

多光束フェムト秒パルス干渉露光法による フォトリック結晶作製手法の開発

学位論文内容の要旨

近年、文字だけの e メールはもちろん、画像や動画、音楽など数メガバイトから数百メガバイトにおよぶ情報を送受信することは珍しくない。このような情報社会をむかえることは古くから予測されており、1960 年代には大容量通信を目指した光通信の研究が始まっている。現在では $1.55\ \mu\text{m}$ 帯において損失が $0.2\ \text{dB/km}$ の低損失光ファイバーと出力の安定した半導体レーザーが開発され、光通信網は着実に整備されつつある。

しかし、本当の意味での大容量(テラビット級)光通信は波長多重(WDM)技術で達成される。波長多重技術とは、1本の光ファイバーに波長の異なる複数の光を重ねて伝送する技術で、柔軟な光ネットワークを構築するためには 1000 波の多重数が必要とされる。信号光の高密度多重化には、実用的な観点から信号光は少なくとも $0.2\ \text{nm}$ の波長間隔に分離されていなければならない。このような光ネットワーク網を実現するためには、 $0.2\ \text{nm}$ 以下という極めて狭いスペクトルの単一モード発振レーザーや、そのスペクトル幅に波長を分離できる波長フィルタ、そして1波長ごとの光信号を電気信号に変換することなく任意に分岐挿入できる光スイッチングシステム等の開発が求められており、これら次世代光デバイスの構成要素としてフォトリック結晶が注目を集めている。

フォトリック結晶は、比誘電率の異なる2種類以上の物質が光波長程度の周期に規則正しく配列された人工結晶で、その周期に対応した波長帯域の電磁波の透過を禁止する。この透過の禁止された波長帯域はフォトリックバンドギャップ(PBG)と呼ばれている。物質を光波長程度の周期で3次的に配列することは技術的に困難であるため、フォトリック結晶の作製手法は未だに確立されていない。しかし、半導体微細加工技術を応用した作製手法は数多く報告されている。半導体微細加工技術は数十 nm の優れた加工分解能を有するが、この技術は根本的に2次元加工を目的として開発されたもので、3次元周期のフォトリック結晶作製に適していない。このため作製には煩雑な繰り返し作業が必要になり、作製作業の完了まで数日かかる。そこで本研究は、光の干渉が作り出す3次元周期的光強度分布をネガ型フォトレジストへ転写露光することで、より簡便に短時間

で3次元フォトニック結晶を作製できる手法の開発を目的とした。

本研究では、ネガ型フォトレジストへ2光子吸収(TPA)を誘起するため、再生増幅フェムト秒パルスレーザーを干渉光源に使用した。2光子吸収を利用すれば光の回折限界を超える加工分解能が得られる。最初に、多光束フェムト秒パルス干渉を容易に達成できる多光束フェムト秒パルス干渉光学系システムを構築した。そして、5光束干渉で形成された周期的光強度分布をネガ型フォトレジストに数秒から数十秒間転写露光することで、約 $200\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$ の体積を持つ体心正方格子フォトニック結晶の作製に成功した。作製したフォトニック結晶の光学特性を顕微フーリエ赤外分光装置で測定したところ、約 $3\text{ }\mu\text{m} \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ の波長帯域に PBG が確認された。その他、3光束干渉、4光束干渉では2次元フォトニック結晶の作製に成功した。6光束干渉、8光束干渉では複雑な周期を有する2次元フォトニック結晶の作製にも成功した。そして、適切な位相制御を施した5光束干渉によるダイヤモンド格子の周期的光強度分布の形成が、CCD カメラの観察結果から明らかになった。

本論文は6章から構成されている。以下に各章の概要を述べる。

1章では、フォトニック結晶とフォトニックバンドギャップに関する解説をした。また、これまでに報告されているフォトニック結晶作製手法の中で、代表的な数種類を紹介した。その上で本研究を行う意義・目的について述べた。

2章では、可干渉距離の短さから一般的に干渉させることが困難なフェムト秒パルスの多光束干渉を容易に達成できる「多光束干渉光学系」について説明した。特に、多数の周波数成分を含むフェムト秒パルスが分散のある媒質を透過することで生じる群速度分散や、位相速度と群速度の差について議論している。

3章では、2光束干渉から8光束干渉まで7種類の光束の組み合わせで、どのような周期的光強度分布(干渉パターン)が形成されるのかコンピュータでシミュレーションを行った。光束間に任意の位相差がある場合についても考察した。シミュレーション結果から、どの光束の組み合わせで形成される周期的光強度分布が、ネガ型フォトレジストの中から周期性を崩さずに取り出せるのかを予測出来る。

4章では、多光束フェムト秒パルス干渉で作製したフォトニック結晶の構造解析結果を示した。転写露光時のパルスエネルギーや露光時間、そして光束間の位相差が周期構造や周期の形成領域にどのような影響を与えるのか、4光束干渉で作製した2次元フォトニック結晶について詳しく述べた。5光束干渉で作製した体心正方格子フォトニック結晶の構造解析結果も行った。

