

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860034

研究課題名(和文) 3次元フォトニック結晶による立体的光伝搬制御に関する研究

研究課題名(英文) Control of three-dimensional light guiding in three-dimensional photonic crystals

研究代表者

石崎 賢司 (Ishizaki, Kenji)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40638524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、3次元的な光ナノ構造であるフォトニック結晶を用いた、立体的に自在な光伝搬制御の実現を目指すものである。3次元フォトニック結晶における等価な結晶方位を考慮して、等価な特性をもつ面内・面垂直方向への光導波構造を導入し、これを連結することで、自在な経路での高効率の光伝搬が可能となることを解析により明らかにした。また、3次元光ナノ構造の高精度な作製法の構築により、実際に立体導波構造を作製し、自在な3次元光導波を、世界的に初めて実証することに成功した。さらに、分岐構造による光路の分割や、伝搬構造と光ナノ共振器との結合動作等、様々な3次元光制御の可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Realization of arbitrary three-dimensional (3D) light guiding was studied in 3D photonic crystals. We developed a new design concept for three-dimensional waveguides and bends, considering the equivalence of crystalline orientation in 3D photonic crystal. Analysis revealed that such waveguides can be connected each other with high transmittance in broadband. We also realized designed 3D guiding structures by advancing the method for fabricating large-area, defect-free 3D photonic crystals, and successfully demonstrated clear 3D guiding for the first time. Even the split of light paths into two and the light trapping by an intermediate nanocavity were successfully realized, showing the possibility of a variety of the 3D light control.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード：フォトニック結晶 導波路

1. 研究開始当初の背景

フォトニック結晶などの人工的な光ナノ構造による光制御の概念が、世界的に広く用いられている。これは、光の波長オーダーあるいはそれよりも小さな周期構造を配列することで、光の分散特性そのものを自在に制御し、光の伝搬や光の発生までをも自由に操ることを目指すものである。実際、スローライト・ストップライト効果や、自然放出の根本からの抑制あるいは増強作用など、一般的な光の常識を打ち破る概念の実証が行われてきている。

このような進展の中で、「必要な場所から必要な場所まで、立体的に光を導く」という、自在な光伝搬制御に関しては、その実現可能性が明らかにされていない状況であった。このような概念が実現できれば、立体的な光回路を含む微小光チップなど、光応用の新機軸へと発展すると期待される。それだけでなく、3次元光ナノ構造内部での特徴的な光学的・量子論的現象(例えば、3次元的に完全な光閉じ込め効果による長時間の光の蓄積効果、完全に単一の光学モードのみ存在する場での光と物質との相互作用など)の観測のためのプローブとしても、重要性が高いと予想される。

上記のような立体光伝搬制御を実現しうる構造として、3次元フォトニック結晶への立体的な導波構造の導入が考えられる。各種加工技術の進展にともなって、部分的にはあるが、3次元フォトニック結晶の作製とその内部への光伝搬構造の導入の試みが行われていた。しかしながら、様々な方向の導波路を、有機的に連結し、立体導波を実現することを目指した検討は行われていなかった。すなわち導波帯域や接続部の透過率について考慮した研究は、行われていない状況であった。また、3次元結晶そのものが低品質であり、導波構造への光閉じ込め効果が弱いという課題も存在していた。これらの理由から、立体構造作製のデモンストレーションの域に留まり、有用な立体光伝搬制御を実現する水準ではなかった。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究では、3次元の光ナノ構造・フォトニック結晶において、立体的に自由自在な光伝搬制御の実現可能性を探求し、その応用展開を検討していくことを目的とした。そのために、以下の点を研究目標とした。

- (1) 立体的な光回路構造に資する、高効率に導波路が連結された、3次元光導波路の設計コンセプトの確立。
- (2) 大面積で立体方向にも多周期の構造が得られ、かつ自在な立体回路構造を導入可能な、3次元フォトニック結晶の作製技術の構築。
- (3) 設計した立体的な伝搬構造を精緻に作製することによる、連結された導波構造に

