

平成 22 年 6 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560039

研究課題名（和文）干渉露光による 3 次元フォトニック結晶欠陥導波路の形成に関する研究

研究課題名（英文）Study on fabrication of defect waveguide in three-dimensional photonic crystals by holographic lithography

研究代表者

小野 雄三（ONO YUZO）

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：90319492

研究成果の概要（和文）：

干渉露光法で形成した 3 次元フォトニック結晶中に欠陥を導入して導波路とする光導波路の形成方法を提案し、実証した。2 光束干渉の 3 重露光法を提案開発し、この手法で面心立方格子および、これを 1/4 周期ずらして重畳することでダイヤモンド構造結晶も形成した。干渉露光で形成した 3 次元フォトニック結晶の透過率解析を実効屈折率法で行い、波長に対する透過率の曲線中に、フォトニック結晶の特徴であるバンドギャップが出現したことを確認した。

研究成果の概要（英文）：

Fabrication method of waveguides where embedded defects in three-dimensional photonic crystals function as waveguides fabricated by holographic lithography was proposed and demonstrated. Fabrication method of three-dimensional photonic crystals by triple-exposure of two-beam interference fringes was also proposed and developed. By using this method face-centered cubic lattice and diamond structure crystal which consists of two face-centered cubic lattices which are shifted in a quarter lattice constant were fabricated. Transmission analysis of three-dimensional photonic crystal fabricated by holographic lithography was done by effective medium theory. As a result, photonic band-gap was appeared in the transmission versus wavelength curve.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	3,300,000	990,000	4290,000
2008 年度	300,000	90,000	390,000
2009 年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：工学（応用光学）

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、細目：応用光学・量子光工学

キーワード：光エレクトロニクス、フォトニック結晶、ホログラフィック・リソグラフィ、干渉露光、光導波路

1. 研究開始当初の背景

3 次元フォトニック結晶の形成方法として

は、微細加工プロセスにより1次元格子を交互に交叉して積層する wood-pile 型と、自己配列により微小球を配列させた opal 型が多いが、前者では加工精度、加工工数からの制約から、また後者では配列の再現性・信頼性が高くないことから、いずれもフォトニック結晶の特性を十分発露したものは得られていない。一方、最近バイアスパattering法や、多光子吸収による3次元マイクロファブリケーション法、多光束干渉露光法が提案されて、フォトニック結晶の特性が発露するようになってきた。しかし、まだ、積層する層数や、結晶の大きさに制約があり、応用を視野に入れるところまでは来ていない。本研究の提案者も、4光束干渉露光法とX線リソグラフィー法を立ち上げてきた。特に前者については、理論面も十分構築してきた。しかし、4光束ということまで光学系が複雑で形成できる結晶系に制限がある。この研究の過程で、最も単純な2光束干渉で感光体を2軸に回転して多重に露光することで、3次元フォトニック結晶を形成できるという着想を得、特許出願した。2光束干渉は偏光も完全に同一に出来、変調度も100%に出来る上、光パワーロスも少ないので、大型でフォトニック原子形状のクリアな結晶形成が期待できる。

一方、フォトニック結晶中に周期構造を壊した欠陥導波路を形成する方法としては、多光子吸収を用いて局部的に周期構造を破壊することが提案されているが、導波路としての成果は出ていない。最近、3次元フォトニック結晶の多光束干渉形成法において、ネガ型フォトレジスト層の表層を電子ビームで露光して導波路パターンを硬化させ、その上にさらに同じフォトレジストを塗布した後、多光束干渉露光で全体を露光して3次元フォトニック結晶を形成する方法が提案されている。本研究提案者は、これまでの4光束干渉露光法の開発の過程で、感光体の波長特性を改善してきた。すなわち、350~400nmで感光特性が最適化されたSU-8フォトレジストを長波長で露光出来るようにした。SU-8フォトレジストは350nmより短波長で露光すると、光吸収が大であるため、表層のみが露光される。この特性を用いて、325nmを光源とするフォトリソグラフィーで導波路パターンを表層に硬化形成し、その上にさらに同じフォトレジストを塗布した後、350nm以上の波長を用いた2光束干渉露光の多重露光で全体を露光して欠陥導波路が埋め込まれた3次元フォトニック結晶を形成する方法を着想した。

本研究は、新規な方法としてUVリソグラフィーと、2光束干渉露光の多重露光を用いることで、層数や結晶の大きさを導波路に応用可能なものにしようとするものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、本研究の提案者の出願特許を基に、実用的な結晶サイズと量産性があり将来に於いて工業化の可能性のある、3次元フォトニック結晶の形成方法を実現するとともに、その光学デバイス応用としてこれに欠陥導波路の形成を実現することにある。

