

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244079

研究課題名(和文)ダイヤモンド結晶欠陥を型原子として利用した、単一光子の高効率量子メモリの実現

研究課題名(英文) Toward the realization of highly efficient photonic quantum memory using diamond vacancy centers as lambda-type atoms.

研究代表者

竹内 繁樹 (Takeuchi, shigeki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80321959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光量子メモリの実現を旨とし、ダイヤモンド窒素欠陥(NV)中心とファイバ結合微小共振器を組み合わせた系に着目、研究を進めた。その結果、ダイヤモンドナノ結晶中のNV中心について1.2GHzという非常に狭い線幅の発光観測に初めて成功した。また、ファイバ結合微小球共振器の極低温下(10K以下)制御にも成功した。さらに、型電子準位実現に必須である、ナノ光ファイバに結合させたNV中心の光検出磁気共鳴信号の取得にも成功した。さらに、ナノ光ファイバ中に微小共振器を形成した新デバイスを実現、単一発光体の発光強度増強の観測にも成功した。以上のように、光量子メモリの実現に向けた様々な研究成果を得た。

研究成果の概要(英文)：Toward the realization of photonic quantum memory, we studied on the system where a nitrogen vacancy center (NVC) in diamond is coupled to micro optical cavity with tapered optical fiber input/output. First, we successfully observed the first observation of an ultra-narrow linewidth (1.2 GHz) of the photoemission from a single NV center in a nanodiamond. We also realized a fiber-microsphere system at cryogenic temperature below 10K. We also successfully performed the optically detected magnet resonance of a single/few NV centers coupled with a tapered optical fiber. Finally, we succeeded in the realization of a nanofiber brag cavity and the highly efficient coupling of a single emitter to the system. These results are important steps for the realization of the photonic quantum memory.

研究分野：量子光学、量子情報

キーワード：光子 量子メモリ 量子情報 量子中継

## 1. 研究開始当初の背景

量子情報技術とは、量子力学の基本的な性質を、情報通信や情報処理に応用する試みである。光子は、光ファイバ等で長距離伝送が可能であり、またその状態を高精度で特定、検出できるなど、非常に有力な情報担体である。その光子を用いた量子情報技術で、現在ボトルネックとなっているのが、光量子メモリである。たとえば、現在 100km 程度が限界である量子暗号通信を長距離化する方式として期待されている量子中継においては、隣接する中継点から送られてきた光子の量子状態を 0.1ms 程度の間壊さずに「保存」しなければならない。これまでに、原子集団における電磁誘起透明化(EIT)を用いる方法などが実証されているが、保存時間も数マイクロ秒程度と短く、かつ、その帯域が狭いため、フォトンパルス幅を単位とすると、せいぜい 10 パルス以下程度の遅延時間に留まっている。これらの問題点に対して、本提案の連携研究者である越野らは、片側キャビティ中に閉じ込めた型原子を利用する、高効率光量子メモリの画期的な理論提案を 2010 年に行っていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、越野らの提案する光量子メモリを、ファイバ結合微小共振器とダイヤモンド NV センターによる実現を目指した。

ダイヤモンド NV センターは、高い安定性を持ち、また、低温下で縦緩和時間でリミットされたゼロフォノン線幅が観測されているように、十分長い位相緩和時間を持つ。その基底状態および励起状態は、電子スピンの応じて 3 つに分裂している。我々は、その基底状態のうち  $M_s = \pm 1$  の 2 つの状態と、励起状態の  $M_s = 0$  の状態を、型として利用することを構想した。

また、ファイバ結合微小共振器としては、当初念頭においた微小球共振器の他に、より適した新たな共振器構造の開発も目的とした。

## 3. 研究の方法

以下の 5 つの項目について研究を進めた。

### (1) ダイヤモンドナノ結晶中単一 NV 中心からの発光の高分解能スペクトロスコピー

光量子メモリの実現にむけて、単一 NV 中心からの発光線幅を知ることは非常に重要である。しかし、研究開始時、バルクダイヤモンド中の NV 中心に関しても報告は殆どなく、ダイヤモンドナノ結晶中のものに関しては全くない状況であった。

