

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 1 日現在

機関番号：11301  
 研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22244035  
 研究課題名（和文） 光子・固体間の単一光子レベル非線形相互作用を介した量子演算素子の開発  
 研究課題名（英文） Development of quantum operation devices using single-photon-level nonlinear interaction between photons and solids  
 研究代表者  
 枝松 圭一（EDAMATSU KEIICHI）  
 東北大学・電気通信研究所・教授  
 研究者番号：10193997

研究成果の概要（和文）：本研究では、光子と固体内量子系との単一光子レベル非線形相互作用を利用した量子演算素子の提案とその物理的実装を目指し、(1) 走査型光ファイバ微小共振器の開発、(2) ダイヤモンド NV 中心および半導体単一量子ドットにおける量子準位の光応答の観測、(3) 光子と固体内 $\Lambda$ 型三準位系との結合による量子演算素子に関する理論、に関する研究開発を行った。

研究成果の概要（英文）：We propose quantum operation devices utilizing single-photon-level nonlinear interaction between photons and solid-state quantum systems. Toward the physical implementation of such devices, we have investigated (1) the development of a fiber-based scanning microcavity system, and (2) the optical responses of a single diamond NV center and a single semiconductor quantum dot. We also carried out (3) the theoretical study on the quantum operation devices utilizing coupled systems between photons and a  $\Lambda$ -level system.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	24,800,000	7,440,000	32,240,000
2011 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2012 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
年度			
年度			
総計	36,600,000	10,980,000	47,580,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：光物性、量子情報

## 1. 研究開始当初の背景

量子情報通信技術は、従来の情報技術の限界を根本から打破する可能性を秘めており、世界中の多くの分野の研究者が精力的に研究を進めている。量子情報通信技術を具現するハードウェアにおいて最も重要な基本技術となる、二量子ビット間の「量子ゲート」素子は、少数の量子ビット間の動作であれば、

原子系や固体系を含む多くの系で実現されているが、本格的な量子情報処理のためには、多数の量子ビット系における演算を可能にするいわゆる「スケーラブル」なアーキテクチャが不可欠である。しかしながら、量子ビット間の量子演算をスケーラブルに行い得る量子ゲート素子はいまだ実現しておらず、当該分野における最重要課題となっている。

本研究代表者（枝松）等のグループは、半導体を用いた量子もつれ光子生成、半導体電子スピンの光によるコヒーレントな制御と読み出し等、光子と固体系とを用いた量子光学・量子情報素子の研究を推進している。さらに、現実的に利用可能な光学媒体に立脚した量子演算素子の研究を進め、光ファイバ・固体導波路媒質における単一光子レベルの非線形位相シフトの観測等の研究成果を上げてきた。また、研究分担者（越野）らは、光子と物質系との間の量子的非線形効果を等価な半古典論により評価する理論体系を構築するなど、単一光子レベル非線形効果の理論において独創的な研究を推進している。これら実験・理論の両面において研究を推進しているグループが密接に連携することにより、全く新しい原理に基づく量子演算素子を開発するという本研究の着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、光子と固体内少数準位量子系との間にはたらく単一光子レベル非線形相互作用を利用した新しいタイプの量子演算素子の提案とその物理的実装を目指し、以下の項目について実験および理論の緊密な連携を基礎とした研究開発を行う。

### (1) 光子と固体内二準位系との結合による量子演算素子

光ファイバを用いた走査型微小共振器（本研究で開発）と固体内の二準位系とで構成される「一次元的光子+二準位量子系」を実現し、その量子演算素子としての特性を実験・理論の両面から明らかにする。固体二準位系として、ダイヤモンドの局在電子中心である NV 中心を利用する。