より具体的には、a)結晶サイズの大形化とフォトニック原子形状をより鮮明に形成することを目的に2光束干渉の多重露光法による3次元フォトニック結晶の形成方法を確立すること、b)この方法で形成できる面心立方格子の格子点位置を1/4周期ずらして重畳して形成することで、完全バンドギャップの期待できるダイヤモンド構造のフォトニック結晶の形成方法を確立すること、c)2層構造のフォトレジストの層間にUVリソグラフィーであらかじめ欠陥導波路パターンを形成した後、全体を3次元フォトニック結晶になるように露光する欠陥導波路の形成方法を確立することの3点である。

3. 研究の方法

平成19年度の計画

- ・ 本方法では、高アスペクト比のネガ型フォトレジストとして、SU-8フォトレジストを用いる。3次元フォトニック結晶を干渉露光で形成する波長は感光特性から350~400nmであることが必要なため、設備備品費にあげた、波長363.8nmのアルゴンレーザを導入する。
- ・ 導入したアルゴンレーザを光源として、既存の4光束干渉露光系を改造して、干渉位置を変えることなく干渉角を容易に変更できる2光束干渉露光系を構築する。これは、3回露光の途中で干渉角を変更しなければならぬことも予想されるためである。これとともに、2軸で回転できる試料回転台を設計・試作する。(このため、光学部品を購入する)
- ・ 上記SU-8フォトレジストに対する、プロセス条件、特に3重露光におけるプロセス条件と問題点を把握する。
- ・ 2光束干渉露光の3重露光による3次元フォトニック結晶形成の理論解析を進め、形成できる結晶構造を明らかにする。これまで、4光束干渉露光での形成の理論を構築しているので、比較的容易に新規理論を構築出来ると予想している。
- ・ 上記理論結果について、成果発表する。(米国OSA学会、またはSPIE学会を予定し、海外旅費と参加費を経費計上している)
- ・ 一方、欠陥埋め込み導波路の形成方法として、He-Cdレーザ(325nm)によるパターン直描、He-Cdレーザ(325nm)を光源とするフォトマスク露光、電子ビーム直描、の3つの方法により、フォトレジスト

の表層に導波路を形成できるようにする。使用を予定しているSU-8フォトレジストは波長350nm以下では吸収が極めて大きいため、照射光はレジスト表層で吸収してしまい、表層のみにパターンを形成できる。しかし、導波路としての深さをコントロールするには波長の選択をしなければならない。このため、最も確実に深さ制御のできる電子ビーム露光も第3候補とする。

- ・ 上記3方法のプロセス条件を把握する。(このため、感光材料(フォトレジスト)を購入する)

平成20年度以降の計画

- ・ 前年度得られた材料・プロセス構成で欠陥導波路埋め込み3次元フォトニック結晶の形成を試みる。
- ・ 完全バンドギャップによる導波を目的に、ダイヤモンド構造の3次元フォトニック結晶の形成を試みる。干渉光の位相を1/4波長シフトして多重露光するために、光学系に1/4波長板を導入することで実現できる見込みである。
- ・ フォトニック結晶の透過・反射特性が測定出来る実験系を整え、形成したフォトニック結晶の評価方法を確立する。現有の分光光度計のビームをマスキングするか、顕微分光に相当する光学系を簡易的に取り付ける。
- ・ フォトニック結晶の特性の内、特に光学素子への応用に重要な、分散特性等の発露の程度を把握することにより、結晶性を高める方法を実験的に研究し、各種の格子構造について形成方法を確立する。
- ・ 2光束干渉の3重露光方式の理論を完成させる。これにより得られる種々の格子構造に関して、実験的に形成を試みる。
- ・ フォトレジストでは屈折率が低いため、バンドギャップ等の特性が十分に発露しないことも予想される。そこでフォトニック原子と背景誘電体との間の屈折率差を大きくするために、ゾル・ゲル法による材料置換を検討する。
- ・ 結晶の大きさを拡大する方法の検討を行うと共に、本方法による生産性を向上する条件、方法について実験的に検討し、導波路デバイスへの応用を目指す。
- ・ 欠陥導波路埋め込み3次元フォトニック結晶の形成について、成果発表する。(欧州EOS学会、またはSPIE学会を予定し、海外旅費と参加費を経費計上している。

