

微小球共振器を用いた量子位相ゲートの実現に関する研究（継続-14）

Study on the realization of quantum phase gates using microsphere resonators

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

藤原 英樹 堀田 純一 笹木 敬司
Hideki Fujiwara Jun-ichi Hotta Keiji Sasaki
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 13 年度～平成 17 年度

概要

我々は、固体微小球共振器とそこに埋め込まれたイオン等を用いることにより、位相シフトを再現性よく実現できる系の実現を目指した。また、同時に一デバイスあたりの位相シフト量の増大、一光子レベルでの量子位相ゲートの実現の可能性等を探索した。その結果、位相シフト量を 180 度に増大する新規デバイス構造を考案、また、その全量子力学的解析に成功し、かつ理想状態ではない条件下でのデバイス動作の解明などにも成功した。一方、実験的には、固体微小球共振器とテーパファイバ結合系について研究を進めた。その結果、90%以上の高い透過率をもつシングルモードテーパファイバの構築に成功し、偏光状態を保存した形でのテーパファイバと微小球のカップリングに成功した。その Q 値は 10^7 程度である。さらに、微小球と結合したテーパファイバ内部のモード間干渉現象（ファノ効果）の観測などの成果を得た。

Abstract

The possibility of realizing a quantum phase gate using solid state micro cavity is studied, aiming to improve the experiment performed by Kimble et. al. using single atoms inside a micro cavity in terms of the stability and the amount of phase shift. As a result, it is shown that a new structure using one sided cavity can provide 180 degree phase shift using semi-classical and full quantum theoretical analysis, even with unrealistic conditions. It is also experimentally demonstrated that the polarization dependent spectrum is achievable using a single-mode high-transmittance tapered fiber coupled with a microsphere resonator, suggesting the possibility to develop the same kind of device with Kimble's experiment.

1. まえがき

本研究では、光子光子間の固体量子位相ゲートの実現を目指した。光子一つで他方の光子の位相を 180 度変化させる量子位相ゲートが実現すれば、任意の光子間に量子もつれ合い状態を生成することが可能になり、そのようなデバイスは長距離量子暗号の実現や、光子間もつれ合いを利用した高密度伝送などに不可欠と考えられる。これまでも、真空中で微小キャビティ中に原子を導入した系を用いた初期的な実験は行われていたが、位相シフト量が 16 度と小さく、原子位置を固定できないため再現性に欠け、またその検証も単一光子を用いては行われていなかった。さらには、その実験の量子力学的な解析すら行われていない状況であった。

我々は、固体微小球共振器とそこに埋め込まれたイオン等を用いることにより、位相シフトを再現性よく実現できる系の実現を目指した。また、同時に一デバイスあたりの位相シフト量の増大、一光子レベルでの量子位相ゲートの実現の可能性等を探索した。

2. 研究内容及び成果

2.1 研究内容

研究内容は、大きく理論研究と実験研究に分けることができる。理論研究でデバイスの動作について先行的な検討を加えながら、微小球共振器とテーパファイバを結合した系の確立にむけた実験を進めた。理論研究は、まずキンブルらの実験の検討から始めた。その結果、片側キャビティを用いることで位相シフト量が増大できる可能性に気づき、半古典論的な解析によって確認した。しかし、半古典論的な解析では、微弱コヒーレント光についての応答は

推測できるものの、単一光子についての応答が同じであるとは限らない。そのため、我々は 1 光子波動関数、および 2 光子波動関数とそのようなデバイスの相互作用について検討を進めた。その一方で、実際のデバイスがもつ様々な非理想的な条件（位相緩和や、不完全なキャビティ）についても考察をするべく、半古典的な方法と FDTD 法を組み合わせた解析手法を確立した。実験研究においては、まず微小球とテーパファイバの作製技術の確立を目指し、その後その結合実験系の構築を行った。

