

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800226

研究課題名(和文) Novel method for manipulating single atoms and photons in a cavity on an optical nanofiber

研究課題名(英文) Novel method for manipulating single atoms and photons in a cavity on an optical nanofiber

研究代表者

サッドグローブ マーク (Sadgrove, Mark)

電気通信大学・その他部局等・助教

研究者番号：40625000

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はユニークな方法で光と「原子」の相互作用を制御することを目的とする。外部グレーティング法でナノ光ファイバーに共振器を加えた。「原子」として量子ドットを利用しました。欠陥(不連続点)を含む外部グレーティングを用いナノ光ファイバーにフォトリック結晶共振器を実現した。欠陥としてはグレーティングの中心に、グレーティング周期の3/2倍のギャップを開けた。更にナノ光ファイバーの表面上に担持された量子ドットと組み合わせることで共振器効果により量子ドットの自然放出光強度の増強に成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research program, the applicant developed a completely new method of achieving "photonic crystal cavities" on a nano-waveguide. The method combined a nano-fabricated silica grating containing a central "defect" with an optical "nanofiber" (sub-wavelength diameter optical fiber). By mounting the grating on the optical nanofiber, we achieved a small mode-volume cavity for light guided inside the nanofiber. When quantum emitters are placed on the nanofiber surface, the experience a strong enhancement of spontaneous emission at the cavity resonance wavelength, making the device promising technology for the realization of narrow-band, fiber coupled single photon sources.

Before manufacturing the device, we designed the grating using computer simulations. Finally, we realized cavity QED based enhancement for a quantum dot deposited on the nanofiber surface by using the composite photonic crystal cavity technique.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：ナノ導波路 フォトリック結晶

1. 研究開始当初の背景

ナノファイバーはファイバー直径が伝搬モードの波長より小さい光ファイバーである。「原子」をナノファイバーの表面上に導入すると原子から放出された光子が高効率でファイバーの伝搬モードに結合される。現在の光ファイバーネットワークにつなげることが単純なので、このようなナノファイバー上の単一光子光源がいわゆる量子ネットワークに向いているテクノロジーだと考えられる。

2. 研究の目的

ナノファイバー表面上に導入された「原子」は結合効率が20%に限られている。この値でも高効率だと考えられるが、量子情報の応用を実現するために更に増やす必要がある。本研究ではナノ光ファイバーに共振器を加え、「原子」から放出された光子とファイバー伝搬モードの結合を増強することを目的とする。

3. 研究の方法

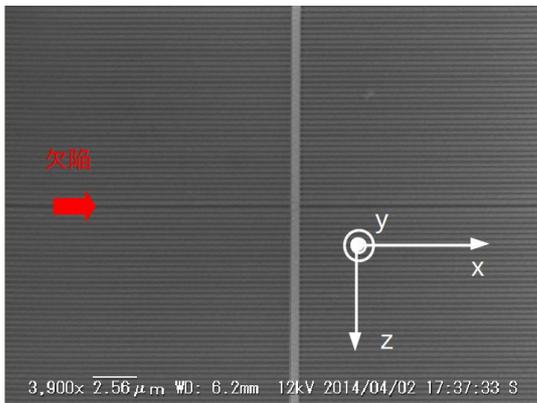


図1 電子顕微鏡で撮ったデバイスのイメージ。ナノ光ファイバー、グレーティングと欠陥(赤い矢印)がはっきりと表している。

(1) フォトニック結晶ナノ光ファイバー外部グレーティングを用い光ナノファイバーの界面上ブラッグミラーを実現した。グレーティングと光ナノファイバーの組み合わせはフォトニック結晶導波路と考えられる。グレーティングのデザインは FDTD 数値計算で行い、最低のロスと共に最高の反射率を果たすパラメーターを検索した。最適なパラメーターが決まったら、グレーティングの製作を行いファイバーとグレーティングの組み合わせ

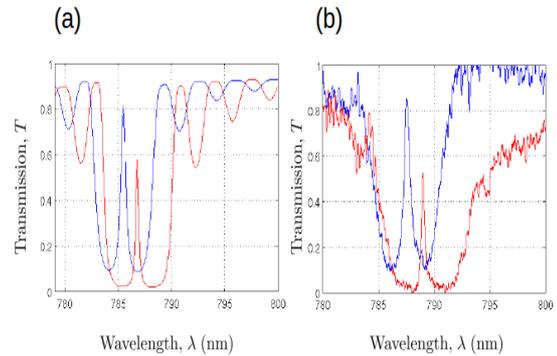


図2 (a) FDTD 数値計算結果上のキャビティー透過ベクトル (b) 実験で測定された透K12Z020148E 透過ベクトル。青(赤)い線: x(y) 偏光モード

せの特徴を測定した。

(2) フォトニック結晶共振器

欠陥(不連続点)を含む外部グレーティングを用いナノ光ファイバーにフォトニック結晶共振器を実現した。欠陥としてはグレーティングの中心に、グレーティング周期の3/2倍のギャップを開けた(図1)。グレーティングのデザインは FDTD 数値計算で行い、共振器 Q 値の最適化と共に最低のロスを実現するパラメーターを検索した。最適なパラメーターに基づきグレーティングの製作を行い、ファイバーとグレーティングの組み合わせの光学特性を測定した。

