

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740271

研究課題名(和文) ナノ光ファイバー共振器における単一原子/光子の操作

研究課題名(英文) Manipulation of single atoms/photons using an optical nanofiber with cavity structure

研究代表者

Nayak K. Prasanna (Nayak, Kali Prasanna)

電気通信大学・フォトリソノベーション研究センター・助教

研究者番号：70551042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：ナノ導波路と原子を用いて様々な量子光学特性を操作制御する事は量子光学分野の主要な流れの一つである。本研究ではナノ導波路としてナノ光ファイバーを用い、それに共振器機能を組み込む事により、操作制御の自由度を大きく増強する方法について研究した。まず、フェムト秒レーザー干渉多光子加工法を開発し、光学特性の優れた共振器を組み込む方法を開発した。更に、ナノ光ファイバーと外部ナノ構造(グレーティング)を組み合わせるナノ光ファイバー共振器を形成する方法を開発した。この方法を用いて、ナノファイバーに担持した単一原子(量子ドット)からの自然放出が大きく増強される事を実証した。

研究成果の概要(英文)：One of the key trends of modern quantum optics is to manipulate the quantum optical properties of atoms using various nano-waveguides. In this project, we investigated methods to improve the freedom of the manipulation using optical nanofibers as nano-waveguides. We developed a method to create a cavity structure on an optical nanofiber using femto-laser interfered multi-photon fabrication method. Furthermore, we developed a method to create cavity structure on nanofiber by combining with an external nanostructure device (grating with central defect). Using this method, we demonstrated the spontaneous emission enhancement of a single atom (quantum dot) on a nanofiber.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：ナノ光ファイバー 共振器QED 自然放出制御 量子光学 ナノ光加工

1. 研究開始当初の背景

これまで30年の量子光学の物理と技術の発展により単一原子を操作/制御する基本的な方法は確立してきた。その方法は共振器量子電磁力学(C-QED)として知られている。更に最近ではC-QEDの方法をナノ導波路に拡張し量子デバイス化を目指す研究が発展している。その方法の一つが通常の光ファイバーの一部をサブ波長直径にし、伝播モードを波長程度の領域に強く閉込め、原子と光の相互作用を様々に操作制御する手法である。この方法が発展すれば、光ファイバーネットワーク中に種々の量子操作ノードを組込んだ量子情報技術に道を開く事になるものであり、その発展が期待されている。

2. 研究の目的

ナノ光ファイバーによる光閉込めを更に強化するためには、ナノファイバーに光共振気を組込む事が必須である。ただし、そこに組込む共振器は、伝統的なC-QEDにおける超高フィネス(>500,000)は必要ではなく、そのフィネスは1,000以下で良いことが理論的に予測されている。本研究では、ナノファイバー上に共振器機能を組み込み制御する方法を開発する。更に、ナノファイバー共振器による原子の自然放出制御を実証する。

3. 研究の方法

ナノファイバー上への共振器組込み法として、直接加工組込み法と外部ナノ構造による伝播モード制御法について研究する。原子としてはレーザー冷却セシウム原子及び半導体量子ドットを用いる。

4. 研究成果

(1) ナノファイバー直接組込み法

ナノ光ファイバーのナノファイバー部に共振器機能を組み込むには、ナノファイバー部に一對のブラッググレーティング (FBG) を組込む事が必須である。ナノファイバーへのFBG組込みは、筆者らが集束イオンビーム(FIB)加工により実現したが、FIB法では不可避的に発生するナノファイバーへの帯電等のため再現性よく加工を実施する事は困難であった。量子光学実験にルーチ的に用い得るナノファイバーへのFBG組込み法としては新たな方法を開発する必要がある。

本研究では、フェムト秒パルスレーザーによる干渉縞をナノファイバー上に照射し、多光子過程によりナノファイバー上にアブレーション加工する方法を開発した。図1に開発した加工システムの模式図を示す。用いたフェムト秒パルスレーザーは波長400nm、パルス幅は120fs、繰り返しは80MHzである。レーザー光は位相マスクにより±1次の回折光に分け、ミラーで折り返しナノファイバー上に干渉縞を形成する。レーザー光は円筒レンズにより紙面に垂直な面内でナノファイバー上に集光する。ナノ光ファイバーの透