### (2) 光子と固体内 $\Lambda$ 型三準位系との結合による量子演算素子

上述した走査型微小共振器と固体中の $\Lambda$ 型三準位電子系を結合させた「一次元的光子+ $\Lambda$ 型三準位量子系」の量子演算素子としての特性を理論的に明らかにして、本研究計画に続いて予定している実験研究の指針とする。将来の応用的側面から、通信波長帯にも拡張可能な三準位系として、半導体表面に生成した量子ドット中の過剰電子準位 (trion) を用いることを想定する。

## 3. 研究の方法

本研究では、「一次元光子+少数準位量子系」を用いた量子ゲートの実現に向けて、まず、(1) 走査型光ファイバ微小共振器の開発を行う。これと並行して、(2) 単一量子系の光応答を調査するため、ダイヤモンド中の単一 NV 中心および半導体単一量子ドットの光応答の観測を行う。その後、これらの単一量子系と微小共振器との結合を実現して、

「一次元光子+二準位量子系」の物理的実装を行う。

また、理論面では、(3)  $\Lambda$ 型三準位系を用いた量子メモリ・量子ゲートの理論の研究を、実験と密接に連携・フィードバックしながら推進する。

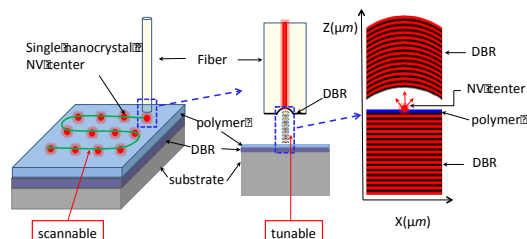


図 1. 走査型光ファイバ微小共振器の概念図。

図。

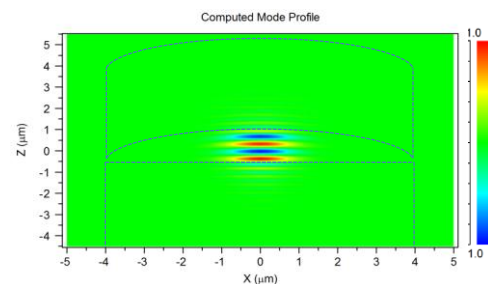


図 2. 設計した微小共振器の電磁場解析の結果。中央部において高い電界強度をもつ共振器モードが生成されることがわかる。

## 4. 研究成果

### (1) 走査型光ファイバ微小共振器の開発

固体内にランダムに存在する少数準位量子系（局在電子準位や量子ドット等）と光微小共振器との最適結合を容易に達成するための、走査型光ファイバ微小共振器の開発を行った。図 1 に示すように、この共振器は探針部分と試料を保持する基盤部分とで構成され、対象系を共振器モードの最適位置に配置することが可能である。まず、FDTD 法による電磁場解析を行い、最適な共振器構造を設計した。その結果、ファイバ端面を曲率半径数 $\mu\text{m}$ の凹面に加工し、ファイバ端面および基盤面にブラッグ反射層を施すことで高い Q 値と小さなモード体積を両立し、非常に大きなパーセル因子をもつ高性能な共振器を構成できることを明らかにした。図 2 にその一例を示す。ファイバの凹面曲率半径  $8\ \mu\text{m}$ 、共振器長（中央部） $1.34\ \mu\text{m}$  において、Q 値  $\sim 2 \times 10^5$ 、モード体積  $\sim 1\ \mu\text{m}^3$  程度の高性能な

共振器が生成されることがわかった．この共振器と単一量子系の結合によるパーセル因子は $\sim 4 \times 10^3$ 程度と予想され，本手法による共振器構造が原理的に優れたものであることが示された．