よる立体光伝搬制御の実現。

- (4) 立体的な光伝搬構造と光ナノ共振器の結合など、応用展開の探索。

3. 研究の方法

本研究の重要部分となる立体光伝搬に有効な導波構造の設計においては、フォトニック結晶の「結晶方位」の等価性に着目した、新たな設計コンセプトの導入を図った。等価な方位の導波構造であれば、類似した導波特性を有し、全導波帯域で、高い透過率で接続することも可能となりうる。3次元時間領域差分法(FDTD法)を用いた数値解析により、そのような等価な方位の導波構造の設計・解析を行うとともに、それらの接続構造の最適化について検討し、互いに接続可能な面内・面外導波路を詳細に検討した。

実験検討の基盤となる3次元構造の作製技術の構築については、申請者らがこれまでに研究を行ってきた、ストライプ状にパターンニングした半導体を、ウエハ融着法による接着技術によって積層する手法を深化させ、立体的な導波路を精密に配置した多周期の積層構造実現の基盤とすることを検討した。具体的に、画像処理(幾何学的パターンマッチング法)を援用した定量的な積層位置誤差の判定と、電動ステージのフィードバック制御の導入による、自動で積層位置を決定するシステムの構築を検討した。また、多層構造の再現性のよい形成のために、フォトニック結晶材料を見直し、好適な材料系とし、シリコン系材料(シリコン・オン・インシュレータ構造:SOI構造)の導入を検討し、SOI構造における、反り(歪)の影響を解析しつつ、融着積層技術を構築した。

以上の検討をもとに、設計した構造を、ステップ・バイ・ステップで3次元フォトニック結晶の内部に試作し、立体的な構造における伝搬帯域スペクトルや、連結特性などを詳細に評価し、立体的な光伝搬制御の実現可能性を検討した。また、このような立体的な導波構造の応用に関して、ナノ共振器構造の導入と導波路との結合動作の解析・実証の検討を行った。また、立体的な導波構造の高効率な利用に向けて、導波路が結晶外部に接続される部分(入出力端)についても、その特性探索を行い、高効率で入出力できる構造の検討を行った。

4. 研究成果

まず、立体光伝搬構造(光配線構造)の設計概念の構築を図った。3次元フォトニック結晶における導波構造は、これまで、試行錯誤的に導入されたものがほとんどであり、それらの広帯域・高効率な接続は得られていなかった。本研究では、3次元結晶の結晶構造の対称性を考慮して、面内方向や面外方向等に対して、同様の伝搬特性を有する導波路を導入し、それらを相互に接続することを提案した。本研究において用いた構造を図1に示

す。面内方向の導波路([110]方向と対応する)と等価な結晶方位になるように、面外方向の導波路としては、敢えて、斜め方向([101]方向)に導入した。このとき、非常に類似した導波特性が得られることが判明した。なお、従来の検討では、垂直方向([001]方向)など、結晶的に等価でない方向に構造を形成していたことによって、本研究で得られたような類似した特性は得られていなかった。

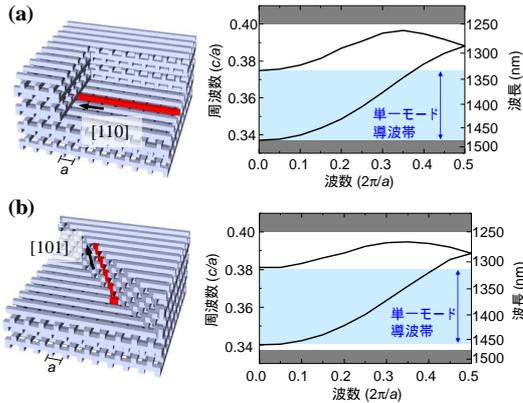


図1. (a) 面内方向および、(b) 面外(斜め)方向の導波路の導入。

上記のような、新たな設計に基づく導波路同士を、相互に接続することを検討した。このとき、導波路同士を、単純に接続した場合には、接続部で光が反射し、面内から斜め、斜めから面内へと光を伝搬させることができないことが判明した。そこで、接続部の構造について検討を行ったところ、図2に示すように、導波路を一部延長することによって、この問題を解決できることを見出した。この結果、導波路の導波帯域のほぼ全域で高い透過率(光通信波長帯で幅150 nm, 透過率90%以上)で接続できることを明らかにした。