過特性は常にモニターする。

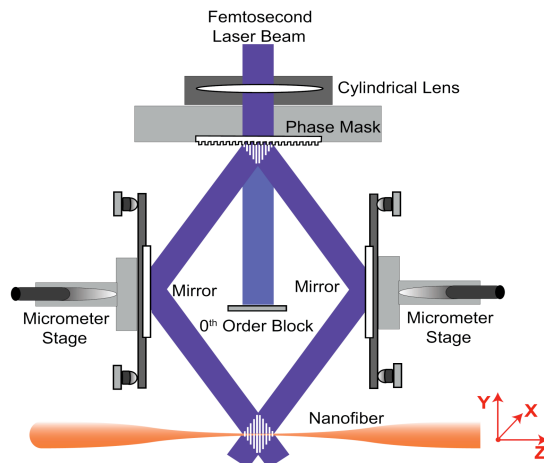


図1 ナノファイバーFBG加工模式図

レーザー加工したナノファイバーのSEM画像の典型例を図2に示す。

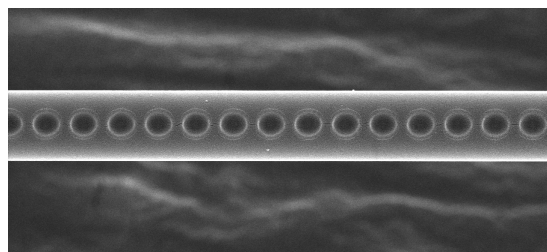


図2 レーザー干渉加工ナノファイバー

ナノファイバーの直径は600nmである。ナノファイバー上に規則的に一次元の穴列が加工されているのが分かる。間隔は位相マスクで決まる350nmである。加工された穴は貫通穴ではなくお椀状の形状を持つクレータである。クレータはナノファイバー上に1mm程度の領域に総数で数千個加工されている。直径は中心で200nm程度であり周辺部では漸減する。このクレータ列はレーザー照射面ではなく、照射裏面に加工される。これは、ナノファイバー自身が円筒レンズとして働き、照射レーザー光をナノファイバー裏面にフォーカスするためである。結果として自己制御的にナノファイバー裏面中心線上に高精度の加工が実現されている。また、この加工は単一のレーザー照射パルスにより実現されており、加工時間は120fsである。このため、機械的な振動等の影響は全く受けない。また、散乱損失は極めて小さくFBGとしての光学的な特性は良好である。

このナノファイバーFBGを用いて光共振器を構成した。方法は照射レーザーパス中に金属ワイヤーを置き一部をブロックする方法及び、クレータ径の変化を制御し、ナノファイバー上に実効的に急峻な屈折率変化を創り出す方法である。両方法共に機能する事を実証した。しかし、金属ワイヤーブロック法では、レーザー光の回折の影響が大きく、ワイヤー径が0.5mm以上では良好な結果が得られるが、マイクロ共振器については実現でき

ていない。屈折率変化法により得られた共振器の透過スペクトルを図3に示す。

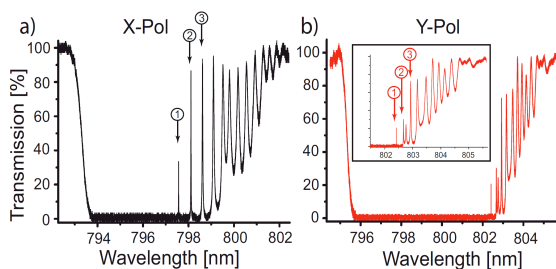


図3 ナノ光ファイバー共振器透過スペクトル

得られたフィネスは500に達するものもありC-QEDに適用可能な条件を既に実現している。また、共振波長はナノファイバーをピエゾ素子により延伸する事により制御可能であり、制御性も優れている。

(2) 外部ナノ構造制御法

ナノファイバー自身に加工せずFBG機能を組込めればC-QED応用にとっては新たな自由度を手に入れることができる。本研究ではこの視点からも研究を行った。図4に用いた系の概念図を示す。

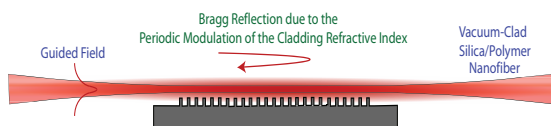


図4 外部ナノ構造制御法概念図

アイデアの要点は外部グレーティング状にナノファイバーを配置し、伝播光が実効的に感ずる屈折率を変調する事である。ただし、外部グレーティングに伝播光が漏れ出せば大きな伝播損失が生ずるので、注意深い設計が必要である。FDTD法によりグレーティング形状の最適条件を探索し、その結果に基づき電子ビーム露光法によりシリカ基板状にグレーティングの作成を行った。図5に作製したグレーティング上にナノファイバーを配置した系のSEM画像を示す。

