

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26707022

研究課題名（和文）ナノ光ファイバー端を用いた導波路量子電気力学の研究

研究課題名（英文）Waveguide quantum electrodynamics using optical nanofiber

研究代表者

青木 隆朗 (Aoki, Takao)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10343146

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,500,000 円

研究成果の概要（和文）：一般的な単一モード光ファイバーと断熱的に接続したサブ波長径ナノ光ファイバーと単一量子発光体との高効率な相互作用の実現を目指し、超低損失テーパファイバーを開発した。さらに、それに基づいた新奇ナノファイバー共振器を開発するとともに、これをレーザー冷却単一原子と結合することでナノファイバー共振器と単一原子の強結合を実現した。また、これらの技術に基づく「導波路量子電気力学」の開拓を目指し、ダイヤモンドナノワイヤー結晶中の窒素空孔欠陥とナノ光ファイバーの高効率結合系の検証を行った。

研究成果の概要（英文）：Toward realization of highly efficient interaction between single quantum emitters and sub-wavelength optical nanofibers adiabatically connected to standard single-mode optical fibers, we developed ultra-low-loss tapered optical fibers and novel nanofiber resonators. Furthermore, we have realized strong coupling between single atoms and nanofiber resonators. Toward “waveguide quantum electrodynamics”, we have numerically studied high-efficiency coupling between NV centers in diamond nanowires and optical nanofibers.

研究分野：量子光学

キーワード：量子光学

1. 研究開始当初の背景

共振器量子電気力学系は、光共振器に閉じ込められた光と、それと相互作用する単一原子等の単一量子発光体からなる系であり、光と物質の相互作用を最も単純な形で具現化した系であるといえる。特に、高Q値微小共振器を用いることで、単一量子発光体と共振器モードとを選択的に結合させることができ、通常系では様々な緩和過程に阻まれて困難な、純度の高い量子状態の生成や、特異な現象の観測が可能になる。これらの特徴から、共振器量子電気力学系は量子光学の理想的な実験対象として精力的に研究されてきた。さらに近年では、光を用いた量子情報技術の実現に有力な系であると期待されており、共振器量子電気力学の実験技術の開拓に貢献した Serge Haroche 氏が David Wineland 氏とともに 2012 年のノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい。

共振器量子電気力学系における単一量子発光体と共振器モードの選択的な結合がもたらす重要な効果に、自然放出の増強(パーセル効果)がある。すなわち、励起状態にある単一量子発光体からの自由空間モードへの自然放出レートに比べて、共振器モードへの自然放出レートが大きくなる効果である。パーセル効果の強さは自然放出結合率(値)によって表される。高Q値微小共振器の作製技術の向上に伴い、最近の研究では80%以上の高い値が実験的に実現されている。特に、高反射率誘電体多層膜ミラーを用いたファブリーペロー共振器とレーザー冷却単一原子との組み合わせによる共振器量子電気力学系を対象にした実験の進展は目覚ましく、量子光学において重要なさまざまな現象が観測・実現され、また、光を用いた量子情報に関する極めて重要な成果が挙げられている[R. Miller et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys 38, S551 (2005)]。

これらの成果を実際に量子情報技術へ応用するには、これらの要素機能を組み合わせ、量子情報として有意な規模の系へ拡張する必要がある。特に、既存の光技術との整合性や安定度の観点から、各要素間を自由空間モードではなく単一モード光ファイバーを介して結合することが不可欠である。しかし、従来の共振器量子電気力学系は、外部結合効率が低いという重大な欠点を持つ。さらに、自由空間中の光学素子による損失や光ファイバーへの結合の際のモード不整合による損失が加わり、単一量子発光体とファイバーのモードの最終的な結合効率はわずか数%以下である。

一方、パーセル効果は、光を横モードと縦モードの両方で強く閉じ込めた共振器だけでなく、光を横モードのみで強く閉じ込めた導波路においても発現し、横モードの閉じ込めが強いほど、すなわち導波モード断面積が小さいほど光と単一量子発光体の結合が強くなる。しかし従来は、導波路のパーセル効

果では共振器量子電気力学系に匹敵する高い値は得られないと考えられてきた。

2. 研究の目的

本研究では、一般的な単一モード光ファイバーと断熱的に接続したサブ波長径ナノ光ファイバーの出射モードと単一量子発光体との相互作用を利用して高い自然放出結合率を実現し、「導波路量子電気力学」を開拓する。