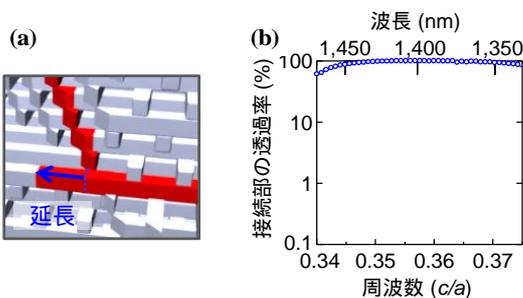


図2. 面内方向および斜め方向導波路の接続の検討。(a) 模式図、(b) 損失の計算結果。

3次元フォトニック結晶構造の形成技術の構築においては、画像処理を援用した定量的な積層位置誤差の判定と、電動ステージのフィードバック制御による、自動で高精度な積層構造が実現可能なアライメントシステムを構築した。画像処理用のアライメントマーカーを設計し、読み取りのばらつきを評価したところ、標準偏差 $\sigma \sim 25$ nmという、良好な自動誤差判定精度が得られた。このような誤

差判定を、2点に対して同時に行うことで、位置(x, y)誤差に加えて、回転(θ)誤差も同時に補正できるように電動ステージ系を構築した。また、再現性よく積層融着を行うために、加工技術に優れたSi系材料を用いた積層法を検討し、実験的に、融着条件の構築を行った。これらの結果として、 ~ 4 mm四方の広い面積内に配置した多数の3次元フォトニック結晶の全てにおいて、およそ100 nm以下という高精度での積層を実現することに成功し、設計した立体導波構造の実現基盤として、十分なものが得られた。

以上の設計・作製技術をもとにして、16層までの多積層構造を実現し、立体光伝搬の実験を行った。まず、斜め方向の導波路そのものについて実験を行った結果、図3のように、確かに光が導波する様子を観察することに成功した。また、このような導波を生じる帯域は、各層に形成したストライプの一部を除去した部分の大きさに依存して、調整できることも明らかとなった。

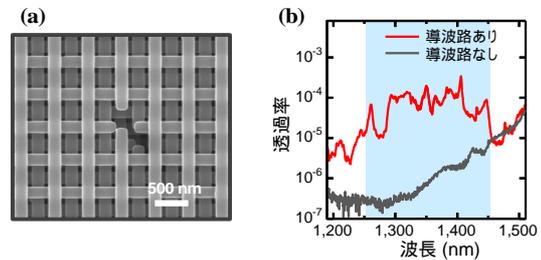


図3. 斜め導波路の作製と評価。(a) 作製結果の電子顕微鏡写真、(b) 伝搬スペクトルの測定結果。

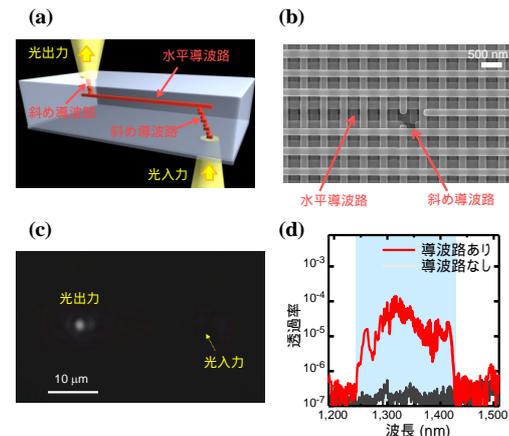


図4. 立体光伝搬の実証。(a) 伝搬構造の模式図、(b) 作製結果の電子顕微鏡写真、(c) 伝搬光出力の光学顕微鏡画像、(d) 伝搬スペクトルの測定結果。

最終的に、上記の斜め導波路と面内導波路の接続、さらには、面内導波路においてL字状の曲げ接続を導入した構造およびT字状の分岐を導入した構造など、各種の立体伝搬構造を試作し、評価を行った。図4は、斜め導波路と面内導波路を接続した、基礎となる光配線構造の例を示している。図2に示したよ