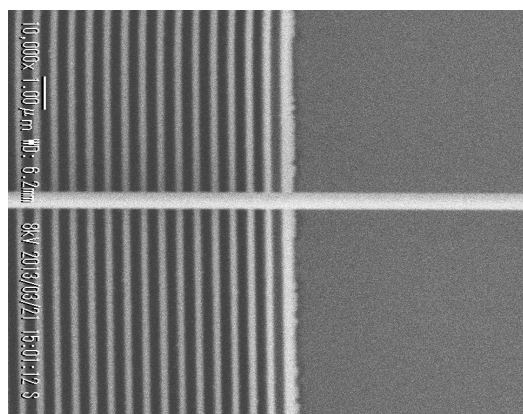


図5 グレーティング/ナノファイバー系

この系の透過スペクトル及び反射スペクトル

ルを図6に示す。

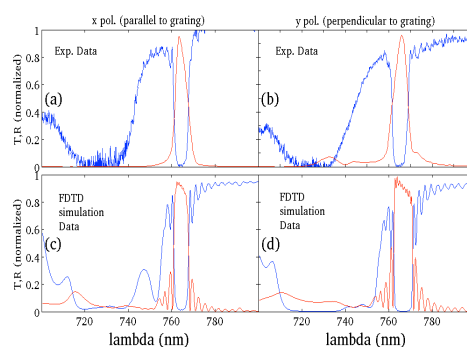


図6 ナノファイバー/グレーティング透過反射スペクトル

上段が実験結果であり、下段がFDTDシミュレーションの結果である。両者の対応は良く、散乱等の損失も少ないナノファイバーFBGが実現されているのが見て取れる。

ここで用いたグレーティングFBGの中央部に欠陥を導入し共振器機能を組み込む試みも行った。結果は良好であり、単一モードの共振器を構成する事ができた。

(3) ナノファイバー原子/共振器QEDの実証

ナノファイバー上に量子ドットを担持し、その系と欠陥導入グレーティングを組み合わせ自然放出制御の実証実験を行った。現状では、量子ドット担持位置等の最適化は実現できていないが共振モードピークで明瞭な自然放出増強が観測できた。現在、詳細な解析及び、定量性のある実験結果を取得すべく研究を継続している。

また、レーザー冷却原子とレーザー加工ナノ光ファイバー共振器を組み合わせる研究も実施しつつある。この系の研究は当初の予定より遅れてはいるが、これは外部グレーティング制御法による量子ドット自然放出制御の予測を越えた研究展開により、結果として研究時間配分が少なくなった事によるものである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6件)

- (1) K. P. Nayak, P. Zhang, K. Hakuta, "Optical nanofiber based photonic crystal cavity," Optics Letters, Vol. 39, pp. 232-235 (2014).
- (2) M. Sadgrove, R. R. Yalla, K. P. Nayak, and K. Hakuta. "Photonic crystal nanofiber using an external grating," Optics Letters, Vol. 38, pp. 2542-2545 (2013).
- (3) K. P. Nayak, K. Hakuta, "Photonic crystal formation on optical nanofibers using

- femtosecond laser ablation technique,” *Optics Express*, Vol. 21, pp. 2480-2490 (2013).
- (4) K. P. Nayak, M. Das, Fam Le Kien, and K. Hakuta, “Spectroscopy of Near-Surface Atoms Using an Optical Nanofiber,” *Optics Communications*, Vol. 285, pp. 4698-4704 (2012).
- (5) R. R. Yalla, K. P. Nayak, K. Hakuta, “Fluorescence photon measurements from single quantum dots on an optical nanofiber,” arXiv: 1112.0624v1 (2011); *Opt. Express* Vol. 20, No. 3, 2932-2941 (2012).
- (6) K. Hakuta, K. P. Nayak, “Manipulating single atoms and photons using optical nanofibers”, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 3, 015005 (2012).

