

科学研究費補助金（学術創成研究費）公表用資料
〔事後評価用〕

平成15年度採択分

平成20年 3月31日現在

研究課題名（和文） フォトニック結晶工学の深化とその応用に関する研究

研究課題名（英文） Evolution of Photonic Crystal Engineering
and Its Application

研究代表者

野田 進 (Noda Susumu)

京都大学・工学研究科・教授



研究の概要： 本研究は、フォトニック結晶による自在な光子制御を目指す新しい学問領域“フォトニック結晶工学”の深化・高度化を図るとともに、各種デバイスへの応用を目指すものである。この目的達成のため、(1)線・点複合欠陥による光子操作の基本的理解と深化・高度化、(2)ナノ加工技術の高度化と構造揺らぎの影響の検討、(3)新構造・材料の導入、(4)動的応答の解明・制御、(5)デバイス応用、の順に系統的に研究を進める。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学 工学基礎 ・ 応用光学 量子光工学

キーワード：フォトニック結晶

1. 研究開始当初の背景

フォトニック結晶とは、その内部に周期的な屈折率分布をもつ光ナノ構造で、ある特定の波長域において、光の存在そのものを許さないフォトニックバンドギャップをもつことを特長とする。この結晶に対して人為的な欠陥導入や格子点の構造制御を行うことにより、光を極微小域で漏れなく直角に曲げたり、極微小点に光子を局在させたり、さらには発光現象の完全制御を可能とする等、自在な光子操作が可能になるものと期待される。研究代表者は、この新しい“フォトニック結晶工学”の分野において、以下の3つの世界をリードする成果を挙げてきた。(1)世界で最も理想的な特性をもつ完全3次元フォトニック結晶の実現、(2)2次元フォトニック結晶への点・線欠陥導入に基づく極微小域での光子操作の初めての実現（線欠陥を伝播する光子が点欠陥によって捕獲され、自由空間に放射されるという新現象の初めての観察）、(3)フォトニック結晶を用いた全く新しい半導体レーザの実現、等。

2. 研究の目的

本研究は、上記のうち、(2)の2次元フォトニック結晶の研究に重点を置き、研究代表者が新たに見出した現象「線・点複合欠陥による光子の捕獲と放出現象」をベースとして、“フォトニック結晶工学”の深化・体系化に必要な様々な知見を得るとともに、各種機能デバイスへの展開を図っていくことを目的とする。具体的には、(1)線・点複合欠陥による光子操作の基本的理解とその深化・高

度化、(2)ナノ加工技術の高度化と構造揺らぎの影響の検討、(3)高度な光子制御のための、新構造・材料の導入、(4)点欠陥共振器、線欠陥導波路の動的応答特性の解明とその制御、(5)各種の機能デバイスへの展開、の順に系統的に研究を推進していく。

3. 研究の方法

試料作製：材料は、主に SOI(Silicon on Insulator)を用い、電子ビーム露光、ICP エッチングにより、フォトニック結晶を形成した。点欠陥への3次元構造形成や、極微小偏波変換器形成のためには、FIB 技術を用いた。**構造評価**：高精度電子顕微鏡や、走査型プローブ顕微鏡、レーザラマン装置等を駆使し、構造揺らぎの定量的な評価を行った。**光学特性評価**：線欠陥導波路の光伝播特性、点欠陥共振器の Q 値測定は、波長可変レーザ、高精度波長計を、光パルス応答については、モードロックファイバーレーザ等を用いた。**解析**：フォトニック結晶の設計や、動作解析、構造揺らぎ解析には、大型計算機を用いて、平面波展開法、FDTD 法等により行なった。

4. 研究の主な成果

(1) 線・点複合欠陥による光子操作の基本的理解と深化・高度化

線・点複合欠陥における光子操作効率は、点欠陥から線欠陥への光の漏れで決まる Q 値（面内 Q 値）と、自由空間への光の漏れで決まる Q 値（上下 Q 値）が等しくなるときに、最大50%となること、さらに下記(3)で述べる「面内ヘテロ構造」の導入により効

率 100%が達成しうることを見出した。

点欠陥共振器の Q 値は当初、450 程度であったが、共振器の端部に位置する格子点をわずかに(60nm)シフトすることにより、従来の 100 倍、すなわち $Q=45,000$ に増大出来ることを見出した。さらに、これを一般化し、高 Q 値実現にとって、「ガウス型光閉じ込め」が極めて重要であることを示した。

(2) ナノ加工技術の高度化と構造揺らぎの影響の検討

本予算にて購入した各種装置を駆使し、ナノ加工の高度化と構造揺らぎの定量的な評価を行い、試料作製へのフィードバックを行った。その結果 <1nm という超高精度の結晶作製技術をほぼ確立することに成功した。さらに、構造揺らぎが光学特性に与える影響についても定量的な検討を行い、線欠陥導波路中の光伝搬損失には、バンドギャップ効果の存在しない TM スラブモードへの漏れが主たる原因であることを突き止め、“TM スラブ・ライン”という新しい概念を提唱した。