3. 研究の方法

(1) 一般的な単一モード光ファイバーと断熱的に接続したサブ波長径ナノ光ファイバーと単一原子等の単一量子発光体とを高効率に接続し、さらにこれを単一モード光ファイバーとを高効率に結合するには、ナノ光ファイバーと単一モード光ファイバーとの接続部(テーパ部)における損失を極限まで抑制することが重要である。テーパ部の損失は、本質的には有限なテーパ角による基本モードと高次モードの結合によって起こる。高次モードへの結合はテーパ角が小さいほど抑制されるが、その結合率は基本モードと高次モードの伝搬定数の差に依存し、断熱条件として定式化される。すなわち、局所的なテーパ角が断熱基準角と比べて十分小さければ、テーパは断熱的であり、高次モードへの結合は無視できる。これまで、テーパファイバーのテーパ形状としては指数関数形状や直線形状が用いられてきたが、断熱条件を考慮して高次モードへの結合による損失を抑制したテーパ形状の検討やその作成はなされていなかった。そこで、断熱条件を満たすテーパ部の最適形状を求めるとともに、その作成方法を開発する。

(2) (1)において実現したテーパ部の超低損失化に基づき、テーパ部の外側の単一モード光ファイバー部にファイバーブラッググレーティング(FBG)を配置したナノ光ファイバー共振器を開発する。

(3) (2)において実現したナノファイバー共振器と単一原子を結合し、ナノファイバー共振器量子電気力学系を実現する。

(4) 単一発光体としてダイヤモンド微結晶中の窒素空孔欠陥(NV中心)を考え、ナノワイヤ状のダイヤモンド結晶を利用したナノ光ファイバーとの高効率結合手法を電磁界計算により検証する。

4. 研究成果

(1) 従来用いられていた直線形状(テーパ角2mrad)のものとは比べて、同程度の透過率を維持しながら(損失を抑制しながら)全長を1/3に短尺化することに成功した。さらに再現性についても検討し、5本のテーパファイバーを作製したところ、すべて

99%以上の透過率（1%以下の損失）が得られた（図1）。この結果はOptics Express誌に掲載された。また、テーパファイバーと結合した微小光共振器を用いた共振器量子電気力学系に関する新たな理論を確立した。その結果はPhysical Review A誌に掲載された。

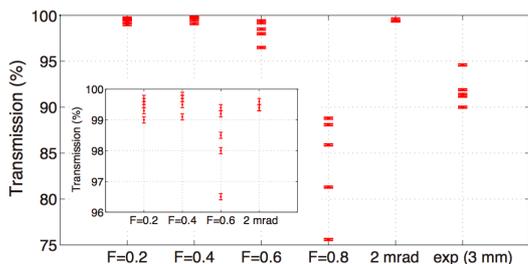


図1：テーパファイバーの透過率

(2) テーパー部を介して単一モード光ファイバーに両側で接続されたナノ光ファイバーに対し、同一の単一モード光ファイバー素線に作製したFBGファイバー2本を融着し、ナノ光ファイバー共振器を作製した。FBGの反射スペクトルが温度によってシフトする性質を利用して、外部結合効率が温度によってその場制御できることを確認した（図2）。

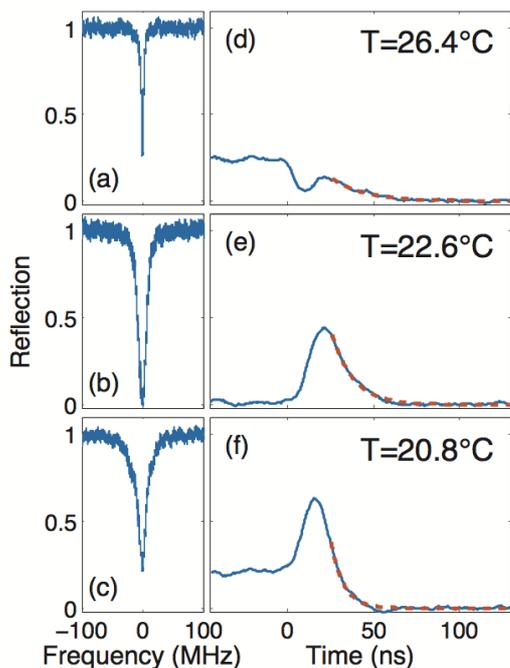


図2：外部結合効率の温度依存性

臨界結合条件における共振器の光子寿命は12.5 nsであった。

(3) (2)において実現したナノファイバー共振器と単一原子を結合し、ナノファイバー共振器量子電気力学系を実現した（図3）。原子と共振器の結合レート、共振器の緩和レート、原子の緩和レートはそれぞれ $2\pi \times (7.4,$

6.4, 2.6) MHz であり、強結合条件が達成された。これは全ファイバー共振器による初めての強結合共振器量子電気力学系の実現であり、大きな成果である。これらの結果はPhysical Review Letters誌に掲載された。

