

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 島田 周

フォトニック結晶は、異なる屈折率（誘電率）を持つ媒質から成る周期構造体であり、結晶中には媒質の屈折率差と格子形状によって特徴づけられる光子に対するバンド構造が形成される。このバンド構造中にギャップ（フォトニックバンドギャップ：PBG）を持つフォトニック結晶は、その PBG の存在に起因する高曲率導波現象、零閾値レーザー発振、あるいはスーパープリズム現象などの特異な光学現象を発現することが知られている。フォトニック結晶の持つこれらの特異な光学特性を用いることにより、超小型光回路システムの構築が可能になると期待されている。フォトニック結晶の研究は理論計算に先導されて進められ、これまでに様々な構造を持つフォトニック結晶が作製、評価されている。その多くは、半導体リソグラフィ技術を用いた光通信波長域で動作するフォトニック結晶の作製とその光学特性に関するものであり、大きな屈折率差を持ち、且つ可視領域によく発達した PBG を持つ二次元フォトニック結晶の作製法についての報告はこれまでほとんどなされていない。本論文は、可視領域で透明、且つ高い屈折率を持つセラミック材料を用い、可視領域に PBG を持つ二次元フォトニック結晶の作製と光学特性の評価に関する研究を纏めたものであり、全5章よりなる。

第1章は序論である。フォトニック結晶の作製と光学特性に関する従来研究を調査した結果を、二次元及び三次元フォトニック結晶の次元に基づいて整理することにより、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、それまで全く報告例のなかった高屈折率物質のチタニア (TiO_2) 柱からなる二次元六方格子フォトニック結晶の作製について述べている。まず、平面展開法を用いた計算用プログラム (MIT Photonic-Bands Package) により、TE 及び TM 偏光が可視領域に PBG を持つように柱半径(r)と周期 (六方格子の格子定数: a) を求めた計算結果とゲルの焼成後の収縮率 (約 60%) を考慮して、六方格子状に円孔 ($r=90-125$ nm, $a=350-500$ nm) を形成したレジストモールドを電子線描画装置によりシリコン基板上に作製している。次いで、ゲルの亀裂発生抑制剤としてポリエチレングリコール(PEG、 $M_w=400$)を用い、チタンのアルコキシドを主成分とした前駆体溶液をモールドに充填し、その後モールド上部に形成されるゲル層をドライエッチングにより除去した後、モールドを溶解除去することにより TiO_2 -PEG 複合体から成る二次元ゲルフォトニック結晶を得ている。さらに、このゲルフォトニック結晶を $500-900^\circ\text{C}$ の温度で焼成することにより、 $r=55-70$ nm、 $a=350-500$ nm、 h (高さ) $=500-600$ nm の TiO_2 セラミックス柱からなる二次元フォトニック結晶の作製に初めて成功している。走査型電子顕微鏡 (TEM) による解析から、 500°C で焼成したセラミックス柱は粒径 ~ 9 nm のアナターゼ微結晶からなり、また、 900°C で焼成したものはルチル微結晶から構成されていることを確認している。

第3章では、チューナブルフォトニック結晶作製のための基礎研究として、代表的な強誘電体物質である BaTiO₃ のセラミックス柱から成る二次元フォトニック結晶の作製について述べている。基本的に TiO₂ フォトニック結晶の作製と同じ方法を用いて BaTiO₃ フォトニック結晶の作製を行っているが、Ba,Ti アルコキシド溶液に PEG ($M_w=400$) を添加し、これに部分加水分解のための水を少量添加したものを前駆体溶液として用いている。さらに、BaTiO₃ の場合、Si は BaTiO₃ ゲルの焼成過程で反応を起こすため基板として不適であり、基板としては MgO 単結晶が適していることを明らかにし、MgO 単結晶基板を用いることにより BaTiO₃ 単相のセラミックス柱から成る二次元フォトニック結晶 ($r=85$ nm, $a=450$ nm, $h=500$ nm) の作製に初めて成功している。また、高分解能 TEM による解析から、800°C で焼成したセラミックス柱は粒径~13 nm の微結晶から構成され、その粒子の格子間隔は約 0.4 nm であることを明らかにしている。

第4章は、作製した TiO₂ 及び BaTiO₃ セラミックフォトニック結晶の光学特性の評価について述べている。また、導波構造を持つフォトニック結晶の作製を目指したメソポーラスシリカ薄膜上への TiO₂ フォトニック結晶の合成とその光学特性についても検討している。TiO₂ 及び BaTiO₃ フォトニック結晶については、結晶が導波構造（コアクラッド層構造）をとっていないため透過光による測定が困難であり、反射測定によるバンドギャップ構造の評価を行っている。その結果、TiO₂ フォトニック結晶 ($r=56$ nm, $a=400$ nm; $r=72$ nm, $a=450$ nm) の Γ -M 方向における TE 及び TM 偏光に対して可視領域の 1.8-1.9 eV 付近に強い反射ピークが観測され、計算結果とほぼ一致した結果が得られ、これらの二次元フォトニック結晶は可視領域に PBG を持つことを確認している。BaTiO₃ フォトニック結晶 ($r=86$ nm, $a=450$ nm) についても Γ -M 方向の TE 及び TM 偏光に対して、可視領域の 1.60-1.64 eV 付近に強い反射ピークが見られ、同じく可視領域に PBG を持つことを確認している。また、クラッド層として機能するメソポーラスシリカ薄膜上に二次元 TiO₂ セラミックフォトニック結晶 ($r=60$ nm, $a=350$ nm) の作製にも初めて成功しており、透過法による光学特性の評価も行っている。その結果、TM 及び TE 偏光の両方に対して、 Γ -M 及び Γ -K 方向で 1.8-2.0 eV 付近に PBG 持つことを強く示唆する結果を得ている。

第5章は、本論文の総括である。

以上のように、本論文は、ゾルーゲル法とレジストモールドを用いた全く新しいセラミックフォトニック結晶の簡易合成法を提案しており、電子セラミックス材料におけるフォトニック結晶の合成と物性に関する研究の進展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。