次に，高精度三次元ピエゾステージを導入して，共振器走査のためのフィードバック制御システムの製作を行った．この走査型微小

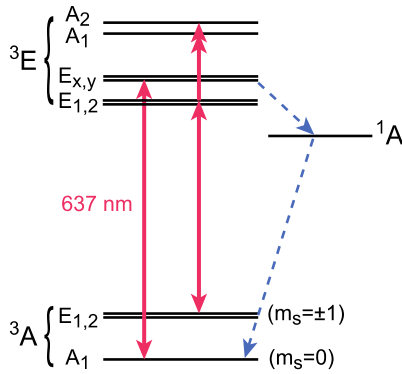


図 3. ダイヤモンド NV 中心の準位図．

共振器を実装するための高分解能 XYZ 軸ピエゾ移動ステージを導入し，その駆動プログラムを開発した．震災による研究の遅れもあって，研究期間内に走査型微小共振器の開発を完了することができなかつたが，今後も継続して開発を続け，以下で述べる単一量子系と微小共振器との結合系の実現を目指す予定である．

### (2) 単一量子系の光応答

CVD 法で作成したダイヤモンド薄膜中の NV 中心試料の顕微発光分光を行い，その発光スペクトル，励起スペクトル，それらの温度変化等の基礎データを収集した．図 3 に NV 中心の準位図を示す．NV 中心の発光スペクトルは，三重項  $3A \rightarrow 3E$  間の遷移に由来する波長 637 nm のゼロフォノン線と，その長波長側の幅広いフォノンサイドバンドから成る．フォノンサイドバンド発光強度をモニタしながら狭線幅レーザによる励起波長を掃引することで，その励起スペクトルを観測し， $3E$  準位内の個々の副準位 ( $E_{1,2}$ ,  $E_{x,y}$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ) への共鳴励起を可能とした．この結果は，今後，NV 中心と共振器との結合を実現する上での基本となるものである．

また，GaAs/InGaAs 単一量子ドット試料の顕微発光分光を行い，その発光スペクトル，励起スペクトル，それらの温度変化等の基礎データを収集した．励起スペクトルにおいて，最低励起状態より数 meV 上位に存在する複数の励起準位を明確に分離して測定することに成功した．また，これらの準位を共鳴励

起した際の非線形光学効果を精度良く測定するためのヘテロダイン非線形分光法を開発した．この技術は，単一量子ドットを共振器と結合させた際の光学非線形性に基づくゲート動作を検証する際に重要な技術である．

### (3) $\Lambda$ 型三準位系を用いた量子メモリ・量子

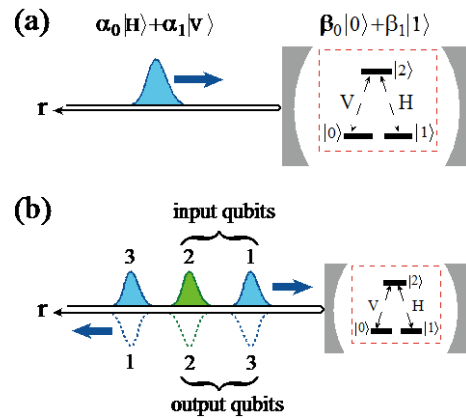


図 4. (a)  $\Lambda$  系と一次元光子との反射型相互作用．(b) 光子—光子 (SWAP) $^{1/2}$  ゲート．光子 1 及び 2 が入力ビット，光子 2 及び 3 が出力ビット．原子初期状態と入力光子 3 は任意．

### ゲートの理論

#### ① 決定論的量子もつれ生成ゲートの提案

単一光子は，その量子コヒーレンスの良さに加え，NOT ゲートなどの「1ビットゲート」を線形光学素子により容易に実現できるという特長を持つため，量子情報処理に最適の物理系である．光子量子ビットの欠点は，互いの相互作用が微弱なため，制御 NOT ゲートなどの「2ビットゲート」の実現が難しい点にある．この問題点は，補助光子の測定結果により確率的にゲートを成功させる「線形光学量子計算」により部分的に解決されたが，その確率性のためスケラブルな量子回路の構築には適していない．本研究では，決定論的に動作する 2 ビット光ゲートを半導体など固体光学媒質を介して実現する方法を，理論面から提案した．

