

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 青木 剛

近年、ユビキタス社会の実現に向けた情報通信装置のさらなる小型高集積化および高信頼高速処理技術の開発が強く望まれており、これらの技術開発に重要な役割を果たすデバイスの一つとしてフォトニック結晶(PC)が注目されている。PCは、異なる誘電率(屈折率)を持つ誘電体から成る周期構造体であり、結晶中に光子に対するエネルギーバンド(フォトニックバンド)が形成される。そのフォトニックバンド構造中にギャップ(PBG)を持つ結晶は、そのPBG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示すことが知られている。最近、超小型光回路システムの構築を目的として、このような光学特性に外部場によるチューナブル機能を付与したPCの開発研究が活発に行われている。本論文は、材質として大きな電気光学効果と高い透光性を持つチタン酸ジルコン酸ランタン鉛((Pb,La)(Zr,Ti)O₃: PLZT)を用い、電界制御型二次元チューナブルPCの開発に関する基礎研究を纏めたものであり、全6章よりなる。

第1章は序論である。将来の情報通信装置のキーデバイスとして期待されるPCの果たす機能と役割、さらに高度な機能を有するチューナブルPCの作製のための強誘電体の微細加工技術の現状に触れ、本研究の目的について述べている。

第2章では、ロッド型およびエアホール型二次元PCのフォトニックバンド構造の計算を行い、媒質としてPLZT強誘電体を用いた場合、その電気光学効果によるチューナブル特性の賦与の可能性について論じている。フォトニックバンド構造の計算は、自由使用が許可されているMITフォトニックバンドパッケージを用い、媒質(PLZT)の誘電率(屈折率の2乗)と三角格子状に配列されたロッド(エアホール)の半径 r とその周期 a の比(r/a)、さらに偏光様式(TEおよびTM)と結晶格子内における光の進行方向(Γ -M, Γ -K 方向)を指定して行い、得られた結果からバンドギャップアトラス(PBGの発生帯域を光の規格化周波数を縦軸、 r/a を横軸にして表示したグラフ)を作成している。このバンドギャップアトラスから、70 MV/mの電界印加によるチューナブル幅の見積を行い、チューナブル特性を賦与したPLZT二次元PCの作製が可能であることを明らかにしている。

第3章は、第2章で行ったロッド型およびエアホール型二次元PCの構造設計を基に、ゾルゲル法および電子線(EB)レジスト鋳型を用いた微細エピタキシャルPLZT周期構造の作製に関して、自ら開発したプロセスについて報告している。具体的には、導電性Nb添加SrTiO₃単結晶(Nb:STO)基板上に、電子線描画装置を用いて r/a 比を系統的に変化させた厚さ1 μm のレジスト鋳型を形成し、これらのレジスト鋳型にPbを10 mol%過剰添加した市販のPLZT(組成:Pb/La/Zr/Ti=110/9/65/35)溶液をスピコート法によりキャストし、乾燥後、鋳型上に形成されたゲル層の除去、レジスト鋳型の溶解除去

後、所定の条件で焼成することにより目的とするPLZT周期構造の作製を行っている。このプロセスでは鋳型上部ゲル層の除去と乾燥ゲルの焼成が決定的に重要な部分であり、著者自らが開発した手法・技術により目的とする微細周期構造の作製に成功している。即ち、前者では、通常行われるドライエッチング法は不適であり、特定の研磨剤と分散液を用いた機械的研磨法が適していることを、また、後者については、3種類の焼成プロセスを試み、Nb:STO基板上にPLZTロッドおよびエアホール膜をエピタキシャル成長させることが可能な焼成条件を見出している。著者は、X線回折および透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた詳細な解析により、従来報告例のないゾルゲル法の一段焼成によるPLZTロッドのエピタキシャル成長に成功したことを明らかにしている。著者はまた、PLZTロッドゲルの直径が特定の値(この実験では1 μm)をとるときエピタキシャル成長の程度が最大となる現象を見出し、その現象をPLZTと基板の熱膨張係数差によるロッドの剥離およびPbの揮発による組成変化の観点から説明している。

第4章では、Nb:STO基板上にPLZTロッド型およびPtコートMgO (Pt/MgO)単結晶基板上にエアホール型PCを作製し、これらのPCの電気的および光学的特性の測定結果について述べている。ロッド型PCは、高さ900 nmで半径(r nm)と周期(a nm)がそれぞれ($r=120, a=600$), ($r=100, a=700$), ($r=100, a=800$)の3種類のを、エアホール型については、厚さ200 nmのPLZT膜中に($r=270$ nm, $a=400$ nm)および($r=330$ nm, $a=450$ nm)のエアホールが形成された2種類のを作製し、それらの結晶の波長400-1100 nmにおける光学反射スペクトルを測定している。その結果、いずれのPCにおいても計算によって求められた周波数帯に反射ピークが観測され、作製したPCが明確なPBGを持つことを明らかにしている。また、PLZTロッドとエアホール薄膜に対して走査マイクロプローブ(SPM)による圧電ヒステリシス特性の測定を行い、いずれのPCも明確なバタフライカーブを示し、強誘電性を持つことを明らかにしている。

第5章は、Nb:STO基板上に作製したPLZTロッド型PC($r=80$ nm, $a=450$ nm, 高さ=500 nm)のロッド間に透明樹脂を充填し、その上部に透明ITO電極を形成したPCのチューナブル特性を評価した結果について述べている。作製した樹脂充填PCは Γ -M方向のTM偏光に対し、PBGに起因する反射ピークを示し、その中間位置は30 Vの電圧印加により約3 nm短波長側にシフトしているのが確認された。この実験結果から、チューナブルPBG特性を賦与したPLZTフォトニック結晶の作製が可能であることを実証している。

第6章は、本論文の総括である。

以上のように、本論文は、ゾルゲル法による強誘電体PLZT二次元チューナブルフォトニック結晶の新規作製法を提案しており、無機機能材料の微細パターンニングと強誘電体フォトニック結晶の作製に関する材料工学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。