(3) 共振器による自然放出の増強

「原子」として量子ドットを利用し、ファイバーの表面上に量子ドットを導入した。その次に欠陥を含むグレーティングの中心を量子ドットの位置に合わせた。この状態でグレーティングとファイバーを組み合わせると励起された量子ドットの自然放出が共振器共鳴周波数で増強された[図3]。

4. 研究成果

本研究はユニークな方法で光と「原子」の相互作用を制御することを目的とする。外部グレーティング法でナノ光ファイバーに共振器を加えた。「原子」として量子ドットを利用しました。本研究代表研究者の Mark Sadgrove が欠陥(不連続点)を含む外部グレーティングを用いナノ光ファイバーにフォトニック結晶共振器を実現した。欠陥としてはグレーティングの中心に、グレーティング周期の3/2倍のギャップを開けた[図1]。

グレーティングのデザインは FDTD 数値計算で行い、共振器 Q 値の最適化と共に最低のロスを実現するパラメーターを検索した。最適なパラメーターに基づきグレーティングの製作

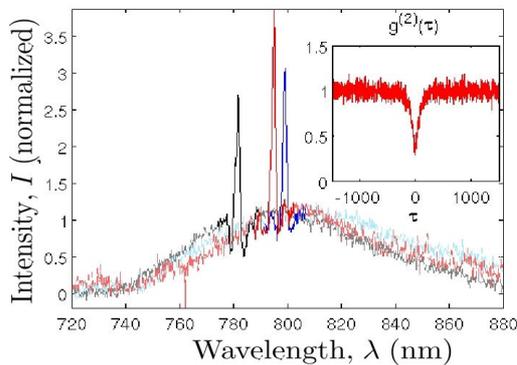


図 3 実験結果、量子ドットのスペクトルが現れた。幅広いピークが標準スペクトルであり、鋭いピークが共振器による増強である。インセットの図がアンチバンチングの信号を表す。これが単一量子ドットがあることを証明する。

を行い、ファイバーとグレーティングの組み合わせの光学特性を測定した。数値計算の結果と実験結果が一致する。本方法で生成された共振器は Q 値が 4000 まで実現できた[図 2]。この値は単一材料から作られたフォトニック結晶ナノビーム共振器と近似である。

更に、ナノファイバーの効果的な屈折率が直径に依存するため、共振器の共鳴波長がナノファイバーの直径により制御できる。更にナノ光ファイバーの表面上に担持された量子ドットと組み合わせることで共振器効果により量子ドットの自然放出光強度の増強に成功した。自然放出の最大増強値 (enhancement factor) がほぼ 10 でした。この値は世界中のフォトニック結晶ナノビームを用いる研究所 (例えばハーバード大、Caltech 等) と同一。その上、共振器の影響で結合効率は 10% から 65% に増強された。

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 2 件)

[1] R. Yalla, M. Sadgrove, K. P. Nayak and K. Hakuta, "Cavity QED on a nanofiber using a composite photonic crystal cavity", Physical Review Letters Vol. 113, pp. 143601 (2014).

<http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.143601>

[2] M. Sadgrove, R. Yalla, K. P. Nayak, K. Hakuta, "Photonic crystal nanofiber using an external grating",

Optics Letters **38**, 2542 (2013).

<https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-38-14-2542>

〔学会発表〕(計 6 件)

[1] 外部グレーティングを用いたフォトニック結晶ナノ光ファイバーの実現：最適なデザイン及び制御に向けて M. Sadgrove, R. Yalla, K.P. Nayak, K Hakuta 日本物理学会 70 (1), 24pAN-2 2015/03/24 東京都、早稲田大学.

[2] M. Sadgrove, R. Yalla, K. P. Nayak, K. Hakuta, "Cavity QED on a Nanofiber" Coherent Quantum Dynamics, 2014/9/16, 沖縄県、沖縄科学技術大学院大学.

[3] 外部グレーティングを用いたナノ光ファイバー上のフォトニック結晶共振器の実現 M. Sadgrove, R. Yalla, K.P. Nayak, K. Hakuta 日本物理学会 69 (2), 9pAZ-10 2014/09/09, 愛知県中部大学 .

[4] M. Sadgrove, R. Yalla, K. P. Nayak, K. Hakuta, "Composite Photonic Crystal Cavity on a Nanofiber" CLEO: Science and Innovations, SM3M.2 2014/06/08, San Jose Convention Center, San Jose, U.S.A.

[5] M. Sadgrove, R. Yalla, K. P. Nayak and K. Hakuta, "Photonic crystal nanofibers: a workbench for quantum optics", 7th

Annual DoddWalls Symposium, 2013/11/12,
St Margaret's College University of Otago,
New Zealand .

[6] M. Sadgrove, R. Yalla, K. P. Nayak, K.
Hakuta, “Realization of a photonic
crystal nanofiber using an external
grating”, 日本物理学会 68, 26pBB-8, 147
2013/09/26, 徳島県、徳島大学..

〔その他〕

ウェブサイト：<http://www.cpi.uec.ac.jp>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

マーク サッドグローブ (Mark Sadgrove)
電気通信大学フォトニックイノベーション
研究センター・特任助教

研究者番号：40625000