### (2) ナノ光ファイバの実現と、単一発光体の結合

光量子メモリの実現のためには、NV 中心などの単一発光体と、光子を強く相互作用させる必要がある。そのための有力な系として、直径を数百ナノメートルにまで引き延ばし

たナノ光ファイバと、単一発光体の結合について研究を進めた。

### (3) ナノ光ファイバと結合したダイヤモンドナノ結晶中 NV 中心の光検出磁気共鳴(ODMR)

本構想の光量子メモリを実現するには、ダイヤモンド中 NV 中心の基底状態  $M_s = \pm 1$  のエネルギーを制御し、縮退させる必要がある。そのための単一 NV 中心の電子状態の検出と制御のために、ODMR 実験系を、大阪大学水落先生のご協力の下、構築した。

### (4) ファイバ結合微小球共振器の極低温下での実現と制御

NV 中心などの単一発光体と、光子を強く相互作用させるための共振器として、当初微小球共振器を想定した。実現のためには、極低温化での結合系の実現と制御を試みた。

### (5) 新しい共振器の実現と単一発光体との結合

ファイバ結合微小球共振器は高い Q 値などの利点を有するが、制御性やモード体積などに問題も抱えている。本研究においては、それらの問題を解決可能な新しい共振器の実現についても研究を進めた。

## 4. 研究成果

本研究において、下記のような成果を得た。

### (1) ダイヤモンドナノ結晶中単一 NV 中心からの発光の高分解能スペクトロスコピーの実現

我々は、特定の基板上に分散させたダイヤモンドナノ結晶中の NV 中心が、非常に鋭い共鳴ピークを示し、かつ、フォノンサイドバンドが大きく抑制されることを見出した (Optics Express 2012)。

また、ファブリペロ型共振器を用いた高分解能フォトルミネッセンス測定装置を構築、ダイヤモンドナノ粒子中の NV 中心から、1.2GHz という非常に狭い線幅のゼロフォノン線の発光の観測にも成功した (Optics Express 2013)。従来一般に想定されていた、ダイヤモンドナノ結晶中の NV 中心からの発光は非常にブロードであるという認識を覆す成果である。

### (2) ナノ光ファイバの実現と、単一発光体の結合

我々は、直径 300nm のナノ光ファイバを実現 (Opt. Exp. 2011)、また問題となっていた透過率の減少の原因を明らかにした。

さらに、その上に付着させた半導体量子ドットからの発光の、ファイバへの高効率結合を実証した (Nano Letters 2011、図 1)。この成果は、量子ドットや蛍光蛋白などの光ナノプローブからの発光を、共焦点顕微鏡などのシステム無しで、直接単一モードファイバに

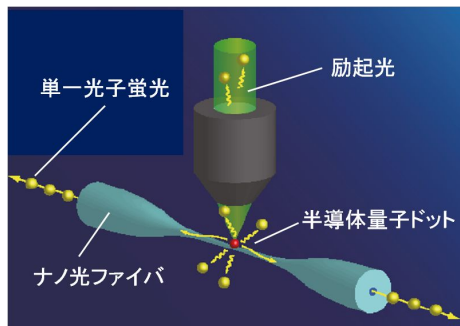


図1 ナノ光ファイバ表面の半導体量子ドットからの単一光子蛍光の高効率結合

高効率で出力できることを意味する。単一モードファイバに高効率で出力する単一光子源の実現という、光子量子情報への応用上の意味だけでなく、光化学やライフサイエンスにいたるまで、幅広く応用可能性がある発見である。

さらに我々は、ダイヤモンドナノ結晶をナノ光ファイバに結合することにも成功した。(Optics Express 2012)。単一モード光ファイバに結合した光子数は、既報告中最大値を得ることができた。