5章では、顕微フーリエ赤外分光装置を使用して、5光束干渉で作製した体心正方格子のフォトニック結晶の光学特性を測定し、計算から得られたフォトニックバンド図と比較した。その結果、計算と一致する波長帯域に PBG が得られたことが分かった。

6章では、これまでの研究成果をまとめて総括とし、今後改善すべき点を挙げそれらに対する方策を提案した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 澤 弘 明

副 査 教 授 末 宗 幾 夫

副 査 教 授 笹 木 敬 司

副 査 助 教 授 Saulius Juodkazis

学 位 論 文 題 名

多光束フェムト秒パルス干渉露光法による

フォトニック結晶作製手法の開発

フォトニック結晶は、比誘電率の異なる2種類以上の物質が光波長程度の周期に規則正しく配列された人工結晶である。フォトニック結晶の示す性質で最も重要なものは、ある波長領域の光の伝搬を禁止することである。そのような波長領域をストップバンド(SB)と呼び、特にあらゆる方向や偏光で禁止する波長領域をフォトニックバンドギャップ(PBG)と呼ぶ。現在、半導体微細加工技術を応用した2次元フォトニック結晶の作製手法は数多く報告されているが、本質的に2次元加工技術であるため、3次元周期のフォトニック結晶作製には適していない。このため作製は長時間におよぶ煩雑な繰り返し作業を必要とする。本論文では、光の干渉が作り出す3次元の周期的光強度分布に着目し、それをネガ型フォトレジストに転写露光することにより、より簡便に短時間で3次元フォトニック結晶を作製することが可能な新しい方法論の開発と作製したフォトニック結晶の光学特性の評価に関する研究を行っている。

本研究では、ネガ型フォトレジストへ2光子吸収(TPA)を誘起するため、再生増幅フェムト秒パルスレーザーを干渉光源に使用している。2光子吸収を利用すれば光の回折限界を超える加工分解能が得られる。最初に、多光束フェムト秒パルス干渉を容易に達成できる多光束フェムト秒パルス干渉光学系システムの構築を行っている。そして、5光束干渉で形成された周期的光強度分布をネガ型フォトレジスト(SU-8)に数秒から数十秒間転写露光することで、約 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ の体積を持つ体心正方格子フォトニック結晶の作製に成功している。作製したフォトニック結晶の光学特性を顕微フーリエ赤外分光装置で測定したところ、約 $3\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$ の波長帯域に SB が確認されている。その他、3光束干渉、4光束干渉、6光束干渉、そして8光束干渉により2次元周期構造物の作製も行っている。そして、適切な位相制御を施した5光束干渉によりダイヤモンド格子の周期的光強度分布の形成に成功している。

本論文は以下の6章から構成されている。

1章では、フォトニック結晶とフォトニックバンドギャップに関する解説がなされており、代表的なフォトニック結晶作製手法を紹介している。その上で本研究を行う意義・目的が述べられている。

2章では、可干渉距離の短さから2光束以上の干渉が一般的に困難とされるフェムト秒パルス

の多光束干渉を容易に達成できる「多光束干渉光学系の構築」について説明されている。特に、多数の周波数成分を含むフェムト秒パルスが分散のある媒質を透過することで生じる群速度分散や、位相速度と群速度の差についての議論がなされている。

3章では、2光束干渉から8光束干渉まで7種類の光束の組み合わせで形成される周期的光強度分布(干渉パターン)のシミュレーションを行っている。光束間に任意の位相差がある場合についても考察している。

4章では、1次元、2次元周期構造物、そして3次元フォトニック結晶の作製手法について述べている。特に4光束干渉において、露光パルスエネルギーや露光時間、光束間の位相差が、周期構造や周期の形成領域にどのような影響を与えるのかを SEM 観察結果から詳しく述べている。

5光束干渉で作製したフォトニック結晶の構造解析も行っている。

5章では、顕微フーリエ赤外分光装置を使用して、5光束干渉で作製した体心正方格子のフォトニック結晶の光学特性を測定し、計算から得られたフォトニックバンド図と比較している。その結果、計算と一致する波長帯域にPBGが得られたことが示されている。

6章では、これまでの研究成果をまとめて総括とし、今後改善すべき点を挙げそれらに対する方策が提案されている。

これを要するに、一般的に困難とされる2光束以上のフェムト秒パルスを容易に干渉させることのできる多光束干渉光学系を構築するとともに、多光束干渉で形成される周期的光強度分布をシミュレーションから予測し、多光束干渉で形成された周期的光強度分布をネガ型フォトレジストへ転写露光することで、短時間で簡便に2次元周期構造および3次元フォトニック結晶を作製する手法の開発に成功していることから、著者の研究が光量子エレクトロニクスの分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。