

# ファイバー結合微小球共振器を用いた固体量子位相ゲートの実現に向けて

高島 秀聡<sup>\*1,\*2</sup>・藤原 英樹<sup>\*1</sup>・笹木 敬司<sup>\*1</sup>・竹内 繁樹<sup>\*1,\*2,\*3</sup>

## Toward the Realization of Optical Quantum Phase Gates Using Fiber Coupled Microsphere Resonators

Hideaki TAKASHIMA<sup>\*1,\*2</sup>, Hideki FUJIWARA<sup>\*1</sup>, Keiji SASAKI<sup>\*1</sup> and Shigeki TAKEUCHI<sup>\*1,\*2,\*3</sup>

Quantum computers can solve certain problems much faster than present super computers. In order to realize these quantum computers using photons, highly efficient optical quantum phase gates are required. In this article, the principle of the optical quantum phase gates using single atom nonlinearity is explained. The recent progress in our experiments toward the realization of the quantum phase gates using fiber-coupled microsphere resonators is overviewed.

**Key words:** photon, quantum computer, quantum gate, microsphere, taper fiber, cavity QED

量子コンピューターは、現在最速のスーパーコンピューターが解くのに天文学的な時間のかかるようなある種の問題を、圧倒的に高速で解けるとして、その実現が期待されている。量子コンピューターの基本単位には、2つの状態が量子力学的に重ね合わされた「量子ビット」を用いる。その量子ビットが複数ならんだ状態に対し、1つの量子ビットの重ね合わせ状態を変化させる「回転ゲート」と、一方の量子ビットの状態により、他方の状態を反転させる「制御ノットゲート」などを作用させて計算を行う。これらの操作は、量子コンピューターだけでなく、量子通信や量子中継を用いる長距離量子暗号にとっても重要である。

光の最小単位である光子には、量子ビットとしてすぐれた特徴がある。まず、光子は、既存の検出器を用いて非常に高い効率で検出が可能である。また、1つの量子ビットを操作する回転ゲート操作は、既存の線形光学素子を用いることで簡単に実現できる。しかし、2つの光子間の「制御ノットゲート」の実現は困難と考えられてきた。というのは、光子に対する制御ノット操作とは、たった1つの光子の状態、別の光子の状態を変化させるという、究極の光-光スイッチにはかならないからである。以前われわれ

は、この困難を回避しながら、単一の光子によって量子計算アルゴリズムのデモンストレーションを行った<sup>1)</sup>。しかし、この方法では、量子ビットの数が増えると、必要な光路の数が指数関数的に増えてしまうという重大な問題があった。大規模な量子計算を実現するには、2つの光子間のゲート操作が不可欠である。

光子間のゲート操作を実現するには、現在大別して2つのアプローチがある。1つは、半透鏡で生じる、光子間の量子干渉を利用する方法である<sup>2)</sup>。この方法により、われわれのグループを含め<sup>3,4)</sup>、2光子間の制御ノットゲートをはじめ、さまざまなゲートが実現されている<sup>5-7)</sup>。さらに光子数を増やした、光量子回路の研究への展開においても、現在はこの線形光学素子による量子ゲートが利用されている。ただし、この方法の欠点として、ゲートの成功確率が最大でも25%と低いことがあげられる。単純に考えれば、ゲート数を増やすと指数関数的に成功確率が減少してしまう。この問題に対しては、ゲート自身の成功確率を最大1に増幅する方法や<sup>8)</sup>、最初に光子間に複雑なもつれ合い状態を生成しておき、その状態を観測することで量子計算を行う方法（一方向量子計算）などの解決方法が提案

