章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景としてフォトリック結晶の現状あるいはフォトリック結晶で期待される特性について述べるとともに、本論文の位置付け、目的を明確にしている。

第2章では、本論文で数値解析に用いた計算方法とそれを用いた単一周期をもつ2次元フォトリック結晶の基本特性について検討した結果を述べている。計算方法として、電磁界解析法である平面波展開法(Plane Wave Expansion)、時間領域差分法(Finite-Difference Time-Domain:FDTD)について詳細な式を記述している。次にこれらの計算方法を用いることで単一周期をもつ2次元フォトリック結晶スラブにおけるフォトリックバンド構造を計算し、フォトリックバンドギャップが形成されることを示している。また、その周期構造に線欠陥・点欠陥を導入することにより、バンドギャップ中に導波モード・点欠陥準位が形成され、それぞれ導波路・共振器として動作することを理論的に示している。

第3章では、第2章で検討したフォトリック結晶導波路と共振器を組み合わせた超小型波長分合デバイスのついでの理論解析と実験結果について述べている。まず、波長分合デバイスの基本的な特性をモード結合理論で検討するとともに、第2章で述べた3次元FDTD法を用いた計算結果と比較している。次に、理論的に設計した構造を精度良く実現することを目指して、半導体デバイスで広く用いられているシリコンのナノ微細加工技術について検討を行い、設計した構造とのずれや、構造揺らぎが極めて小さいフォトリック結晶デバイスを作製する微細加工技術について述べている。また、作製したデバイスの光学特性の評価を行い、波長分合デバイスの特性(波長分解能、光取りだし効率等)について定量的に議論し、理論計算結果と良く一致することを示している。これらの結果は、本研究で確立したナノ微細加工技術により設計通りの単一周期フォトリック結晶が実現できることを明確に示している。

第4章では、第2・3章で検討した単一周期フォトリック結晶の特性に基づいて、異なる周期をもつ複数のフォトリック結晶からなる「ヘテロフォトリック結晶」における光子の振る舞いを理論・実験の両面から検討を行っている。半導体ヘテロ構造は様々な高機能電子デバイスへの実現のために必須な構造であるが、光子に対するヘテロ構造はあまり研究されていないのが現状である。そこで、本章では、前章で検討した単一周期のフォトリック結晶の特性に基づいて、異なる周期をも

つヘテロフォトリック結晶を形成したヘテロ界面における光の反射と透過などの特性を理論計算より定量的に評価を行っている。また、第3章で確立したナノ微細加工技術を利用して実際にヘテロフォトリック結晶構造を作製・評価し、ヘテロ界面の透過特性について実験的に検討している。特に、ヘテロ界面での光の振る舞いを詳細に調べるため、様々な厚さのヘテロ障壁を形成し、光のトンネル現象や、ある特定の周波数の光については全反射することを理論・実験的に明らかにしている。

第5章では、ヘテロフォトリック結晶の応用例として、周期の異なるフォトリック結晶を多段接続した多チャンネル波長分合波デバイスについて理論的・実験的に検討した結果を述べている。まず、異なる格子定数をもつヘテロフォトリック結晶を多段接続することで、単一周期の結晶で最適化した波長分合波デバイスの特性（波長分解能や光取り出し効率など）を保ちながら、取り出される光の波長だけを制御出来ることを理論的に示している。さらに、1.25nm という極めて小さい格子定数差をもつヘテロフォトリック結晶波長分合波デバイスを試作し、最適化した特性を保ちながら5nm 間隔で異なる波長の光を取り出すことに成功し、ヘテロフォトリック結晶の有用性を実証している。

第6章では、ヘテロフォトリック結晶に存在するヘテロ界面を用いて、波長分合波デバイスの光取り出し効率向上が可能であることを、理論と実験から示している。具体的には、第4章で明らかになったヘテロ界面の反射特性を利用することで、点欠陥と結合しない光を干渉によって打ち消して、100%の光取り出し効率を得られることを理論的に示すと同時に、実験的にも取り出し効率の向上を実証している。

第7章では、ヘテロフォトリック結晶と電子ヘテロ構造との類似性に着目し、ダブルヘテロ構造をもつ微小共振器を提案し、理論的・実験的に検討した結果を述べている。まず、ダブルヘテロ構造によって光を閉じ込めた微小共振器の特性（Q 値、モード体積など）を3次元FDTD 法で理論解析を行っている。次に計算結果に基づいて実際にダブルヘテロ構造をもつ光共振器を作製し、25万という世界最高のQ 値をもつ微小共振器を実現することに成功している。さらに、発展した構造として、格子整合と多段ダブルヘテロ構造について検討を行っている。共振器のモード体積をほぼ一定に保ちながら、Q 値を大幅に増加できることを理論的に示している。

第8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、周期の異なるフォトリック結晶からなる「ヘテロフォトリック結晶」とその応用に関する理論および実験結果をまとめたものである。フォトリック結晶とは、周期的な屈折率分布をもつ光ナノ構造で、特定の波長の光に対して、その存在そのもの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中に様々な人為的欠陥を導入することにより光を自在に制御することが出来ると期待され、近年非常に注目を集めている。これまでフォトリック結晶としては、単一周期構造が研究の主流であったが、本論文では、さらに一歩進んだ概念として、周期の異なる複数のフォトリック結晶からなる「ヘテロフォトリック結晶」を提案し、その重要性を理論および実験より実証を行っている。得られた主な成果は次のように纏められる。

1. まず、ヘテロフォトリック結晶の基礎となる単一周期の結晶について理論および実験を行った。特に理論設計した構造をナノメートルオーダーの精度で実現するために、加工技術の検討を行い、加工揺らぎの極めて少ないナノ微細加工技術を確立した。
2. 続いて、異なる周期をもつヘテロフォトリック結晶における光の振る舞い（ヘテロ界面での透過・反射現象等）について理論解析を行うとともに、確立したナノ微細加工技術を用いて、実際にヘテロフォトリック結晶を作製し、ヘテロ界面における透過・反射特性等についての詳細な検討を行った。
3. 以上の基礎検討の後、ヘテロフォトリック結晶の具体的な応用例を3つ示し、ヘテロフォトリック結晶の有用性を示した。（Ⅰ）1.25ナノメートルという極めて小さな周期の差をもつ7つの結晶領域からなる超小型波長分合波デバイスを試作し、高い波長分解能・効率を一定に保ちながら5ナノメートルの波長間隔で多波長分合波動作を実証することに成功した。（Ⅱ）ヘテロ界面において、特定波長の光のみが反射されるという特長を利用することで、欠陥からの光取り出し効率を大幅に向上させることが可能なことを理論的に示すと同時に実験的に実証した。（Ⅲ）半導体ヘテロ構造

との類似性に着目し、ダブルヘテロフォトニック結晶を用いた微小共振器を実現した。これは2つのヘテロ界面間の微小な領域に光を強く閉じ込めることを目指したもので、実験的に約25万という世界最高のQ値をもつナノ共振器を実現することに成功した。

以上、本論文は、ヘテロフォトニック結晶の有用性とその可能性を世界に先駆けて示したものであり、学術上、實際上、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、2004年8月17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。