4. 研究成果
研究の主な成果

- ・ YV04レーザの3通倍波レーザ(パルス発振、355nm)を導入したが、コヒーレンス長が約2mmと短く、レーザ結晶をYAGにしても約3mmとあまり改善が見られず、共振器中にエタロンを挿入することで7mmにできたが出力が200mWから60mWに低下してしまっただけであった。製作実験は出力が大きく露光時間を短縮できるYV04で実施し、所望の結晶を製作できた。
- ・ 欠陥導波路の埋め込み方法として提案している、高吸収波長である325nm波長のHe-Cdレーザでのパターン描画の実験を行い、描画後レジストの再塗布を行わず、2光束干渉の3重露光でフォトニック結晶(面心立方格子)を作成した。電子顕微鏡では、描画された導波路部が盛り上がっているのが観察された。これは架橋反応時に周囲からモノマーを引き込んでいるためである。
- ・ プロセス条件では大きく進展した。1、2、3回目でも露光量を変えなければ各々の干渉縞を一定に記録できないことがわかり、各回の露光量を適正化した。フォトレジストの現像が3次元の深い底面まで進まない問題に関しては、現像液とリンス液を新しい液に交換して現像とリンスを数回繰り返すことで、改善された。
- ・ 2光束干渉の3重露光による3次元フォトニック結晶形成の理論解析はほぼ完了し、14種全てのブラベー格子構造が形成できる。
- ・ 2光束干渉の3重露光方式により面心立方格子および菱面体構造結晶を形成した。
- ・ ピエゾ素子でピストン駆動される反射鏡を導入し、干渉計の一方の光路の位相を制御できるようにした。これにより、ダイヤモンド構造に加え、ウッドパイル構造も形成できるようになった。
- ・ $\{1,1,1\}$ 型面心立方格子の露光配置で、2光束干渉縞を露光した後、一方の干渉光を1/2位相シフトして再露光し、さらに感光体を回転することを3回繰り返し、合計6回の露光を重ねることでダイヤモンド構造を形成できた。
- ・ 干渉露光で形成した3次元フォトニック結晶の透過率解析を実効屈折率法で行った結果、透過率の波長依存性カーブ中にフォトニック結晶の特徴であるバンドギャップが出現したことを確認した。

得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

- ・ 2光束干渉の3重露光による3次元フォトニック結晶形成方法の提案、理論証明、実験的実証(菱面体構造結晶)は世界初。
- ・ 2光束干渉の3重露光にさらに位相シフトした2光束干渉の3重露光する手法でダ

イヤモンドライク結晶を形成したのは世界初である。

- ・ 干渉露光法で形成した3次元フォトニック結晶中に欠陥導波路を形成できることを実証したのは国内初で、新聞取材を受け、掲載された。
- ・ 干渉露光で形成した3次元フォトニック結晶の透過率解析を実効屈折率法で行った結果については国際学会で高く評価された。

今後の展開

- ・ 2光束干渉の3重露光による3次元フォトニック結晶形成方法で14種類全ての格子構造が製作できるが、実証したのは面心立法、菱面体構造のみであり、今後14種類の実証を進める。
- ・ ダイヤモンドライク結晶が完全バンドギャップを持つフォトニック結晶に適しているので、今回開発した製法をさらにリファインして行く。
- ・ 大型結晶を製作するにはレーザーのコヒーレンス長が製作する結晶サイズ程度必要であるが、これにはシード・インジェクション型YAGレーザーの3通倍波レーザーを用いることが肝要である。
- ・ 現在はフォトレジストを材料に欠陥埋め込み導波路を形成しているが、大きなバンドギャップを得るには屈折率の大きい材料に置換することが得策であり、TiO₂等をゾル・ゲル法を用いて置換することを今後進める。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

著者名: 小野雄三、論文標題: 3次元周期構造としてのフォトニック結晶、雑誌名: OPTRONICS、査読: 無、巻: 通巻No.318、発行年: 2008、ページ: 133 - 137.

[学会発表](計 5件)

発表者名: Masakazu Notsu and Yuzo Ono、発表標題: Transmittance analysis of holographically fabricated photonic crystals by the effective medium theory、学会名等: 15th Microoptics Conference、発表年月日: 2009年10月27日、発表場所: 未来館、お台場(東京).
発表者名: Yuzo Ono、発表標題: All fourteen Bravais lattices can be fabricated by two-beam holographic lithography、学会名等: OSA Optics and Photonics Congress 2009, Advances in Imaging, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging、発表年月

日: 2009年4月27日、発表場所: Vancouver, British Columbia (Canada).

発表者名: 小野雄三、発表標題: 干渉露光による3次元フォトニック結晶の形成、学会名等: 次世代光学素子研究会、発表年月日: 2009年2月27日、発表場所: 大坂科学技術センター(大阪).
発表者名: Yuzo Ono and Takashi Ochi、発表標題: Fabrication of three-dimensional photonic crystals by two-beam holographic lithography、学会名等: EOS Topical meeting on Diffractive Optics 2007、発表年月日: 2007年11月23日、発表場所: Barcelona (Spain).

発表者名: Yuzo Ono and Takashi Ochi、発表標題: Fabrication of three-dimensional photonic crystals by triple-exposure of two-beam interference fringes、学会名等: OSA Topical Conference on Nanophotonics 2007、発表年月日: 2007年6月19日、発表場所: 杭州(中国).

[その他]

報道関連情報: 2007年5月17日付日刊工業新聞23面に「3次元フォトニック結晶 立命館大が簡易製法、光通信デバイス量産の道」と題して掲載された(2007年5月9日日取材を受けた).

アウトリーチ活動情報: イノベーション・ジャパン2007 - 大学見本市のナノテク・材料分野で「3次元フォトニック結晶の製造方法 - ホログラフィックリソグラフィによるフォトニック結晶形成」と題して展示説明を行った(2007年9月12~14日).

ホームページ等:

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/re/onolab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 雄三 (ONO YUZO)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 90319492