

課題番号 : F-14-OS-0004  
 利用形態 : 機器利用  
 利用課題名(日本語) : ナノ光ファイバへの光共振器構造の作製  
 Program Title (English) : Fabrication of Nano-fiber Optical Cavity Using Focused Ion Beam  
 利用者名(日本語) : 岡本亮<sup>1), 2), 3)</sup>, 藤原正澄<sup>2), 3)</sup>, 高島秀聡<sup>1), 2), 3)</sup>, 佐川達郎<sup>3)</sup>, 大江康子<sup>3)</sup>, 小野裕介<sup>1)</sup>, 竹内繁樹<sup>1), 2), 3)</sup>  
 Username (English) : R. Okamoto<sup>1), 2), 3)</sup>, M. Fujiwara<sup>2), 3)</sup>, H. Takashima<sup>1), 2), 3)</sup>, T. Sagawa<sup>3)</sup>, Y. Oe<sup>3)</sup>, Y. Ono<sup>1)</sup>, S. Takeuchi<sup>1), 2), 3)</sup>,  
 所属名(日本語) : 1) 京都大学工学研究科 2) 北海道大学 電子科学研究所, 3) 大阪大学産業科学研究所  
 Affiliation (English) : 1) Kyoto University, Graduate School of Engineering, 2) RIES, Hokkaido University, 3) ISIR, Osaka University

### 1. 概要(Summary)

高効率単一光子源[1]や光量子メモリー[2]といった光量子情報デバイスの実現には、モード体積が小さく、かつ、広帯域共鳴波長制御が可能であり、さらに、シングルモードファイバとのロスレス結合が可能な微小共振器の開発が不可欠である。そこで、我々は、集束イオンビーム装置を用いてシングルモード光ファイバを直径 300 nm 程度まで細く引き伸ばしたナノ光ファイバ上に、300 nm 周期のブラッグブラッグ共振器構造の作製を行い、ダイヤモンド結晶中の窒素欠陥中心や CdSe/ZnS 量子ドットの発光波長 (~640 nm)での動作する共振器の開発を行ってきた。本年度は、作製したファイバブラッググレーティング共振器(NFBC)と、量子ドットとのカップリング実験を行い発光増強の観測を行った。

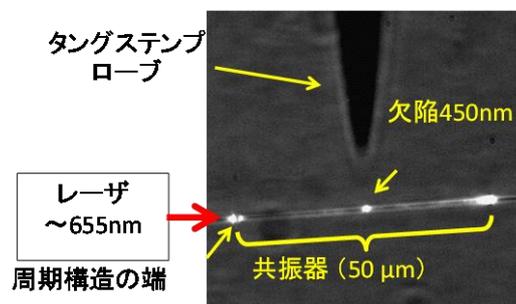


Fig.1 Optical microscope image of coupling between the tungsten tip and the NFBC.

(先端径 200 nm マイクロサポート社)をこの溶液に浸し、量子ドットをタングステンプローブ上に複数個付着させた。そして、Fig.1 に示すように、電子増倍 CCD (EMCCD Princeton Instrument 社 ProEM512B)付顕微鏡で観

### 2. 実験(Experimental)

#### ・利用した装置

集束イオンビーム装置 (SII 社, SMI-2050)

#### ・実験方法

NFBC の加工には集束イオンビーム(Focused Ion Beam ; FIB)装置(SII 社, SMI-2050)を用いた。プローブ電流 9.3 pA、ビーム径を 13 nm の設定で、Ga イオンビームをナノ光ファイバに照射し、周期 300 nm、繰り返し 80 のブラッググレーティングを 450 nm の間隔を開けて二つ形成しファイバブラッググレーティング共振器を作製した。

発光体としては量子ドット(CdSe/ZnS:発光中心波長 626nm Ocean Nano Tech 社)を用いた。この量子ドットをトルエン溶液中に分散させた後、タングステンプローブ

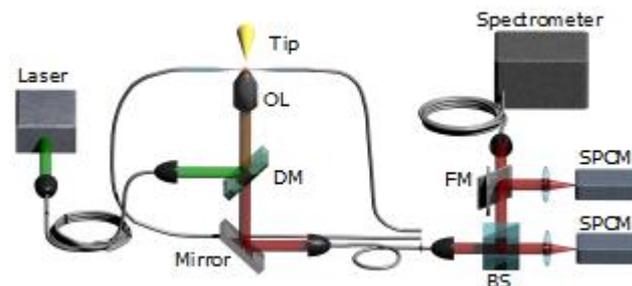


Fig.2 Experimental setup. OL: objective lens, DM: dichroic mirror, FM: flip mirror, BS: beam splitter, SPCM: single photon counting module.