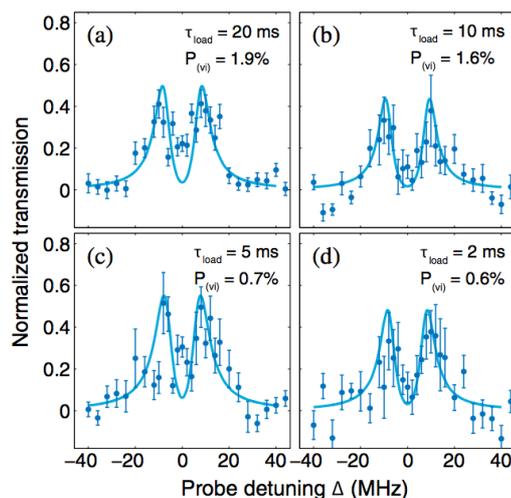


図3：ナノ光ファイバー共振器と原子の結合による真空ラビ分裂スペクトル

(4) 単一発光体としてダイヤモンド微結晶中の窒素空孔欠陥(NV中心)を考え、ナノワイヤー状のダイヤモンド結晶を利用したナノ光ファイバーとの高効率結合手法を電磁界計算により検証した。半径85nm、長さ3.6μmのナノワイヤーを用いることで、75%という高い自然放出結合効率が得られることを明らかにした。これは、共振器量子電気力学系に匹敵する効率であり、導波路量子電気力学の有用性を示すものである。結果は投稿中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5件)

(1) Kentaro Wakui, Yuya Yonezu, Takao Aoki, Masahiro Takeoka, and Kouichi Semba, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有、Vol. 56、2017、p. 058005

(2) H. Endo, M. Fujiwara, M. Kitamura, T. Ito, M. Toyoshima, Y. Takeyama, H. Takeoka, R. Shimizu, N. Laurenti, G. Vallone, P. Villorosi, T. Aoki, and M. Sasaki, Optics Express, 査読有、Vol. 24、2016、p. 8940

(3) Shinya Kato and Takao Aoki, Physical Review Letters, 査読有、Vol. 115、2015、p. 93603

(4) Scott Parkins and Takao Aoki, Physical

Review A、査読有、Vol. 90、2014、pp. 053822-1-12

(5) Ryutaro Nagai and Takao Aoki, Optics Express、査読有、Vol. 22、2014、pp. 28427-28346

〔学会発表〕(計 20 件)

(1) 楠崎晃司、青木隆朗、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月、大阪大学

(2) 平林裕貴、島田皓平、牛見聡仁、稲田賢、青木隆朗、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月、大阪大学

(3) Takao Aoki, IWQD2017, 2017 年 3 月、国立情報学研究所

(4) 青木隆朗、量子エレクトロニクス研究会、2016 年 12 月、上智大学軽井沢セミナーハウス

(5) 平林裕貴、牛見聡仁、稲田賢、島田皓平、吉田哲也、青木隆朗、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月、金沢大学

(6) 米津佑哉、和久井健太郎、青木隆朗、仙場浩一、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月、金沢大学

(7) Takao Aoki, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, 2016 年 6 月、理化学研究所

(8) 和久井健太郎、米津佑哉、青木隆朗、仙場浩一、量子情報技術研究会、2016 年 5 月、高知工科大学

(9) 米津佑哉、和久井健太郎、青木隆朗、仙場浩一、量子情報技術研究会、2016 年 5 月、高知工科大学

(10) 千賀功平、松橋悠汰、加藤真也、青木隆朗、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月、東北学院大学

(11) Takao Aoki, International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems, 2016 年 1 月、東京大学

(12) Takao Aoki, WOMA2015, 2015 年 12 月、北海道大学

(13) 加藤真也、青木隆朗、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月、関西大学

(14) 楠崎晃司、青木隆朗、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月、関西大学

(15) Takao Aoki, ONNA2015, 2015 年 5 月、沖縄科学技術大学院大学

(16) 村田紘子、青木隆朗、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月、早稲田大学

(17) 楠崎晃司、青木隆朗、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月、早稲田大学

(18) 長南翔、青木隆朗、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月、早稲田大学

(19) 齋藤新悟、青木隆朗、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月、早稲田大学

(20) 永井隆太郎、青木隆朗、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月、中部大学

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称：テーパー光ファイバの製造方法

発明者：青木隆朗、永井隆太郎

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2015-032026

出願年月日：2015 年 2 月 20 日

国内外の別：国内

名称：量子ゲート装置および量子計算方法

発明者：徳永裕己、青木隆朗

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2016-002172

出願年月日：2016 年 1 月 8 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.qo.phys.waseda.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木 隆朗 (AOKI, Takao)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10343146