[学会発表] (計 16 件)

- (1) K. P. Nayak and K. Hakuta, Photonic Crystal Nanofibers for Manipulating Single Atoms/Photons, The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy “Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications”, Nara, May 2013.
- (2) M. Sadgrove, K. P. Nayak, K. Hakuta, Hybrid photonic crystal nanofiber device for realization of a strong mater-light interface, The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy “Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications”, Nara, May 2013.
- (3) Kali Prasanna Nayak, Photonic crystal nanofibers: A novel workbench for cavity QED, Workshop on Optical Nanofiber Applications: From Quantum to Bio Technologies, P21, Okinawa, June 2013.
- (4) K. P. Nayak and K. Hakuta, *Photonic Crystal Formation On Tapered Optical Nanofibers Using Femtosecond Laser Ablation Technique*, CLEO 2013 (San Jose, USA), QTu2B.2.
- (5) K. P. Nayak and K. Hakuta, *Fabrication of Photonic Crystal on Tapered Nanofibers Using a Femtosecond Laser*, CLEO-PR&OECC/PS 2013 (Kyoto, Japan), ThI3-4.
- (6) K. P. Nayak, Y. Kawai, F. L. Kien, K. Nakajima, H. Miyazaki, Y. Sugimoto, and K. Hakuta, *Fabrication of Optical Nanofiber Cavity Using Focused Ion Beam Milling*, QIM 2012 (Berlin, Germany), QW4B.4.
- (7) K. P. Nayak, Y. Kawai, F. L. Kien, K. Nakajima, H. Miyazaki, Y. Sugimoto, and K. Hakuta, *Nano-Structured Optical Nanofiber: A Novel Workbench For Cavity-QED*, IUMRS-ICEM 2012 (Yokohama, Japan), B-9-O24-021.
- (8) K.P. Nayak and K. Hakuta, *Fabrication of Nanofiber Bragg Grating Using Femtosecond Laser Talbot Interferometric Setup*, JPS Annual Meeting, Sept. 2012 (Yokohama, Japan), 19pAK-1.
- (9) K.P. Nayak and K. Hakuta, *Photonic Crystal Nanofibers for Manipulating Single Atoms/Photons*, Shanxi-UEC Joint Workshop March 2013 (UEC).
- (10) K. P. Nayak, Y. Kawai, F. L. Kien, K. Nakajima, H. Miyazaki, Y. Sugimoto, and K. Hakuta, *Nano-Structured Optical Nanofiber: A Novel Workbench For Cavity-QED*, QCMC 2012 (Vienna, Austria).
- (11) K.P. Nayak and K. Hakuta, *Photonic crystal formation on optical nanofibers using femtosecond laser ablation technique*,

International Workshop on Laser Science, Oct.
2012 (UEC).

(12) K.P. Nayak and K. Hakuta, *Photonic crystal formation on optical nanofibers using femtosecond laser ablation technique*, COE Symposium Dec. 2012 (UEC).

(13) K.P. Nayak and K. Hakuta, *Photonic Crystal Nanofibers for Manipulating Single Atoms/Photons*, US-Japan Seminar 2013(Nara, Japan).

(14) Ramachandrarao Yalla, K. P. Nayak, Fam Le Kien, M. Morinaga, and K. Hakuta, “Efficient Channeling of Fluorescence Photons from Single Quantum Dots into Guided modes of Optical Nanofiber,” International Workshop on Laser Science, P-18, Chofu, Tokyo, Japan, October 5th - 6th (2012).

(15) Ramachandrarao Yalla, K. P. Nayak, Fam Le Kien, M. Morinaga, and K. Hakuta, “Fluorescence Photon measurements from Single Quantum Dots on an Optical Nanofiber,” International Union of Materials Research Societies-International Conference on Electronic Materials, B-9-O24-022, Yokohama, Tokyo, Japan, September 23rd - 28th (2012).

(16) Ramachandrarao Yalla, K. P. Nayak, Fam Le Kien, M. Morinaga, and K. Hakuta, “Fluorescence Photon measurements from Single Quantum Dots on an Optical Nanofiber,” 11th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, P3-69, Vienna, Austria, July 30th - August 3rd (2012).

[産業財産権]

○出願状況 (計 2件)

名称：ナノファイバーフォトニック結晶の製造方法、及び、ナノファイバーフォトニック結晶の製造装置
発明者：白田耕藏、ナヤク K. プラサンナ
権利者：電気通信大学
種類：特許
番号：特願 2012-153478
出願年月日：2012年7月9日
国内外の別：国内

名称：ナノファイバーフォトニック結晶
発明者：白田耕藏、ナヤク K. プラサンナ
権利者：電気通信大学
種類：特許
番号：特願 2012-153479
出願年月日：2012年7月9日
国内外の別：国内

6. 研究組織
研究代表者
ナヤク K. プラサンナ
(Kali Prasanna Nayak)
研究者番号：70551042