

光子間の高効率固体量子位相ゲート素子の実現に関する研究 (061401001)

Researches on the realization of highly efficient solid state quantum gates for photons

研究代表者

竹内 繁樹 北海道大学 電子科学研究所

Shigeki Takeuchi Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

研究分担者

笹木 敬司[†] 藤原 英樹[†] 岡本 亮[†] 藤原 正澄[†] 高島 秀聡[†] 趙 洪泉[†]

Keiji Sasaki Hideki Fujiwara Ryo Okamoto Masazumi Fujiwara

Hideaki Takashima Hong-Quan Zhao

[†]北海道大学 電子科学研究所

[†]Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

研究期間 平成 18 年度～平成 22 年度

概要

量子情報通信は、量子暗号通信をはじめ、まったく新しい機能や特長を持つ。そのキーデバイスが、一方の光子の状態により、他方の光子の位相を変化させる「量子位相ゲート」である。本研究では、安定して高効率で動作する、固体量子位相ゲート素子の実現を目的とし、固体共振器中に閉じこめられた単一発光体に対して、単一モードテーパファイバを光子入出力に用いる、高効率の固体量子位相ゲート素子の実現を目指す。単一発光体と光子がコヒーレントに相互作用するために、極低温 (10K 以下) で微小球とテーパファイバを結合可能な実験装置、そこで生じる単一光子レベルの位相シフトの観測方法などを開発した。

Abstract

Quantum info-communication provides us with new functions such as quantum key distribution. A quantum phase gate, which shifts the phase of the target photon according to the control photon, is a key device for quantum info-communication. In this research, we aim to realize a highly efficient solid-state quantum phase gate using a tapered optical fiber and single light emitters confined in a solid state optical resonator. For this purpose, we have realized the coupling of a micro-sphere resonator to a tapered fiber at cryogenic temperature, and the measurement of a phase shift with a probe light at single-photon level.

1. まえがき

量子情報通信は、物理的に盗聴者を排除する量子暗号通信や、シャノン限界を超えた通信容量を持つ量子通信など、まったく新しい機能や特長を持つ。そのキーデバイスが、一方の光子の状態により、他方の光子の位相を変化させる「量子位相ゲート」である。

本研究では、安定して高効率で動作する、固体量子位相ゲート素子の実現を目的とし、固体共振器中に閉じこめられた単一発光体に対して、単一モードテーパファイバを光子入出力に用いる、高効率の固体量子位相ゲート素子の実現を目指した。

その目標に向け、「テーパ光ファイバ、固体微小球共振器と単一発光体の結合」、「単一発光体の極低温での物性評価技術の確立」、「極低温下で微小球とテーパファイバを結合可能な実験装置の実現」、「単一光子レベルの位相シフトの観測方法の開発」、「高い量子干渉性を持つ光子源の実現と、光量子回路への応用」などの研究を行った。

器と単一発光体の結合」、「単一発光体の極低温での物性評価技術の確立」、「極低温下で微小球とテーパファイバを結合可能な実験装置の実現」、「単一光子レベルの位相シフトの観測方法の開発」、「高い量子干渉性を持つ光子源の実現と、光量子回路への応用」などの研究を行った。

2. 研究内容及び成果

2.1 極低温下でのファイバ結合微小共振器の実現

単一発光体のコヒーレンス時間を、量子位相ゲートに必要なだけ増大させるためには、一般に極低温 (10K 以下) 環境が必要となる。しかし、直径 $1\mu\text{m}$ 以下のテーパファイバと微小球を、10 ナノメートル程度の精度で光学的に結合させる実験を、極低温で行った例はなかった。

我々は、直径 20cm のサンプル室と、8 本の光ファイバを持つ特殊クライオスタットを構築、極低温動作 3 軸ピエゾアクチュエータなど実装し実験装置を完成させた。そのクライオスタットを利用して、可視域 (638nm、ダイヤモンド NV の共鳴波長) では世界で初めて、極低温での微小球とテーパファイバのカップリングに成功した (図 1、OptExp 2010、誌上発表リスト [1])。実験は、10K で行っている。微小球とテーパファイバ間の距離が十分大きい ($\sim 400\text{nm}$) 時には、透過スペクトルには微小球の共鳴によるディップは生じていない。しかし、距離が短くなるにつれ、共鳴によるディップが現れ、ほぼ最適結合状態と推定される 50nm の時点で、共鳴によるディップの線幅は 40MHz となっている。これは、 5×10^6 の Q 値に相当す