また、ナノ光ファイバとNV中心の結合条件についても、電磁界数値解析により明らかにした(Optics Express 2014)。

### (3) ナノ光ファイバと結合したダイヤモンドナノ結晶中 NV 中心の光検出磁気共鳴(ODMR)の実現

我々は、単一のダイヤモンドナノ結晶をナノ光ファイバに結合させた系を用いて、そのナノ結晶中の NV 中心の ODMR 実験に成功した。また、外部磁場を掃引することで、 $M_s = \pm 1$  の 2 つの状態間のエネルギーを制御し、縮退状態を実現することにも成功した(論文準備中)。

またこの研究と関連し、本プロジェクトにおいて、外部磁場を印加しながら、ナノ光ファイバを極低温まで冷却可能なクライオスタットを設計、構築した。

### (4) ファイバ結合微小球共振器の極低温下での実現と制御

ファイバ結合微小球共振器の極低温下(10K以下)での厳密な制御にも成功した(Optics Express 2012)。実験では、偏光を利用した、微小球共振器に由来する位相シフトスペクトルの結合条件依存性の取得にも、極低温下で成功した。光子量子メモリに必要な、片側キャビティ系としての微小球共振器の利用につながる成果である。

### (5) 新しい共振器の実現と単一発光体との結合

微小球共振器は、高いQ値などの優れた特性を備えている一方、高度な制御が必要となるため、大がかりな極低温実験装置が必要となる。また、共振器の波長を変化させること

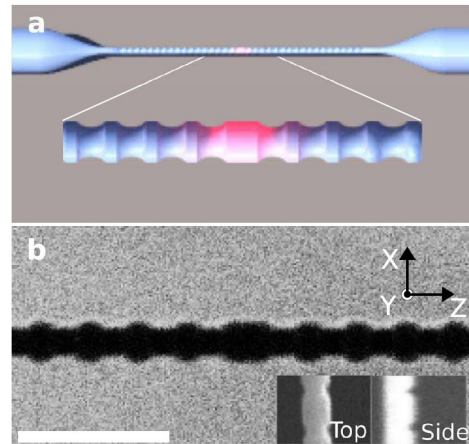


図2 実現した微小共振器内蔵のナノ光ファイバ。a. 模式図 b. 作成したデバイスの、走査イオン像(SIM)。白い線は、 $1\mu\text{m}$ (千分の1mm)。ナノ光ファイバの直径は270nm。

も非常に困難であり、温度変化や、導入ガスの堆積によっても、共鳴波長をわずか(可視域で0.1nm程度)に変化させることしかできなかった。

我々は、新たなデバイスとして、ナノ光ファイバ中に、収束イオンビームを用いて微小共振器を形成した「ナノファイバブラッグキャビティ(NFBC)」の実現に成功した(図2)。

また、NFBCに加える張力を制御することで、従来の固体微小共振器には見られない、可視光域で20nmにも及ぶ共鳴波長制御が可能であることを実証した。微小球共振器を含め、一般に固体共振器の共鳴波長制御は非常に困難であり、この共鳴波長制御はNFBCの重要な特長である。

さらに単一発光体を結合させたハイブリッドデバイスにおいて、共振器量子電磁気学的効果による2.7倍の発光強度増強の観測にも成功した(Scientific Report 2015)。

これらは、光子量子メモリの実現にむけた重要な成果である。

以上のように、光子量子メモリの実現に向けた様々な研究成果を得ることができた。

本研究に対する、連携研究者である東京医科歯科大学越野和樹准教授をはじめ、大阪大学水落憲和准教授、フンボルト大学ベルリン Benson Oliver 教授および研究室の皆様、大阪大学産業科学研究所谷口正輝教授ならびにナノテクノロジー設備供用拠点、住友電気工業株式会社のご支援に感謝します。