<sup>\*1</sup> 北海道大学電子科学研究所（〒001-0020 札幌市北区北20条西10丁目）

<sup>\*2</sup> 大阪大学産業科学研究所（〒567-0047 茨木市美穂ケ丘8-1）

<sup>\*3</sup> E-mail: takeuchi@es.hokudai.ac.jp

されているが<sup>9)</sup>、まだ理論的な研究段階にとどまっている。

もう1つのアプローチが、光学的な非線形性を用いる方法である。われわれは特に、単一発光体で生じうる、光子1個レベルでの吸収飽和現象を利用した量子位相ゲートに着目し、これまで理論、実験両面において研究を進めてきた<sup>10-16)</sup>。量子位相ゲートとは、光子数に応じてその波動関数の位相が変化(反転)するゲートであり、これが実現すれば、簡単な構成で2光子間の制御ノットゲートが実現できる。われわれは、これまでの理論研究によって、80%程度と<sup>11)</sup>、線形光学の方法に比して非常に高い効率を達成できることを見いだしている。

本稿では、この単一発光体での非線形性を利用した量子位相ゲートについて、まず動作原理を解説し、その後、その実現に向けた、われわれのファイバー結合微小球共振器に関する実験的な研究について、その現状を紹介する。

## 1. 非線形性を利用した量子位相ゲート

単一発光体を利用した量子位相ゲートの動作原理を説明しよう。ここでは、単一発光体のモデルとして、基底状態と励起状態の2つの準位からなる系(二準位原子モデル)を考える。発光に関与するのがおもに2つの準位だけであれば、原子のほか、半導体量子ドットなどもこのモデルの想定に入る。いま、単一の二準位原子が、入力光子と相互作用する場合を考えよう。二準位原子は、基底状態から励起状態に遷移する際に、光子を1つ吸収する。つまり、光子を1つ吸収して励起状態にある間は、他の光子を吸収することができない。このため、二準位原子に対し、時間的に近接した2個の光子を入力すると、二準位原子は一方の光子を吸収し、その後放出するが、2つ目の光子を吸収することができない。つまり、先に光子が存在すると、2つ目の光子は原子と相互作用せず、その分時間遅れが少なくなる。つまり、出力時点での位相が異なる。このようにして、1個の光子で別の光子の位相を制御できる。この原理に関する先駆的な実験が、カリフォルニア工科大学によって行われている<sup>17)</sup>。彼らは、反射率の高い2枚のミラーからなる微小共振器中に二準位原子を通過させる系を用い、キャビティ中の平均光子数が1程度の微弱なポンプ光のオンオフによって、プローブ光の位相が変化することを確認した。しかし、彼らの実験で得られた位相シフトはわずか15度程度であり、また、原子が共振器の最適位置を通過する瞬間しか、位相シフトが生じないという問題があった。

そこで、われわれはまず、180度の位相シフトが可能かを理論的に検討した。カリフォルニア工科大の実験では、

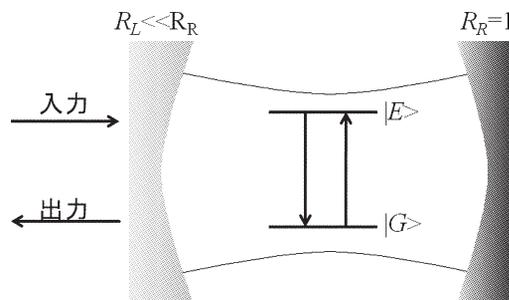


図1 片側共振器モデル。|E>と|G>はそれぞれ二準位原子の励起準位と基底準位を表す。

2つのミラーの反射率は異なるがほぼ同程度で、ポンプ光およびプローブ光は、一方のミラーから入射して他方のミラーへと抜ける構成がとられていた。われわれは、図1のような、一方のミラーのみを完全反射ミラーとした片側共振器を用いた場合、180度の位相シフトが可能なることを見いだした<sup>10)</sup>。また、二準位原子との相互作用によって生じる、光子波動関数の変化を、全量子力学的に解析する理論を構築、光子波動関数の変型を考慮しても、光子の空間広がりなどを最適化することで、78%の効率が達成できることを見いだした<sup>11)</sup>。

以上の解析は、光子が二準位原子と相互作用した後、再び入力時と同じ空間モードに100%放出されること、および、二準位原子の位相緩和が無視できることを仮定していた。前者の仮定については、共振器の効果によって、原子からの自然放出を、共振器モードに集中させることが可能である。この、自然放出のうち、(特定の)共振器モードに結合している割合は、一般に自然放出結合係数 $\beta$ とよばれる。しかし実際の実験では、この割合を100%( $\beta=1$ )にすることは困難である。