2.2 研究成果

以下、本プロジェクトで得られた成果について述べる。本プロジェクトで得られた理論研究の代表的な成果としては、「量子位相ゲートの全量子力学的解析に成功」、「半古典理論による、理想状態ではない条件下でのデバイス動作の解明」、および、半古典方法と FDTD 法を組み合わせることによる「量子位相ゲートデバイスのシミュレーションに成功」などがある。また、実験研究の成果としては、「偏光状態を保存した形でのテーパファイバと微小球のカップリングに世界で初めて成功」、「微小球と結合したテーパファイバ内部のモード間干渉現象（ファノ効果）の観測」、「微小球に半導体量子ドットをコートした系を用いた共鳴発光スペクトルの観測」などがある。これらのうち、「量子位相ゲートの全量子力学的解析」「偏光状態を保存した形でのテーパファイバと微小球のカップリング」「微小球と結合したテーパファイバ内部のモード間干渉現象（ファノ効果）の観測」の 3 つについて紹介する。

(ア) 量子位相ゲートの全量子力学的解析

我々は微小共振器と 2 準位原子からなる系と光子間の

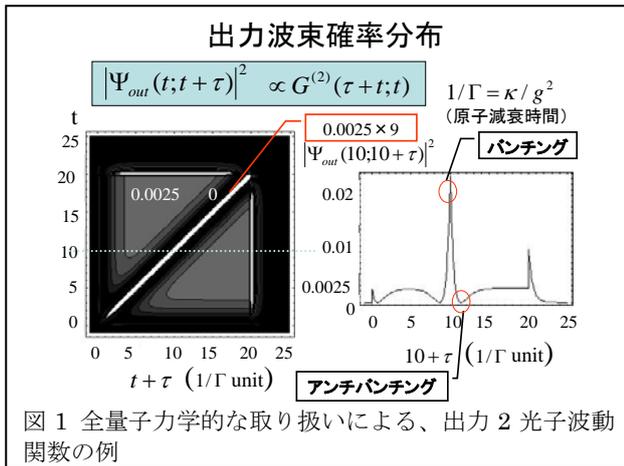


図1 全量子力学的な取り扱いによる、出力2光子波動関数の例

相互作用を全量子力学的に取り扱い、入出力光子の量子状態を検討するための枠組みとなる理論の構築に成功した。さらに、ある特定の実験パラメータのもとで、これまで線形光学素子等のみを用いたゲートでこれまで得られていた効率(12.5%)を大幅に上回る78%の効率が得られることを発見した。

図1に、入力2光子状態として矩形波(2つの光子が、独立に、ある一定の時間幅に存在するような状態)を用いた際の出力を示す。今回の理論により、出力される光子の波動関数は、単に位相のみが変化するような単純なものではなく、さまざまなプロセスの干渉の結果、各時刻によりバンチングやアンチバンチングを示す非常に複雑な形状を示すことがわかった。このような解析は、これまで一般に行われた半古典的な解析では決して得ることができない、量子位相ゲートとしての評価に不可欠な情報を提供するものである。

また、この理論を用い、入力光子パルスとしてガウス形状のものに対して、最良な効率を得られる状態を探索した結果、入力光子のパルス幅が準位原子の緩和時間と同程度の条件で、これまで線形光学素子等のみを用いたゲートでこれまで得られていた効率(12.5%)を大幅に上回る78%の効率を得られることを見いだした。

(イ) 偏光状態を保存した形でのテーパファイバと微小球のカップリング

位相シフトの検出方法として、有力なものが偏光依存性を用いる方法である。キンブルらによる1995年の実験でも、右回り偏光と左回り偏光間の位相差変化を、直線偏光の回転角度として検出している。しかしこの方法では、入出力間で偏光状態が保存されている必要がある。これまでファイバ結合微小球では、テーパ部での複雑な複屈折性が問題となり、そのような実験例は報告されていなかった。我々は、この方法について詳細な検討および実験を進めた結果、これまで不可能と考えられていた偏光状態を保存し