(3) 新構造・材料の導入

光子操作の自由度を上げ、かつ光子操作効率を大幅に向上させる構造として、面内ヘテロ構造の概念を提唱した。これは格子定数がわずかに (1nm 程度) 異なるフォトリソニック結晶を面内に接続した構造であり、(i)幅広い波長域で、線・点欠陥間の結合状態を一定に保ち、最適なデバイス動作が可能になること、(ii)ヘテロ界面において、波長選択性のある反射機能等が発現しうることを示した。さらに、このヘテロ界面を 2 つ接続したダブルヘテロ構造を形成することにより、(1)に示した光閉じ込めの概念をほぼ完全に満たす構造が実現出来ることを示し、250 万という驚異的な Q 値を達成することに成功した。

(4) 動的特性の解明と制御

点・線欠陥のパルス応答特性に対する検討を行った。パルス入射により、共振器の Q 値に相当する時間分だけ、応答に遅延が生じることを実験的に示した。さらに Q 値の動的制御の概念を世界に先駆け提唱し、 Q 値をピコ秒の時間範囲で、数千から、数万まで変化させうることを示した。また、線欠陥導波路における光パルス伝播についても、その観察を行い、導波路分散特性を反映した光パルス遅延の直接観測に初めて成功した。

(5) デバイス応用

16 波の波長合分波デバイス (波長分解能 <0.3nm) の実現に成功した(図 1)。また、共振器から、光を面外に放出することなく、並走する導波路へと導く面内型波長合分波デバイスの実現にも世界で初めて成功した。さらに、応答特性のフラットトップ化や、フォトリソニック結晶の本質的な課題、すなわち偏波依存性の存在を解決する新しい方法を考案

実証することに成功した。以上に加え、光スイッチや光 (バッファ) メモリなどの将来の新機能デバイス実現の基礎として、点欠陥共振器の光非線形応答の検討、点欠陥共振器の Q 値の動的制御の概念の創出にも注力した。

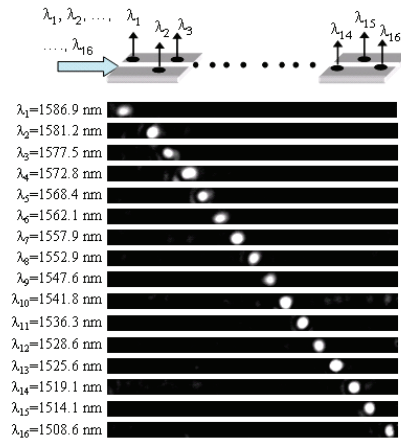


図 1. 超小型波長合分波デバイスの模式図と得られたデバイス特性。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

以上は、いずれも世界をリードする成果であり、*Science* 1 件、*Nature* 1 件、*Nature Materials* 2 件、*Nature Photonics* 1 件に掲載されるなど、極めてインパクトの高い成果が得られたと言える。特に、高 Q 値ナノ共振器の成果は、Thomson ISI から、New Hot Paper, Fast Moving Front Article として、顕彰されるという栄誉を得た。また、開発したデバイスも、それぞれ世界トップの性能をもつ。

6. 主な発表論文

- (研究代表者は太字、研究分担者には下線)
- [1]Y.Takahashi, H.Hagino, Y.Tanaka, B.S.Song, **T.Asano**, and **S.Noda**: "High-Q nanocavity with a 2-ns photon lifetime", *Optics Express*, Vol.15, pp.17206-17213 (2007).
 - [2]Y.Tanaka, J.Upham, T.Nagashima, T.Sugiya, **T.Asano** and **S.Noda**: "Dynamic control of the Q factor in a photonic crystal nanocavity", *Nature Materials*, Vol.6, pp.862-865 (2007).
 - [3]**S.Noda**, M.Fujita, and **T.Asano**: "Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities", *Nature Photonics*, Vol.1, pp.449-458 (2007).
 - [4]H.Takano, B.S.Song, **T.Asano**, and **S.Noda**: "Highly Effective In-Plane Channel-Drop Filters in Two-Dimensional Heterostructure Photonic-Crystal Slab", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.45, pp.6078-6086 (2006).
 - [5]B.S.Song, **S.Noda**, **T.Asano** and Y.Akahane: "Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity", *Nature Materials*, Vol.4, pp.207-210 (2005).
 - [6]Y.Akahane, **T.Asano**, B.S.Song, and **S.Noda**: "High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal", *Nature*, Vol.425, pp.944-947 (2003).
 - [7]B.S.Song, **S.Noda**, and **T.Asano**: "Photonic devices based on in-plane hetero photonic crystals", *Science*, Vol.300, pp.1537-1537 (2003).
- ホームページ等
<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/%7E1elab05/>