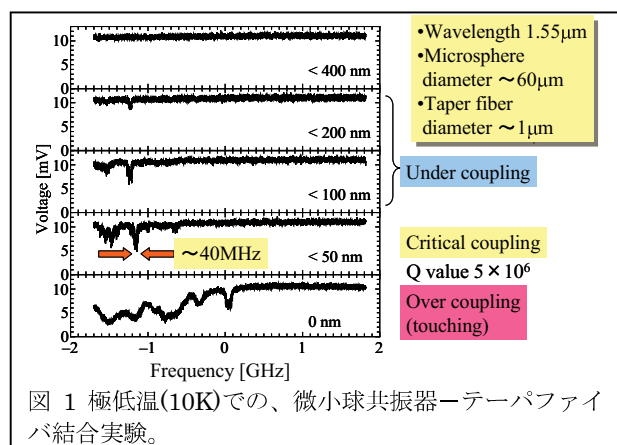


図 1 極低温 (10K) での、微小球共振器-テーパファイバ結合実験。

る。

その後、より短い波長である 780nm、さらにダイヤモンド NV 欠陥の共鳴波長である 637nm の可視レーザーを用いた同様の結合実験に成功した。

2.2 単一光子レベルでの位相シフトスペクトルの取得

光量子デバイスの性能評価（位相シフト量測定）に必須の、位相シフトスペクトル、および純粋度スペクトルの取得に、単一光子レベルのプロブ光で成功した。（図 2、Opt. Exp. 2011、誌上発表リスト[2]）。

実験は、直径 52 μm の枝付き微小球を直径 1 μm のテーパーファイバに接触させた条件で、プロブ光として波長は 780nm の波長可変レーザーを用いて行った。得られた位相シフトスペクトルから、距離が 100nm(図 2(c))では結合状態が、微小球内での損失がファイバとの結合を下回るオーバーカップリング状態に、また 500nm(図 2(d))では、その逆の結合状態であるアンダーカップリング状態になっていることが明瞭に分かる。また、図 2(e),(f)のピュリティスペクトルはほぼその全域で 1 に近い値を示しており、このファイバ結合微小球でのデコヒーレンス（偏光解消）が十分小さいことが分かった。

2.3 発光体を、微小球共振器・ナノ光ファイバと結合させたデバイスの実現と評価

高橋雅英教授（大阪府立大）と共同で、微小球共振器表面にリンイオン添加エルビウムゾルゲルガラスによるゲイン層を形成した、ファイバ微小球レーザーを実現（Appl. Phys. Lett. 2007）、その発光特性解析から、発光体からの発光の微小球共振器モードへの結合効率 β をファイバ微小球系ではじめて実験的に特定した。（Appl. Phys. Lett. 2008）。

また、テーパー光ファイバに関して、直径が 300nm と波長の半分程度のナノ光ファイバを実現した（Opt. Exp. 2011）。また、このナノ光ファイバに単一量子ドットを結合させることに成功、単に量子ドットをナノ光ファイバ上に吸着させるだけで、NA0.8 という最大級の開口を持つ共焦点顕微鏡に匹敵する集光効率を実現した（投稿中）。

2.4 光子数状態光源の実現と光量子回路への応用

パラメトリック下方変換を利用した単一光子源について研究を進め、その 2 光子量子干渉性(Hon-Ou-Mandel

の明瞭度)を 95%（フィルタ線幅 2nm）まで高めることに成功した。また、この光源と、変型サニャック干渉計により構築した 4 光子の経路もつれ合い干渉計において高い明瞭度を得ることに成功（Science 2007）、その後 2 つの光子の偏光間に特定の相関がある場合のみを透過する「もつれ合いフィルター」の実現に成功した（Science 2009、誌上発表リスト[3]）。また 2 光子非線形性を線形光学素子により確率的に実現した「量子位相ゲート」を組み合わせることで、2001 年に Knill, Laflamme, Milburn らによって提唱された制御ノット動作光量子回路の実現にも世界で初めて成功した(PNAS 2011)。