提案するゲートの概念図を図 4(a)に示す：固体量子ビット（以下，原子）は 2 つの縮退した基底状態  $|0\rangle, |1\rangle$  と励起状態  $|2\rangle$  を有し， $|0\rangle \leftrightarrow |2\rangle$  間遷移には縦偏光 (V) 光子を， $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$  間遷移には横偏光 (H) 光子をそれぞれ伴う．また， $|2\rangle \rightarrow |0\rangle$  崩壊レートと  $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$  崩壊レートは等しい．光子に関しては偏光状態 ( $|H\rangle, |V\rangle$ ) を量子ビットと見做し，原子に関しては基底状態 ( $|0\rangle, |1\rangle$ ) を量子ビットと見做す．始状態が  $|H, 0\rangle$  または

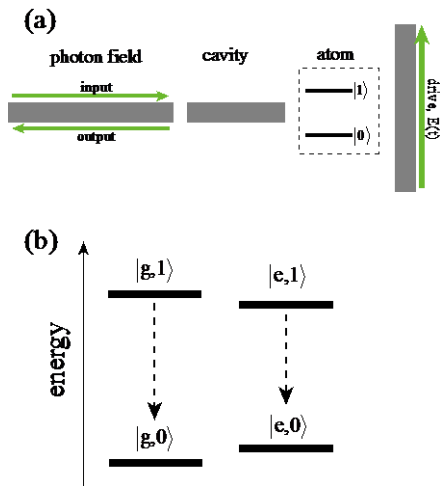


図 5. (a) 考察する系の概念図. 量子発光体・共振器・一次元光子場が輻射的に結合している. (b) Nesting regime での準位構造.

$|V,1\rangle$ の場合には、原子の偏光選択則より明らかのように光子は原子と相互作用せず単に反射される. 一方、始状態が  $|H,1\rangle$  の場合には、 $|1\rangle \rightarrow |2\rangle \rightarrow |0\rangle$  のラマン過程がおこりうる. 特に、入射光子が原子に共鳴している場合、状態反転 ( $|H,1\rangle \rightarrow |V,0\rangle$ ) の確率が 1 となる. ( $|V,0\rangle \rightarrow |H,1\rangle$  も同様.) これらの決定論的なラマン過程は、両側共振器における共鳴トンネリングと同様の、入射光と原子からの輻射との干渉に由来する線形効果である. これらの結果は、原子ビットと光子ビットが反射により完全に入れ替わる「原子-光子 SWAP ゲート」の実現を意味しており、原子を光子の「量子メモリ」として活用できる. 一方、入射光子が輻射幅に等しい離調を持つ場合には、原子ビットと光子ビットの間に最大量子もつれを生成する「原子-光子 (SWAP)<sup>1/2</sup> ゲート」が実現できる.

上述の原子-光子ゲートは、図 4(b) のように三個の光子を続けざまに光子に入射することによって光子-光子ゲートへと変換できる. 光子 1 は原子に共鳴しており、反射の際光子 1 の量子情報が原子に移る. 光子 2 は原子-光子間に纏れ合いを生成すべく離調を有している. 最後に、光子 3 は原子に共鳴しており、反射の際に原子の量子情報を光子 3 に回収する. この三回の反射により、入力光子 1 及び 2 と出力光子 2 及び 3 との間で、二光子量子もつれ生成ゲートが実現される. このゲートの特長は次の通りである: (i) 光学非線形性を全く用いていないため、パルス形状や時間間隔が揺らいでも良い, (ii) 光子干渉を用いていないため、光路長揺らぎに強い, (iii) 原子を完全に受動的に用いており、初期

化も含め補助場による操作が不要である. このゲートの物理的実装の有力候補は、固体量子系においてはダイヤモンド NV 中心や半導体量子ドット、共振器系においては上述した走査型微小共振器、あるいはフォトニック結晶共振器やトロイド共振器等である.