後者の仮定については、真空中の原子では無視できるが、固体デバイスによる実現を考える場合は、無視できない。われわれはこれらについて、光の場は電磁場とする、いわゆる半古典論を用いて解析し、 $\beta$ が0.5より大きく、かつ、位相緩和時間が縦緩和時間よりも長い場合に、180度の位相シフトを実現できることを見いだした<sup>12)</sup>。

## 2. すぐれた固体共振器—テーパーファイバーと結合した微小球

われわれは、固体で量子位相ゲートを実現する共振器として、微小球共振器に着目した。微小球共振器には、他の微小共振器よりもいくつかのすぐれた特徴がある。まず、非常に高い光閉じ込め効率(Q値)をもつことである。微小球内部の光は、球表面で全反射を繰り返しながら、表面

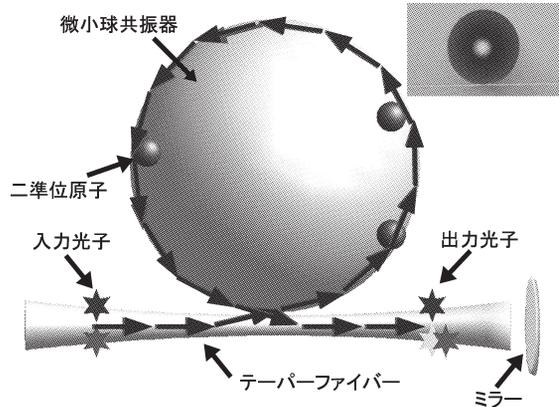


図2 ファイバー結合微小球による量子位相ゲート。挿入像はファイバー結合微小球の顕微鏡像。

近くに閉じ込められる。このとき、全反射によるロスとはほとんどないため、微小球は非常に高い  $Q$  値を実現できる。たとえば、シリカ微小球の  $Q$  値は最大  $10^{10}$  にも達し<sup>18)</sup>、これは、現時点での比較であるが、フォトニック結晶による共振器と比較しても3桁以上大きい<sup>19)</sup>。

次に、作製（プロセス）が比較的簡便である。マイクロメートルのスケールでは、重力の影響が小さくなるため、表面張力によって形は自然と球形になる。そのため、微小球はガラスを加熱溶融させるだけで簡単に作製できる。さらに、球の表面を発光体でコートしたり、発光体を外部から球表面に打ち込むことで、球表面付近に存在する共振器中の強い光場と相互作用させることができる。

このようにすぐれた特徴をもつ微小球共振器であるが、光の入出力が大きな課題であった。しかし、90年代終わりごろ、テーパファイバーと結合させることで、安定し、かつ高い効率での光入出力方法が発案された<sup>20,21)</sup>。シングルモードファイバーを直径数百 nm から数  $\mu\text{m}$  になるまで細く引き伸ばしたのがテーパファイバーである。テーパ部で、光はファイバーの外にわずかにしみ出しながら伝搬する。位置制御のための枝のついた微小球を、テーパ部に適度に近接させることで、高い  $Q$  値を保ったまま光を微小球へ効率よく結合させることが可能となる。われわれの研究室では、光ファイバーの一部をセラミックヒーターにより 1600 度程度まで加熱しながら、左右から適度な速度で引っ張ることでテーパファイバーを作製している<sup>13,14)</sup>。また、切断するまで延伸したテーパファイバーの先端を、炭酸ガスレーザーで加熱溶融することで枝付き微小球を作製している。最近では、よりサイズの制御が容易なトロイド型の共振器を用いた研究も盛んに行われている<sup>22)</sup>。