察しながら、そのタングステンプローブを 3 軸のピエゾ素子を用いて NFBC 上に接触させることで、単一もしくは 2 ~ 3 個の量子ドットを欠陥領域に付着させた。

Fig.2 に発光特性の評価を行うために用いた実験装置を示す。光源には波長 532nm のパルスレーザー(Onefive社 Katana-05)を用いた。対物レンズ用いて共振器上の量子ドットを励起し、ドットからの蛍光をテーパファイバ経由、もしくは、対物レンズ経由で集光した。そして、それらの出力光に対して光子相関測定、もしくは、スペクトル測定を行った。

### 3. 結果と考察(Results and Discussion)

Fig.3 に、測定された透過スペクトルと発光スペクトルを示す。透過スペクトル(橙線)はナノ光ファイバの一端に接続したシングルモードファイバに白色光源を接続することで測定した。対物レンズを用いて量子ドットの蛍光を測定した場合(黒線)、一般的に見られるブロードなスペクトルが得られた。一方、ナノ光ファイバを用いて蛍光を観測した場合(赤線)、共振器による増強効果により、共振器の共鳴波長に一致する波長でピークが観測された。また、この増強ピークは、共鳴波長を制御した場合にも同様に観測

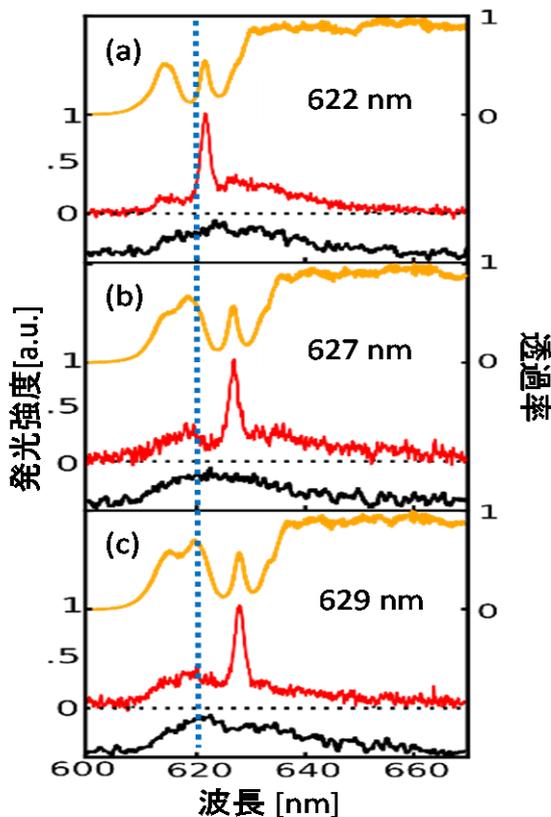


Fig.3 Transmittance and fluorescence spectra of the NFBC coupled with CdSe/ZnS quantum dots. Orange lines are transmittance spectra. Red and black lines are fluorescence spectra when measured through the nanofiber and the objective lens. Tuning wavelength of (a), (b), and (c) is 622 nm, 627 nm, and 629 nm, respectively.

された。さらに、発光ピークの強度比から増強効果を推定したところ、およそ 3 倍の増強が起こっていることがわかった。

今後の課題

実験で得られた増強度はおよそ 3 倍であった。この値は、時間領域差分法(FDTD)による計算結果よりも小さい。この原因の一つとして、加工時の構造の不均一性が考えられる。そこで、今後は加工時のパラメーターのさらなる最適化を行い高 Q 値共振器内蔵ナノ光ファイバの加工を行い、量子情報デバイスの開発に向けた研究を行う予定である。

### 4. その他・特記事項(Others)

参考文献

- [1] Matthew Pelton, Charles Santori, Jelena Vučković, Bingyang Zhang, Glenn S. Solomon, Jocelyn Plant, and Yoshihisa Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **89**, 233602 (2002).
- [2] H.P. Specht, C. Nölleke, A. Reiserer, M. Uphoff, E. Figueroa, S. Ritter, G. Rempe, Nature **473**, 190 (2011).

### 5. 論文・学会発表(Publication/Presentation)

論文

- (1) Andreas W. Schell, Hideaki Takashima, Shunya Kamioka, Yasuko Oe, Masazumi Fujiwara, Oliver Benson, and Shigeki Takeuchi, Scientific Reports, accepted.

学会発表

- (1) 大江康子、上岡俊也、A.Shell, 高島秀聡、藤原正澄、O.Benson, 竹内繁樹、第 30 回量子情報技術研究会(QIT)、平成 26 年 5 月 12 日
- (2) H.Takashima, A.W.Schell, S.Kamioka, Y.Oe, M.Fujiwara, O.Benson and S.Takeuchi, SPIE Photonics West 2015, 2015 年 2 月 11 日
- (3) 大江康子、A.Shell, 高島秀聡、上岡俊也、藤原正澄、O.Benson, 竹内繁樹、日本物理学会第 70 回年次大会、平成 27 年 3 月 23 日

### 6. 関連特許(Patent)

なし