また研究室のスタッフ、学生の皆様のご協力に感謝します。

### 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 24件)

- (1) A. Schell, H. Takashima, S. Kamioka, Y. Oe, M. Fujiwara, O. Benson and S. Takeuchi, "Highly Efficient Coupling of nanolight emitters to an ultra-wide tunable nanofiber cavity", Scientific Reports, vol.5, pp.9619/1-5, (2015.5), DOI:10.1038/srep09619, 査読有
- (2) H.Q. Zhao, M. Fujiwara, M. Okano and S. Takeuchi, "Observation of 1.2-GHz linewidth of zero-photon-line in photoluminescence spectra of nitrogen vacancy centers in nanodiamonds using a Fabry-Perot interferometer", OPTICS EXPRESS, vol.21, no.24, pp.29679-29686, (2013.11), DOI:10.1364/OE.21.029679, 査読有
- (3) M. Fujiwara, T. Noda, A. Tanaka, K. Toubaru, H.Q. Zhao and S. Takeuchi, "Coupling of ultrathin tapered fibers with high-Q microsphere resonators at cryogenic temperatures and observation of phase-shift transition from undercoupling to overcoupling", OPTICS EXPRESS, vol.20, no.17, pp.19545-19553, (2012.8), DOI:10.1364/OE.20.019545, 査読有
- (4) T. Schröder, M. Fujiwara, T. Noda, H.Q. Zhao, O. Benson and S. Takeuchi, "A nanodiamond - tapered fiber system with high single-mode coupling efficiency as key element for integrated quantum technology and nanophotonics", OPTICS EXPRESS, vol.20, no.10, pp.10490-10497, (2012.4), DOI:10.1364/OE.20.010490, 査読有
- (5) M. Fujiwara, K. Toubaru, T. Noda, H.Q. Zhao and S. Takeuchi, "Highly Efficient Coupling of Photons from Nanoemitters into Single-Mode Optical Fibers", Nano Letters, vol.11, no.10, pp.4362-4365, (2011.10), DOI:10.1021/n12024867, 査読有

〔学会発表〕(計 201 件)

- (1) H. Takashima, A.W. Schell, S. Kamioka, Y. Oe, M. Fujiwara, O. Benson and S. Takeuchi, "Ultra-wide tuning of a nanofiber Bragg grating cavity", SPIE Photonics West 2015, The Moscone Center, San Francisco, USA, (2015.2.11).
- (2) S. Takeuchi, "Photonic quantum circuits and quantum metrologies", OSA'S97th Annual meeting Frontiers in Optics 2013, Hilton Bonnet Creek, Florida, USA, (2013.10.6), Invited.
- (3) S. Takeuchi, "Nano optical fibers for photonic quantum information", Optical Nanofiber Applications: From

Quantum to Bio Technologies ONNA 2013, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, 沖縄県国頭郡, 日本(2012.6.5), Invited.

- (4) M. Fujiwara, K. Toubaru, T. Noda, H.Q. Zhao and S. Takeuchi, "Highly Efficient Coupling of Photons from Single CdSe/ZnS Nanocrystals into Single-Mode Optical Fibers", CLEO-QELS 2012 (Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference), San Jose Convention Center, San Jose, USA, (2012.5.9).

〔図書〕(計 6 件)

- (1) 竹内繁樹、日本セラミックス協会、CERAMICS JAPAN、「先端機能性材料と光技術 XII. ナノ光ファイバ-を用いた単一光子源-量子情報科学の視点から」、2014, 49, pp.694-698.
- (2) 藤原正澄、竹内繁樹、化学工業社、化学工業、「ナノテーパ光ファイバを駆使した光量子デバイス」、2012, 63, pp.25-30.

〔産業財産権〕

取得状況(計 2 件)

名称：テーパ光ファイバ  
 発明者：竹内繁樹  
 権利者：国立大学法人北海道大学  
 種類：特許  
 番号：第 5354605 号  
 出願年月日：平成 22 年 1 月 27 日  
 取得年月日：平成 25 年 9 月 6 日  
 国内外の別：国内

〔その他〕

(1) 報道関連  
 本研究に関連したアウトリーチ活動  
 (小学校での特別授業)  
竹内 繁樹、「ダンスや科学 子ら体感」、  
 京都新聞(2012.11)

ホームページ等

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

6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
竹内 繁樹 (TAKEUCHI SHIGEKI)  
 京都大学・大学院工学研究科・教授