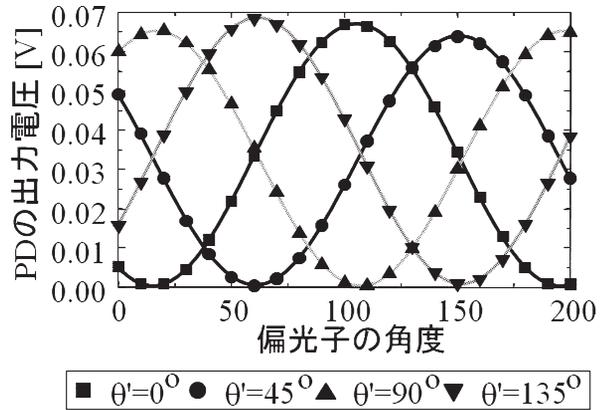


図3 テーパーファイバーの偏光特性。 $\theta'$  は入射偏光角度を表す。

### 3. 量子位相ゲートの実現に向けた研究の紹介

われわれは、このファイバー結合微小球を片側共振器として使い、量子位相ゲートを実現しようとしている。図2に、われわれの提案する量子位相ゲートを示す。二準位原子としては、量子ドットや希土類原子、結晶欠陥準位などを想定している。それらを、微小球共振器内にドープし、光入出力はテーパファイバーを介して行う。また、出力部のテーパファイバーの先においたミラーで出力光を反射させることで、片側キャビティーとして動作させることも可能である。

以下、量子位相ゲートの実現に向け、これまでわれわれが行ってきた微小球共振器を用いた研究について紹介する。

#### 3.1 偏光保存ファイバー結合微小球

われわれは、テーパファイバーの作製条件（延伸速度や加熱温度）を最適化し、偏光状態をそのまま 90% 以上の高い透過率で導波可能なテーパファイバーを実現した<sup>13)</sup>。これらの性質は、特に偏光状態を量子ビットとする光子量子ゲートの実現に不可欠と考えられる。これまで、作製時に生じる異方性などが原因で、テーパファイバーに複屈折性が生じ、入力偏光状態を保持することが難しかった。テーパファイバーの偏光特性の測定結果を図3に示す。テーパファイバーへの入射偏光を  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  と変え、出力部に設置した偏光子を回転させながら出力光強度を測定した。いずれの入射偏光角度においても、高い消光比（最大値と最小値の比）での正弦波形状の応答が得られており、テーパファイバー中での任意の偏光状態が保存されることを示唆している。

さらに、このテーパファイバーを微小球に結合させ、微小球共振器内の共振モードを偏光ごとに完全に分離して観測することにも成功した<sup>13)</sup>。これらはいずれも、量子位

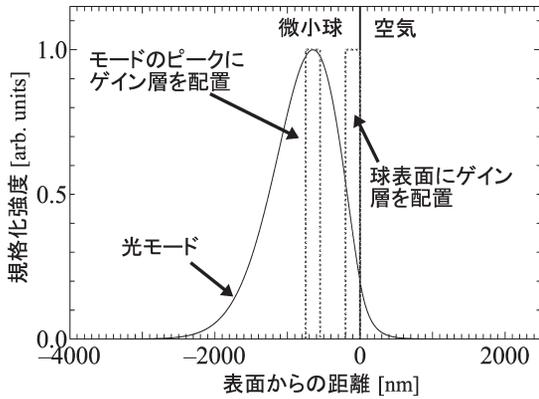


図4 微小球のモードプロファイル (実線) と 200 nm の膜厚のゲイン層分布 (点線)。

相ゲートの位相シフト量の特定に不可欠な要素技術である。

関連する実験として、ファノ効果による非対称な共鳴スペクトルの観測にも成功している<sup>14)</sup>。この実験では、複数のモードが伝搬できるテーパーファイバーを用いた。ファイバー中での伝搬モードの実行屈折率、および微小球共振器の共振モードとの結合効率が異なる中で、それぞれのモード間で干渉が生じた結果である。ファノ効果は、共振モードの位相に敏感であり、量子位相ゲートの位相シフトの評価に応用できる可能性がある。

### 3.2 ファイバー結合微小球における自然放出結合係数 $\beta$ の制御

次に、自然放出結合係数  $\beta$  の測定と制御に関する研究を紹介する<sup>16)</sup>。発光体の自然放出光が共振器のモードへ放出される割合である自然放出結合係数  $\beta$  は、さきほど述べたように、量子位相ゲートの実現にとりきわめて重要なパラメータである。しかし、これまで、ファイバー結合微小球の  $\beta$  について、その実測の報告はなされていなかった。われわれは、ファイバー結合微小球と結合した発光体によりレーザーを作製し、その入出力特性から  $\beta$  を決定した。原理は次のようなものである。

レーザー発振閾値以下では、発光体は共振器モードに  $\beta$  の割合で光子を自然放出する。一方、閾値以上では、発光体からの光は、誘導放出によりすべて共振器に結合する。そのため、 $\beta$  は、レーザー発振閾値の前後での強度比から推定することができる。

われわれは、さらに、発光体と微小球共振器内の共振モードの相対位置を変化させることで、 $\beta$  の制御を目指した<sup>16)</sup>。図4に示すように、微小球内部のモードは波長程度の幅をもって球表面からわずかに内側に存在する。そのため、通常行われるような、単に表面に発光体を積層した場

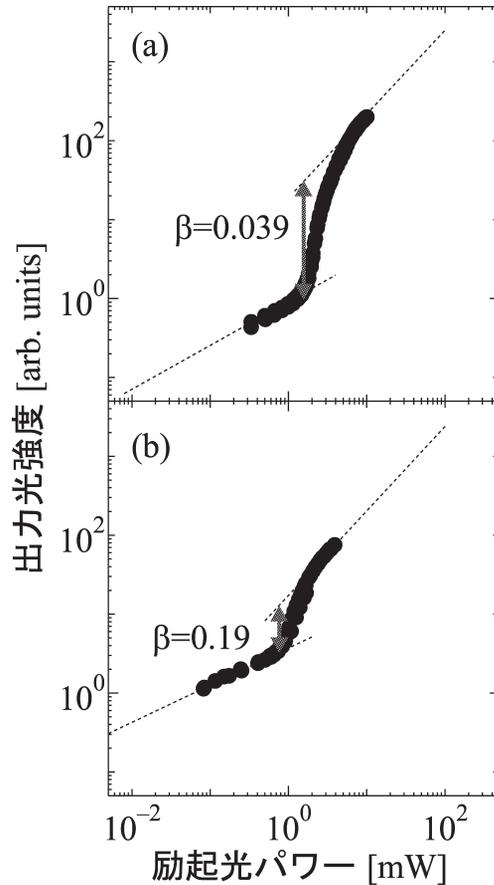


図5 ファイバー結合微小球のレーザー発振光入出力特性。(a) 微小球表面にゲイン層をコートした場合。(b) ゲイン層をモードのピーク位置に配置した場合。

合、発光体は、共鳴モードの最大強度を感じないことになる。もしも、発光体の位置を共鳴モードの最大強度位置と一致させれば、共鳴モードの光場と発光体の間で、より大きな結合が得られ、 $\beta$  も増大するはずである。

この効果を検証するには、発光体の分布を、波長程度の共鳴モードの広がりよりも十分小さくしなければならぬ。われわれは、この実験のために特別に開発したリン添加のエルビウム材料により、わずか数百 nm の厚さのエルビウム層により、レーザー発振することに成功した<sup>15)</sup>。モード位置との最適化にあたっては、エルビウム層積層後、さらにガラス層をゾルゲル法で積層する方法を用いた。

図5 (a) に、表面にゲイン層をコートした場合のレーザー発振スペクトルの光入出力特性を示す。 $\beta$  を測定するには、レーザー発振閾値以下の微弱な蛍光も測定する必要があるため、高感度の分光器を用いて測定を行った。レーザー発振閾値での光出力強度と誘導放出領域の強度の比 (28.9) から  $\beta$  を 0.039 と推定した。単に微小球の表面に発光体を積層 (塗布) しただけで、4% 程度の自然放出結合係数が得られることは、半導体レーザーにおける  $\beta$  が

10<sup>-4</sup> 程度であることなどを勘案すると、驚きに値する。

また、図 5 (b) は、ゲイン層を微小球のモードのピーク位置に配置したときのレーザー発振スペクトルの光入出力特性である。ゲイン層をモードのピーク位置に配置するため、ゲイン層の上にシリカガラスを約 0.45 μm の厚さでコートした。球表面にゲイン層を配置した場合と比べ、レーザー発振閾値での強度比から得られる  $\beta$  は 0.19 に増大している。このように、発光体の位置を共鳴モードの最大強度位置と一致させることで、 $\beta$  が増大することを実験的に確認した。

この解析方法では、励起準位からの無輻射遷移過程が存在する場合、 $\beta$  が実際より小さく見積もられる。今回用いたサンプルでは、エルビウムの濃度が非常に濃いため、共同アップコンバージョンの効果が無視できないと考えられる。その効果を取り込んだ詳細な解析によると<sup>23)</sup>、図 5 (b) に示した実験において、実際の  $\beta$  は 0.5 を上回っている可能性がある。

本稿では、非線形性を利用した量子位相ゲートについて、その動作原理、およびファイバー結合微小球を用いた、われわれの実現に向けた研究現状について紹介した。すでに述べたように、これまでに入力偏光状態を保存したまま、ファイバーからの入出力効率が 90% 以上で利用可能なファイバー結合微小球共振器の実現、ならびに、発光体の位置制御による、自然放出結合係数  $\beta$  の制御とその検証実験などを達成してきた。

次のステップとして、現在われわれは、単一発光体と入出力光において生じるコヒーレントな相互作用の観測を目標に研究を進めている。1 章で説明したように、そのときに問題になるのが発光体の位相緩和である。最近、位相緩和に関する研究が進められており<sup>24,25)</sup>、半導体量子ドットや結晶欠陥などで、10 K 程度の極低温で、200 ps 以上の位相緩和時間が報告されている<sup>25)</sup>。われわれは、微小球とテーパファイバーとのカップリングを低温で行う装置を開発し、微小球とテーパファイバーの結合実験を進めているところである。

一方、ファイバー結合微小球は、そのきわめてすぐれた固体微小共振器としての特性から、低閾値レーザー<sup>26)</sup> や単一分子の検出が可能なバイオセンサー<sup>27)</sup> などさまざまな分野で研究が進められている。われわれの量子位相ゲートの実現を目指した研究は、より広い周辺分野での応用にも発展が期待できると考えている。

本稿で紹介した研究に関し、京都大学の高橋雅英先生、電気通信大学の白田耕藏先生、宮本洋子先生、東京工業大

学の上妻幹男先生、フンボルト大学の Oliver Benson 先生、広島大学の Holger F. Hofmann 先生、ルーバンカトリック大学の堀田純一先生、小島邦裕博士、千葉明人博士、岡寿樹博士、小西秀典氏、および、植村幸司氏のご協力に感謝します。特に高橋雅英先生からは、微小球レーザーのサンプル作製に多大な協力を得ました。また一連の研究に関して、総務省の戦略的情報通信研究開発推進制度の多大なご支援、ならびに科学技術振興機構 CREST、日本学術振興会科学研究費、科学技術振興調整費の支援に感謝いたします。

## 文 献

- 1) S. Takeuchi: "Experimental demonstration of a three-qubit quantum computation algorithm using a single photon and linear optics," *Phys. Rev. A*, **62** (2000) 032301/1-032301/4.
- 2) E. Knill, R. Laflamme and G. J. Milburn: "A scheme for efficient quantum computation with linear optics," *Nature*, **409** (2001) 46-52.
- 3) H. F. Hofmann and S. Takeuchi: "Quantum phase gate for photonic qubits using only beam splitters and postselection," *Phys. Rev. A*, **66** (2002) 024308/1-024308/3.
- 4) R. Okamoto, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki: "Demonstration of an optical quantum controlled-NOT gate without path interference," *Phys. Rev. Lett.*, **95** (2005) 210506/1-210506/4.
- 5) M. Koashi, T. Yamamoto and N. Imoto: "Probabilistic manipulation of entangled photons," *Phys. Rev. A*, **63** (2001) 030301/1-030301/4.
- 6) T. B. Pittman, B. C. Jacobs and J. D. Franson: "Probabilistic quantum logic operations using polarizing beam splitters," *Phys. Rev. A*, **64** (2001) 062311/1-062311/9.
- 7) A. Politi, M. J. Cryan, J. G. Rarity, S. Yu and J. L. O'Brien: "Silica-on-silicon waveguide quantum circuits," *Science*, **320** (2008) 646-649.
- 8) T. C. Ralph, A. G. White, W. J. Munro and G. J. Milburn: "Simple scheme for efficient linear optics quantum gates," *Phys. Rev. A*, **65** (2001) 012314/1-012314/6.
- 9) R. Raussendorf and H. J. Briegel: "A one-way quantum computer," *Phys. Rev. Lett.*, **86** (2001) 5188-5191.
- 10) H. F. Hofmann, K. Kojima, S. Takeuchi and K. Sasaki: "Optimized phase switching using a single-atom nonlinearity," *J. Opt. B*, **5** (2003) 218-221.
- 11) K. Kojima, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki: "Efficiencies for the single-mode operation of a quantum optical nonlinear shift gate," *Phys. Rev. A*, **70** (2004) 013810/1-013810/6.
- 12) H. Oka, H. F. Hofmann, S. Takeuchi and K. Sasaki: "Effects of decoherence on the nonlinear optical phase shift obtained from a one-dimensional atom," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 7495-7500.
- 13) H. Konishi, H. Fujiwara, S. Takeuchi and K. Sasaki: "Polarization-discriminated spectra of a fiber-microsphere system," *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006) 121107/1-121107/3.
- 14) 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.*, **86** (2005) 261106/1-261106/3.
- 15) H. Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and M.

- Takahashi: "Fiber-microsphere laser with a submicrometer sol-gel silica glass layer codoped with erbium, aluminum, and phosphorus," *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 101103/1-101103/3.
- 16) H. Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and M. Takahashi: "Control of spontaneous emission coupling factor  $\beta$  in fiber-coupled microsphere resonators," *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 071115/1-071115/3.
  - 17) Q. A. Turchette, C. J. Hood, W. Lange, H. Mabuchi and H. J. Kimble: "Measurement of conditional phase shifts for quantum logic," *Phys. Rev. Lett.*, **75** (1995) 4710-4713.
  - 18) M. L. Gorodetsky, A. A. Savchenkov and V. S. Ilchenko: "Ultimate Q of optical microsphere resonators," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 453-455.
  - 19) Y. Takahashi, H. Hagino, Y. Tanaka, B. S. Song, T. Asano and S. Noda: "High-Q nanocavity with a 2-ns photon lifetime," *Opt. Express*, **15** (2007) 17206-17213.
  - 20) J. C. Knight, G. Cheung, F. Jacques and T. A. Birks: "Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1129-1131.
  - 21) M. Cai and K. Vahala: "Highly efficient optical power transfer to whispering-gallery modes by use of a symmetrical dual-coupling configuration," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 260-262.
  - 22) D. K. Armani, T. J. Kippenberg, S. M. Spillane and K. J. Vahala: "Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip," *Nature*, **421** (2003) 925-928.
  - 23) 高島秀聡, 藤原英樹, 竹内繁樹, 笹木敬司, 高橋雅英: "ファイバー結合微小球共振器における自然放出結合係数の制御," *日本物理学会講演概要集*, **62**, No. 2 (2007) 153.
  - 24) P. Palinginis, S. Tavenner, M. Lonergan and H. Wang: "Spectral hole burning and zero phonon linewidth in semiconductor nanocrystals," *Phys. Rev. B*, **67** (2003) 201307.
  - 25) L. Coolen, X. Brokmann, P. Spinicelli and J.-P. Hermier: "Emission characterization of a single CdSe-ZnS nanocrystal with high temporal and spectral resolution by photon-correlation Fourier spectroscopy," *Phys. Rev. Lett.*, **100** (2008) 027403/1-027403/4.
  - 26) M. Cai, O. Painter and K. J. Vahala: "Fiber-coupled microsphere laser," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 1430-1432.
  - 27) D. Keng, S. R. McAnanama, I. Teraoka and S. Arnold: "Resonance fluctuations of a whispering gallery mode biosensor by particles undergoing Brownian motion," *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007) 103902/1-103902/3.

(2008年8月7日受理)