

京都大学	博士 (工学)	氏名	山田 翔太
------	---------	----	-------

論文題目	ワイドバンドギャップ半導体 SiC を用いたフォトニック結晶に関する研究
------	--------------------------------------

(論文内容の要旨)

本論文は、次世代の光材料であるフォトニック結晶の応用範囲を飛躍的に拡張することが可能とされる、ワイドバンドギャップ半導体材料「シリコンカーバイド (SiC)」に着目し、これを用いた新たなフォトニック結晶の設計・作製手法の確立およびその実証を行った結果をまとめたものであって、全7章から構成される。

フォトニック結晶とは、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(PBG)を有するという特徴をもつ。さらに、この PBG 内に人為的な欠陥を導入することにより、自在な光制御が可能になるものとされ、例えば欠陥を点状に設ければ、光の波長程度の大きさの非常に小さな共振器が実現できることが知られている。近年、光通信帯域において、高い光閉じ込め性能数 (Q 値) をもつ Si フォトニック結晶ナノ共振器が実現されており、光メモリや超小型波長フィルタ、高感度センサー、高効率非線形光素子などへの応用研究も盛んに行われている。その一方で、材料の電子バンドギャップに起因する根本的な限界も明らかになりつつあり、例えば、高 Q 値ナノ共振器に対して強いパワーの光を導入すると、二光子吸収が支配的となり、光の損失や共振特性の変化が生じることが知られている。あるいは、可視光に対してはバンド間遷移の吸収があるため、パッシブ機能素子の可視領域への応用は困難である。

本論文では、上述のような材料に起因する課題を解決するために、新たにワイドバンドギャップ半導体材料である SiC をフォトニック結晶材料として用いることを提案し、世界初の実証に成功している。また、単なる実証のみに留まらず、従来の材料では成し得なかった可視領域を含めた波長 550 ~ 1450 nm に渡る超広帯域動作、多光子吸収抑制による従来材料の約 100 倍以上のハイパワーに対する安定動作、さらには第二高調波発生・和周波発生による波長変換など、SiC フォトニック結晶の様々な応用可能性をも示している。

第1章は序論であり、研究背景として、従来の Si 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、フォトニック結晶の材料として SiC 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、2次元 SiC フォトニック結晶について概説をした後、代表的な素子である導波路とナノ共振器の構造について述べられている。2次元フォトニック結晶においては、スラブを構成する誘電体と空気との屈折率差がフォトニック結晶としての性能を決める重要な要素となる。しかしながら、SiC は、従来の材料と比較して屈折率がやや小さいため、2次元フォトニック結晶としての性能が劣る可能性がある。そこで、3次元時間領域有限差分法(FDTD法)を用いた理論計算により、SiC を用いた2次元フォトニック結晶の実現可能性を調べ、導波路およびナノ共振器の設計を行い、従来材料と比較しても十分な性能が得られることを示している。

第3章では、SiC フォトニック結晶の作製プロセスの開発について述べられている。SiC は Si に比べて一般に加工が難しいため、SiC フォトニック結晶の作製プロセスには数多くの難点が存在する。そこで、フォトニック結晶パターンマスクやエッチン

グ条件などを見直すことにより、SiC フォトニック結晶の作製方法を新たに確立している。さらに作製した 2 次元 SiC フォトニック結晶微細導波路およびナノ共振器の光学特性の測定・評価を行い、PBG や導波路、共振器といった基本特性の実証に成功している。さらに、SiC フォトニック結晶共振器に関して、動作の温度依存性を評価し、従来の Si フォトニック結晶と比較して温度変化による波長変化量が 1/3 倍程度小さいことを確認している。

第 4 章では、SiC が可視領域においても透明である点に着目し、赤外領域から可視領域までの広波長帯域での動作を狙って、フォトニック結晶導波路・共振器結合系の設計・作製・光学特性評価を行っている。一般に、フォトニック結晶のスケーリング則に従って、その格子定数を変化させることにより、動作波長を変化させることができるが、同時に空気孔の半径やスラブの厚さといったパラメータも変化させることを意味し、スラブ厚さをフォトニック結晶の格子定数に合わせて特定の部分だけを変化させることは困難である。そこでまず、理論解析により、スラブ厚さを一定にして格子定数 a を様々に変化させた場合でも、導波路・共振器結合系が正常に動作することを確認した上で、実際に格子定数 a を様々に変化させたフォトニック結晶を作製し、波長 550 ~ 1450 nm という従来の材料では成し得なかった非常に広帯域において、同一基板上に導波路・共振器結合系を実現することに成功している。