うな、高効率な接続のための部分延長構造等を適切に形成できた結果、立体的な構造中を光が伝搬でき、設計通り広帯域で動作していることが明らかとなった。

本研究では、さらに、導波路構造と光ナノ共振器との結合動作についても研究を行った。3次元結晶内部に埋め込まれたナノ共振器と導波路との結合特性について、導波路-共振器間の距離依存特性等を、数値解析によって明らかにした。また、16層積層構造において、それらの特性を実証し、 Q 値 ~ 1650 の共振状態を観察することにも成功した。さらに、ナノ共振器に関して、3次元結晶の周囲の空間の状態および共振器モードの電磁界プロファイルを制御することで、同じ積層数でも2桁程度の Q 値向上の可能性などを見出した。加えて、このような系を効率よく利用していくために、斜め導波路と外部の接続特性について、解析を行い、表面およびその近傍の構造を制御することにより、導波路出力光と外部レンズとの結合効率を、最大 ~ 2 倍程度増大しうることも明らかとしている。

以上のように、本研究では、新たな設計コンセプトの構築と、それを実現する作製技術の確立により、3次元的に面外-面内-面外の導波路等を接続した立体光伝搬の制御に、世界的に初めて成功した。これらの成果については、幸いにも、Nature Photonics誌に掲載され、新聞報道等でも注目を集めており、3次元フォトニック結晶を用いた完全な光制御に向けた、重要なステップと位置づけられる。また、その活用に向けた、導波路入出力特性の向上や、ナノ共振器との結合動作を見据えた検討も行っており、今後、ナノ共振器との連結動作も含めて、微小光チップといった機能素子への展開や、3次元光ナノ構造内部での3次元的に完全な光閉じ込め効果による超長時間の光の蓄積効果、単一の光学モードのみ存在する場での光と物質との相互作用増強など、物理的探索へも繋がるものと期待される。

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3件)

1. K. Gondaira, K. Ishizaki, and S. Noda, "Influence of structural fluctuations on Q factor of nanocavities at the surface of three-dimensional photonic crystals," *Journal of the Optical Society of America B* **30**, 1660-1664 (2013). (査読有)
DOI: 10.1364/JOSAB.30.001660
2. K. Ishizaki, K. Gondaira, Y. Ota, K. Suzuki, and S. Noda, "Nanocavities at the surface of three-dimensional photonic crystals," *Optics Express* **21**, 10590-10596 (2013). (査読有)
DOI: 10.1364/OE.21.010590

3. K. Ishizaki, M. Koumura, K. Suzuki, K. Gondaira, and S. Noda, "Realization of three-dimensional guiding of photons in photonic crystals," *Nature Photonics* **7**, 133-137 (2013). (査読有)
DOI: 10.1038/nphoton.2012.341

[学会発表](計7件)

1. 権平皓, 石崎賢司, 北野圭輔, 野田進, "3次元フォトニック結晶における積層型斜め導波路の光入出力特性(II) 終端構造が放射パターンに与える影響," 2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学京田辺キャンパス(2013.9.18).
2. 石崎賢司, 権平皓, 北野圭輔, 野田進, "周囲環境が3次元フォトニック結晶ナノ共振器に与える影響," 2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学京田辺キャンパス(2013.9.18).
3. K. Ishizaki, K. Gondaira, Y. Ota, K. Suzuki, and S. Noda, "Surface nanocavities in 3D photonic crystals," *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR) 2013*, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan (2013.7.2).
4. 権平皓, 石崎賢司, 鈴木克佳, 北野圭輔, 野田進, "3次元フォトニック結晶における積層型斜め導波路の光入出力特性に与える表面モードの影響の検討," 2013年春季第60回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学(2013.3.28).
5. K. Ishizaki, M. Koumura, K. Suzuki, K. Gondaira, and S. Noda, "Wide-band vertical waveguide for three-dimensional light guiding in photonic crystals," *IEEE Photonics Conference (IPC)*, Hyatt Regency San Francisco Airport Burlingame, California, USA (2012.9.25).
6. 権平皓, 石崎賢司, 興村昌樹, 鈴木克佳, 野田進, "3次元フォトニック結晶導波路における伝搬特性評価," 2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会, 愛媛大学・松山大学(2012.9.13).
7. 石崎賢司, 興村昌樹, 権平皓, 鈴木克佳, 野田進, "3次元フォトニック結晶への導波路-ナノ共振器結合構造の導入," 2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会, 愛媛大学・松山大学(2012.9.13).

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:

国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

1. プレス発表（微小領域での 3 次元光立体配線に成功）

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2012/130121_1.htm

2. 新聞報道情報等

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

石崎 賢司 (KENJI ISHIZAKI)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：40638524

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし