

氏 名	お 小 川 しん べい
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2521 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 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	3次元フォトニック結晶による発行制御に関する研究

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

3次元フォトニック結晶は、全ての方向において光の存在を禁止する完全フォトニックバンドギャップ(PBG)をもつため、完全な光制御が可能であると期待されてきたが、これまでその実証例はなかった。本研究は、この3次元フォトニック結晶による発光制御を世界で初めて実証した結果をまとめたものであり、6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景として、光制御の現状からフォトニック結晶に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章においては、3次元フォトニック結晶の基本理論と基礎作製方法について述べている。ウエハ融着や高精度位置合わせを用いた3次元フォトニック結晶の高度な作製方法について詳細に述べられている。次に、実際に作製した3次元フォトニック結晶単体の光学特性評価を行った結果から、光通信波長域である $1.55\mu\text{m}$ 帯において完全PBGが存在していることを実証している。また、作製上、非常に重要な要素である構造ゆらぎが生じた場合の光学特性への影響について検討している。ストライプの位置ずれが生じた試料を作製し、そのPBG構造を評価した結果、大きな構造ゆらぎが生じた場合においても、完全PBGが存在していることから、ストライプ積層型3次元フォトニック結晶が、構造ゆらぎに強いことを示している。また、4層構造においてゆらぎの大きな試料を用い、8層構造を作製し、光学特性における構造ゆらぎの影響の変化を評価している。結果、構造ゆらぎの影響が多層化によって小さくなることを実証している。これらの結果は、ストライプ積層構造3次元フォトニック結晶がデバイス化などに非常に有利であることを明示している。

第3章においては、3次元フォトニック結晶による発光制御を実証するために、発光体の導入について述べている。発光体の導入においては、InP/InGaAsPで構成される発光体と、GaAsで構成されるフォトニック結晶の融着、つまり、従来は行われていなかった異種材料融着が必要となることが示されている。そして、詳細な融着実験の結果、異種材料融着において、ウエハの接合を阻害している原因が、それぞれの基板材料の熱膨張係数が異なることに起因する熱膨張ストレスであることを、超音波走査型顕微鏡(SAM)を用いることによって直接的に示している。次に、SAMによって観察した各加熱温度における実際の融着界面の状態と、数値解析による歪エネルギー(熱膨張ストレス)を比較・検討し、歪エネルギーがウエハ同士の接合エネルギーを上回る臨界温度を求めている。また、熱膨張ストレスの物理的な検討から、熱膨張ストレスが基板の厚さにほぼ比例することを見出し、基板の厚さに対する臨界加熱温度を求めている。最終的に、段階的に基板を薄膜化しつつ、加熱温度を上昇させ、次第に融着強度を高めていく異種材料融着技術を新たに考案しており、この方法を用いて、ストライプ型発光体ならびに欠陥を導入した5層ならびに9層3次元フォトニック結晶の作製に成功したことが示されている。

第4章においては、発光体を導入した5層ならびに9層3次元フォトニック結晶の発光特性を評価した結果について述べている。フォトニック結晶内の発光体における発光特性を様々な方向において評価することにより、完全PBGの効果により、内部の発光が、全ての方向にわたって抑制されていることが実証されている。また、積層数を増加させることによって、

PBG による発効の抑制効果が大きくなることを示し、3次元フォトリック結晶がフィルタ的な役割ではなく、一種の「場」として発光に作用している可能性が高いことが示されている。

第5章においては、3次元フォトリック結晶中における欠陥の特性について述べている。3次元フォトリック結晶中の欠陥領域における発光特性を評価することにより、欠陥が共振器として作用し、形成されるモードは欠陥の形状により、制御可能であることが実証されている。また、3次元フォトリック結晶中の欠陥共振器は、Q値が欠陥体積にほぼ依存せず、積層数によって大きく決定されるという、優れた共振器特性をもつことが実証されている。一般に、モード数を削減するためには、共振器体積を小さくしなくてはならず、必然的にQ値の減少を招いてしまう。しかし、3次元フォトリック結晶を用いた欠陥共振器においては、Q値を低下させることなく、モード数の減少が可能となることが示されている。また、実際に、9層構造において完全PBG波長域にほぼ単一モードをもつ微小欠陥共振器の実現に成功している。

第6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、全ての方向において光の存在を禁止する完全フォトリックバンドギャップ(PBG)をもつ3次元フォトリック結晶を用いた発光制御の実証を行った結果を纏めたものである。3次元フォトリック結晶は、これまで完全な光制御を期待されながら、作製の困難さから長年実現されていなかった。本研究で得られた主な成果は次のように纏められる。

1. ウエハ融着法によるストライプ積層型3次元フォトリック結晶の作製方法を確立し、光通信波長域である $1.55\mu\text{m}$ 帯において完全PBGをもつことを実証している。
2. 完全PBGに与える構造ゆらぎの影響について詳細な検討を行っている。ストライプの位相関係にゆらぎが生じた場合、ストライプ形状にゆらぎが生じた場合についてそれぞれ光学特性評価を行い、ストライプ積層型3次元フォトリック結晶が構造ゆらぎの影響を受けにくいことを示し、大きなゆらぎが生じた場合でも、積層数を増加させることにより、その影響はさらに小さくなることを実験的に示している。
3. 3次元フォトリック結晶を用いた発光制御に不可欠な発光体ならびに欠陥共振器の導入方法について詳細な検討を行っている。特に、発光体とフォトリック結晶の融着を阻む原因が、それぞれの基板材料の熱膨張係数の差による熱膨張ストレスであることを突き止め、実験的・理論的な詳細な検討によって、基板薄膜化により、回避することが可能であることを実証している。最終的に、基板薄膜化と低温加熱を用いた異種材料融着技術を開発し、発光体ならびに欠陥共振器を9層フォトリック結晶に導入することに成功している。これらの詳細な融着技術の検討は、他分野にとっても非常に意義深いと認められる。
4. 3次元フォトリック結晶に発光体と欠陥共振器を導入した試料について発光特性を評価することで、次のことを実証している。完全PBGによって、全ての方向において発光が抑制されること。また、欠陥を導入することによって、欠陥が共振器として作用し欠陥モードが形成されること。欠陥モードの数・波長は、欠陥の形状によって任意に制御が可能であること。3次元フォトリック結晶中の欠陥共振器は、特異な3次元共鳴によって形成されているため、Q値は積層数に大きく依存し、共振器体積を減少させてもQ値の低下を招かないという優れた共振器特性をもつこと。

以上、本論文は、3次元フォトリック結晶による発光制御を世界に先駆けて実証したものであり、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、2005年2月16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。