第 5 章では、SiC フォトニック結晶共振器における二光子吸収の抑制の可能性について述べている。これまで、Si を用いた高 Q 値フォトニック結晶ナノ共振器においては、極微小領域に光が強局在するため、二光子吸収が支配的になり、光の損失や共振特性の変化が起こってしまうことが知られている。しかし、本論文で用いた SiC は十分大きい電子バンドギャップを有するため、光通信帯域の光に対して二光子吸収は起こらないと期待される。そこで、非常に大きなピークパワーをもつ超短光パルスレーザーを用いて、入力する光エネルギーを変化させながら、SiC および Si フォトニック結晶共振器の光学特性を比較・検討を行っている。その結果、SiC を用いることによって、二光子吸収が十分に抑制され、少なくとも Si の約 100 倍の入力エネルギーに対しても安定に動作できることを示している。また、その測定結果の考察にあたっては、共振器内における多光子吸収の理論モデルを立てることにより、実験事実を明快に説明できている。

第 6 章では、SiC がもつ二次の非線形係数を利用し、微小領域に高エネルギーの光が集中する高 Q 値フォトニック結晶共振器において、第二高調波発生や和周波発生などの光波混合が実現できることを述べている。まず、第二高調波発生について、用いる共振器構造によって、第二高調波の放射パターンや偏光特性がどのように変化するかを調べ、かつ 3 次元 FDTD 法による理論解析と比較して考察を加えている。また、共振器内における波長変換の理論モデルを構築・解析し、変換効率を高めるための指針を示している。さらに発展として、フォトニック結晶共振器の基本および高次の光閉じ込めモードを利用し、和周波発生をも観測することに成功しており、また、用いる高次モードを選択することによって、観測される和周波の特性がどのように変化するかについても検討している。

第 7 章では、本研究で得られた知見を総括し、さらに今後の研究課題と展望を述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、次世代の光材料であるフォトニック結晶の応用範囲を飛躍的に拡張することが可能とされる、ワイドバンドギャップ半導体材料「シリコンカーバイド(SiC)」に着目し、これを用いた新たなフォトニック結晶の設計・作製手法の確立およびその実証を行った結果をまとめたものである。本論文において、得られた主な成果は次のとおりである。

1. SiCを用いたフォトニック結晶を設計し、新たに作製手法の開発を行った。得られた設計を基に、実際にSiCフォトニック結晶を作製し、その光学特性評価を行った結果、光通信帯域(1.55 μm 帯)において約 200 nm 程度の PBG 領域、約 100 nm の導波帯域をもつ導波路や Q 値約 10000 をもつ共振器が得られ、SiC を用いて初めて2次元フォトニック結晶を実証した。
2. ワイドバンドギャップをもつ SiC は可視領域においても透明であり、フォトニック結晶の可視領域への応用が可能である。格子定数 a を 150 nm から 600 nm まで 25 nm 間隔で様々な変化させたフォトニック結晶を作製し、かつそれを評価するための新たな可視光学系をも構築した。光学特性評価の結果、波長 550 ~ 1450 nm という従来の材料では成し得なかった非常に広帯域において、同一基板上に導波路・共振器結合系を実現することに成功した。
3. SiC フォトニック結晶共振器における二光子吸収の抑制の可能性について、検討を行った。入力する超短光パルスのエネルギーを変化させながら共振器特性を評価し、Si フォトニック結晶共振器との比較を行った。その結果、SiC を用いることによって、二光子吸収が十分に抑制され、少なくとも Si の約 100 倍の入力エネルギーに対しても安定に動作できることが明らかとなった。また、その測定結果の考察にあたっては、共振器内における多光子吸収の理論モデルを立てることにより、実験事実を明快に説明することにも成功している。
4. SiC がもつ二次の非線形係数を利用し、SiC フォトニック結晶共振器において、初めて第二高調波発生を観測することに成功した。また、用いる共振器構造によって、第二高調波の放射パターンや偏光特性が異なることを見出し、かつ3次元 FDTD 法を用いた理論計算により、その実験事実を良く説明できていることを示した。さらに発展として、SiC フォトニック結晶共振器において、和周波発生をも観測することに成功しており、また、利用する高次モードを選択することで和周波の偏光特性が異なることを見出した。

以上のように、本論文は、世界的に見ても先駆的かつ学術的インパクトが高く、SiC フォトニクスとも言うべき、これまでにない新たな光分野の萌芽となるものと評価でき、学術上、實際上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、平成 25 年 1 月 31 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。