## ②インピーダンス整合量子系の実装理論

一次元光子場と量子発光体とが強く結合した「一次元量子光学系」においては、入射光と発光体からの輻射との破壊的干渉のために入射光子が極めて効率よく発光体と相互作用し、自由空間中では不可能な新奇光学現象が可能となる. 特に、発光体が  $\Delta$  型の三準位系であり (i) 励起状態からの二つの崩壊レートが等しい (ii) 励起状態からの輻射が完全に一次元場に放出される、という「インピーダンス整合条件」を満たす場合には、単一光子の入射により決定論的に発光体の量子状態をスイッチすることが可能となり、量子メモリや光子検出器への応用が期待される.

本研究では、単一の量子発光体と共振器から構成される「共振器量子電磁気学 (cavity QED) 系」において、インピーダンス整合条件を満足する  $\Delta$  系の実装方法を理論的に示した. 考察の対象とするのは、量子発光体・片側共振器・一次元光子場の結合系であり、量子発光体は外場によりドライブされている (図 5(a)). 量子発光体と共振器の共鳴周波数は大きく離れており、両者は分散的に結合している. 「量子発光体+共振器」系の状態は基底状態ラダー  $|g,n\rangle$  および励起状態ラダー  $|e,n\rangle$  ( $n=0,1,2,\dots$  は共振器光子数) から構成される. ドライブ周波数による回転座標に移行すると、ドライブ周波数によりラダー間のエネルギー差を、ドライブ強度によりラダー間の結合定数を、それぞれ制御できる. 特に発光体-共振器間の結合が強く、分散シフトが大きい系においては、固有エネルギーが下から  $|g,0\rangle, |e,0\rangle, |e,1\rangle, |g,1\rangle$  の順になるようにドライブ周波数を選ぶことができ

(nesting regime, 図 5(b)), この状況で適当なドライブ強度を与えることにより、インピーダンス整合した  $\Delta$  系を実現できることを明らかにした.

## (4) まとめと今後の展望

前述したように、本研究の目的は、光子と固体量子系との結合による量子演算素子の実現にむけた実験および理論的研究である. 実験では、走査型光ファイバ微小共振器の開発およびダイヤモンド NV 中心と半導体単一量子ドットを対象とした固体内単一量子準位の光学的観測を行った. 実験では当初目標の微小共振器と固体内二準位系との結合を観測するまでには至らなかったが、その実現にむけて着実な進展をみた. 理論面では、 $\Delta$

型三準位系を用いた量子メモリ・量子ゲートを用いた決定論的量子もつれ生成ゲートの提案や、そのインピーダンス整合条件について大きな進展を得た。今後は、これらの理論的進展を実験的に検証することを目指し、開発中の走査型微小共振器と固体量子系との結合を目指した実験研究を展開していく予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 22 件, 全て査読有)