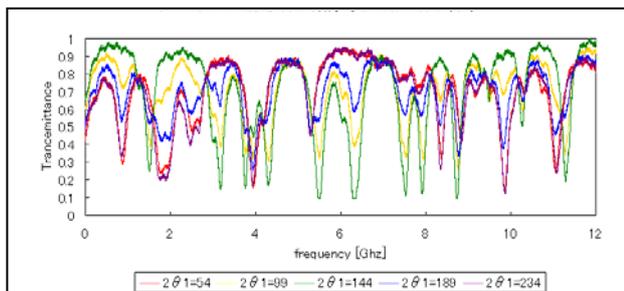


図2 テーパーファイバにカップルした微小球の2つの偏光モード(TE, TM)を明瞭に区別した世界初の観測結果。2θが偏光方向に対応する。

た形でのテーパファイバと微小球のカップリングに世界で初めて成功した(図2, Appl. Phys. Lett. 投稿中)。これは、位相シフト量を偏光回転角のみで安定して評価できる事をしめす重要な成果である。

3. むすび

当初の目標であった180度位相シフトな量子位相ゲートデバイスを、片側キャビティを用いた構造によって提案、その全量子力学的な解析、ならびに、デコヒーレンス他の要因についての半古典的な解析に成功、その実現可能性を示すことができた。また、微小球共振器とテーパファイバを用いた系については、その偏光を保存した形で、かつ90%の透過率でシングルモード伝搬を可能にするなど、その基盤となる技術を確認することができた。

これらの成果をベースにして、今後さらに、低温化、結晶共振器の利用等に取り組み、180度位相シフトが可能な量子ゲートの実現を目指したい。

最後に、共同研究者の名古屋大学鳥本司教授、京都大学高橋雅英助教授のご協力、ならびにレーザーの波長校正に関する東京工業大学の幹男助教授のご教示、そのほか多数の方々のご協力、ご教示に心より感謝する。

【誌上发表リスト】

- [1] A. Chiba, H. Fujiwara, J. Hotta, S. Takeuchi and K. Sasaki, "Fano resonance in a multimode tapered fiber coupled with a microspherical cavity", Appl. Phys. Lett. Vol.86 No.26 pp261106/1-261106/3 (2005/6/27)
- [2] H. Oka, S. Takeuchi and K. Sasaki, "Optical response of two-level atoms with reflection geometry as a model of a quantum phase gate", Phys. Rev. A Vol.72 pp013816/1-013816/7 (2005/7/20)
- [3] K. Kojima, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki, "Nonlinear interaction of two photons with a one-dimensional atom: spatiotemporal quantum coherence in the emitted field", Phys. Rev. A Vol.68 No.1 pp013803/1-013803/13 (2003/7/2)

【申請特許リスト】

- [1] 竹内 繁樹、岡本 亮、光学特性測定装置、光学特性測定方法、並びに、それに用いるプログラムおよび記録媒体、日本、2005年3月3日
- [2] 竹内 繁樹、ホフマン・ホルガ、位相シフト光スイッチ、日本、2002年6月17日

【受賞リスト】

- [1] 竹内繁樹、日本光学会(応用物理学会);平成17年度(第47回)光学論文賞、“パラメトリック蛍光対の動的制御による単一光子源の実現”、2006年3月23日
- [2] 竹内繁樹、文部科学省;平成17年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞、“応用物理学分野における光子を用いた量子情報通信処理の研究”、2005年4月20日

【報道発表リスト】

- [1] “量子コンピューター 夢の計算機へ接近”、東京新聞、2005年11月1日
- [2] “光子を使った量子計算”、日経バイト(NIKKEI BYTE) NO.253、2004年5月22日

【ホームページによる情報提供】

<http://optsys.es.hokudai.ac.jp/~takeuchi/>