3. むすび

以上の様に、極低温(10K 以下)で微小球とテーパーファイバを結合可能な実験装置、およびそこで生じる単一光子レベルの位相シフトの観測を実現した。また、ナノテーパー光ファイバや微小球共振器にダイヤモンドの NV センターを結合させた系の研究も着実に進展した。これらの成果に基づき、引き続き、目標である単一光子入力での固体量子位相ゲートの実現を目指す所存である。

最後に、共同研究者の大阪府立大学高橋教授、広島大学ホフマン准教授、英国ブリストル大学オブライアン教授、独国フンボルト大学ベンソン教授に感謝する。また、松岡正浩先生をはじめに多数の先生方のご助言、および本プロジェクトを支えてくださった総務省・関係機関の皆様、最後に研究室のスタッフ・学生各位に心より感謝する。

【誌上発表リスト】

- [1] H. Takashima, T. Asai, K. Toubaru, M. Fujiwara, K. Sasaki and S. Takeuchi, “Fiber-microsphere system at cryogenic temperatures toward cavity QED using diamond NV centers”, Optics Express. Vol.18 No.14 pp15169-15173 (2010/7/5)
- [2] A. Tanaka, T. Asai, K. Toubaru, H. Takashima, M. Fujiwara, R. Okamoto, and S. Takeuchi, “Phase shift spectra of a fiber-microsphere system at the single photon level”, Optics Express. Vol.19 No.3 pp2257-2265 (2011)
- [3] R. Okamoto, J. L. O'Brien, H. F. Hofmann, T. Nagata, K. Sasaki, S. Takeuchi, “An entanglement filter”, Science Vol. 323 pp483-485 (2009/1/23)

【申請特許リスト】

- [1] 竹内繁樹、テーパー光ファイバ、日本、2010 年 1 月申請
- [2] 竹内繁樹、テーパー光ファイバ、日本、2009 年 2 月申請

【受賞リスト】

- [1] 竹内繁樹、J. L. O'Brien、第 7 回大和エイドリアン賞、2010 年 12 月 2 日
- [2] 岡本亮、第 4 回（2010 年）日本物理学会若手奨励賞、2010 年 3 月 21 日
- [3] 竹内繁樹、第 6 回（平成 21 年度）日本学術振興会賞、“光子を用いた量子情報通信処理の創成”、2010 年 3 月 1 日

【報道発表リスト】

- [1] “「量子もつれ」応用 超精密の計測”、読売新聞、2007 年 5 月 4 日
- [2] “光量子回路を開発”、日本経済新聞、2009 年 1 月 23 日
- [3] “世界初の回路を開発”、北海道新聞、2009 年 3 月 31 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

[http:// www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qip/](http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qip/)

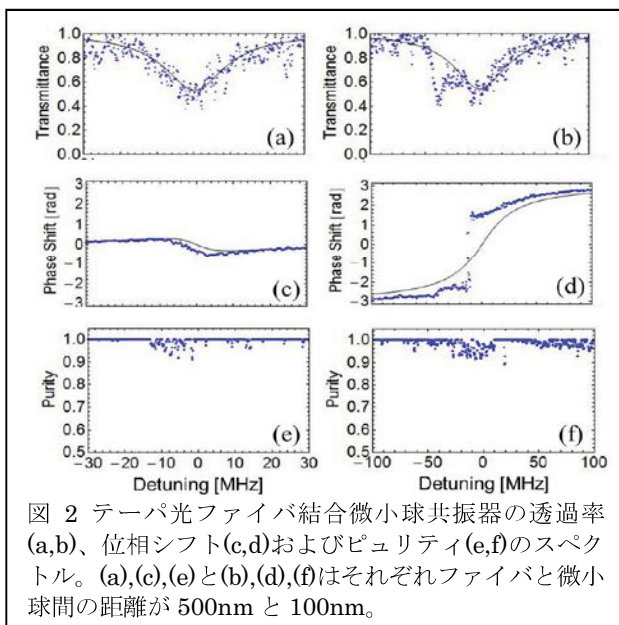


図 2 テーパー光ファイバ結合微小球共振器の透過率(a,b)、位相シフト(c,d)およびピュリティ(e,f)のスペクトル。(a),(c),(e)と(b),(d),(f)はそれぞれファイバと微小球間の距離が 500nm と 100nm。