- [1] E. Iyoda, T. Kato, T. Aoki, K. Edamatsu, and K. Koshino, Properties of a single photon generated by a solid-state emitter: Effects of pure dephasing, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 014301/1-10 (2013) 査読有
- [2] K. Koshino and Y. Matsuzaki, Entangling homogeneously broadened matter qubits in the weak-coupling cavity-QED regime, *Phys. Rev. A* **86**, 020305(R)/1-4 (2012) 査読有
- [3] K. Koshino, Control of the radiative level shift and linewidth of a superconducting artificial atom through a variable boundary condition, *New J. Phys.* **14**, 043005/1-21 (2012) 査読有
- [4] F. Kaneda, R. Shimizu, S. Ishizaka, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, Experimental activation of bound entanglement, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 040501/1-5 (2012) 査読有
- [5] M. Yabuno, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, Four-photon quantum interferometry at a telecom wavelength, *Phys. Rev. A* **86**, 010302/1-4 (2012) 査読有
- [6] H. Kosaka, T. Inagaki, R. Hitomi, F. Izawa, Y. Rikitake, H. Imamura, Y. Mitsumori, and K. Edamatsu, Coherent transfer of time-bin photons to electron spins in a semiconductor *Phys. Rev. A* **85**, 042304/1-8 (2012) 査読有
- [7] W. Ueno, F. Kaneda, H. Suzuki, S. Nagano, A. Syouji, R. Shimizu, K. Suizu, and K. Edamatsu, Entangled photon generation in two-period quasi-phase-matched parametric down-conversion, *Opt. Exp.* **20**, 5508-5517 (2012) 査読有
- [8] T. Inagaki, H. Kosaka, Y. Mitsumori, and K. Edamatsu, Electron spin state tomography with coherent Kerr effect, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 173108/1-3 (2011) 査読有
- [9] Y. Mitsumori, Y. Miyahara, K. Uedaira, H. Kosaka, S. Shimomura, S. Hiyamizu, and K. Edamatsu, Micro-pump-probe spectroscopy of an exciton in a single semiconductor quantum dot using a heterodyne technique, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 095004/1-4 (2011) 査読有
- [10] K. Koshino, Theory of resonance fluorescence from a solid-state cavity QED system: Effects of pure dephasing, *Phys. Rev. A* **84**, 033824/1-8 (2011) 査読有
- [11] R.-B. Jin, J. Zhang, R. Shimizu, N. Matsuda, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, High-visibility nonclassical interference between intrinsically pure heralded single photons and photons from a weak coherent field, *Phys. Rev. A* **83**, 031805(R)/1-4 (2011) 査読有
- [12] M. Nakatani, R. Shimizu, and K. Koshino, Up-conversion dynamics for temporally entangled two-photon pulses, *Phys. Rev. A* **83**, 013824/1-6 (2010) 査読有
- [13] K. Yoshimi and K. Koshino, Photon statistics of atomic fluorescence after  $\pi$ -pulse excitation, *Phys. Rev. A* **82**, 033818/1-5 (2010) 査読有

〔学会発表〕 (計 98 件, 招待講演 11 件)

- [1] 越野和樹, 他, 超伝導回路 QED における  $\Delta$  型三準位系の量子光学応答 (理論), 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 東広島
- [2] K. Edamatsu, *et al.*, Measurement-disturbance uncertainty relations in generalized photon polarization measurements, The 6th Asia-Pacific Conference and Workshop on Quantum Information Science, December 4, 2012, Putrajaya, Malaysia (Invited talk)
- [3] K. Koshino and Y. Matsuzaki, Entanglement generation in weak-coupling cavity-QED systems, The 6th Asia-Pacific Conference and Workshop on Quantum Information Science, December 4, 2012, Putrajaya, Malaysia
- [4] 越野和樹, 中村泰信, トランズモン型超伝導量子ビットの量子光学応答: 三準位着衣状態の観測 (理論), 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 26 日, 西宮
- [5] K. Edamatsu, Multi-photon quantum interference and quantum information, NII Shonan Meeting "Hybrid Quantum Devices", Nov. 6, 2011, Hayama, Japan (invited talk)
- [6] 越野和樹,  $\Lambda$  型三準位系を用いた決定論的光子量子ゲート理論, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21 日, 富山
- [7] 越野和樹, Deterministic Raman transition and its application to quantum information processing, 京都大学 GCOE シンポジウム,

2011年2月22日, 京都 (招待講演)

- [8] K. Edamatsu, Photon pair sources with controlled frequency correlation, The 2nd International Conference on Quantum Information and Technology, October 22, 2010, Tokyo, Japan (Invited talk)
- [9] 越野和樹, 石坂智, 中村泰信, Deterministic photon-photon root-SWAP gate using a Lambda system, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 23 日, 堺

[その他]

ホームページ等

<http://www.quantum.riec.tohoku.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

枝松 圭一 (EDAMATSU KEIICHI)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号 : 10193997

### (2) 研究分担者

越野 和樹 (KOSHINO KAZUKI)

東京医科歯科大学・教養部・准教授

研究者番号 : 90332311

### (3) 連携研究者

三森 康義 (MITSUMORI YASUYOSHI)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号 : 70375153