

研究課題別評価

1 研究課題名: 光子数状態の生成と制御 - 光子数マニピュレーションの実現にむけて -

2 研究者氏名: 竹内 繁樹

ポスドク研究員: ホフマン ホルガ(研究期間 平成 14 年 4 月 ~ 平成 16 年 4 月)

ポスドク研究員: 大橋 弘明(研究期間 平成 14 年 4 月 ~ 平成 17 年 3 月)

ポスドク研究員: ソージャエフ アレキサンドル(研究期間 平成 15 年 10 月 ~ 平成 16 年 9 月)

3 研究の狙い:

近年、量子力学の本質的な性質を直接に利用する量子情報通信・処理の分野が急速に発展している。これらの量子情報通信・処理では、「量子状態」を運び、保持してくれる担体を準備し、また自在に制御できなければならない。その担体として、光子は非常に優れた特性を持っている。制御性がよく、単一量子の検出が可能であり、また長距離伝送技術が存在するなどである。しかし、担体として用いるためには、もう一つクリアしなければならない条件がある。それは、「パルス内に光子が一つだけの状態である『単一光子状態』を、高い確率で生成する。」ことである。これまでの方法では、発生した光子を集光することが困難であり、パルス内の存在確率(出力部)は10%を上回るものは存在しなかった。

そこで我々は、「パルス内に光子が一つだけの状態である『単一光子状態』を、高い確率で生成する装置」の実現にむけた実験研究と、光子数状態の量子制御に関する理論研究に取り組んだ。光子数状態の生成方法としては、2つの方法について平行して研究を進めた。一つは、パラメトリック蛍光光子対を動的に制御する方法である。我々の開発した「高効率ビーム状光子対発生方法」で発生した光子対の一方の光子を、光子検出器でモニターし、その検出結果に応じその場でもう一方の光子の射出を制御する方法を独自に提案し、パルス内の光子数制御を実現を目指した。もう一つは、単一の量子ドットを光源として用いる方法である。この方法は近年急速に関心を持たれ、様々な研究が存在するが、それらは一般にヘリウム温度程度の低温でしか動作しなかった。本研究では、カドミウムセレン量子ドットに着目、室温で動作する光子源を目ざし研究を行った。さらに、発生した単一光子の量子状態を制御する方法について、主に理論的な研究を行った。特に、「単一原子の非線形性を用いた、光子数状態に対する自己位相変調素子」「2(多)光子状態間のもつれ合いの生成と検証」などに取り組んだ。

4 研究成果:

(1) パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源

光子対の動的制御法により、パルス内部に光子が1個存在する確率 $P(1)$ が射出部で 40% の単一光子の生成に成功した。これは、これまでの報告に比べて4倍以上高い値である。光子対の発生には、独自に開発した、ビーム状に発生させる方法を用いた。光子対は確率的に発生するため、必ず最低1つのアイドル光子が検出されるようにポンプ光強度を調整した。実験の結果、これまで報告されてきた値の4倍以上となる、 $P(1)=40\%$ という高い単一光子発生確率が得られた。さらに、ポンプ光強度を増大することで、繰り返し 50kHz で同様の光子数分布($P(1)=0.39$)を得ることに成功した。さらに現在、2光子源においてはシングルモードファイバからの出力において $P(1)=0.55(\pm 5\%)$ を実現している。単一分子や単一量子ドットから蛍光を用いるなど、他の方法での単一光子源の開発も進められているが、その集光の難しさから、集光された状況での $P(1)$ は 8% 程度が知る限り世界最高値であった。

(2) 単一発光体を用いた単一光子源

我々は CdSe 量子ドットに着目し、室温で動作の光子源開発を目指して研究を行った。その結

果、単一 CdSe ドットからの発光の光子反群集 (photon antibunching) を、室温において確認することに成功した $g^{(2)}(\tau=0.16)$ 。これまでに単一量子ドットを用いた研究としては、GaAs, InAs, InP などを光源とした研究がなされてきた。しかし、これらの光源はすべて 10K 以下の低温でしか動作しなかった。

試料は、おなじく光と制御の研究者である北大鳥本助教授から提供を受け、PMMA/トルエン溶液に分散させ、カバーガラス上にスピコートし作成した。今後は $g^{(2)}(\tau=0)$ の低減化を図ると共に、共振器内に閉じ込めなどの方法により高効率化を図り、引き続き室温動作量子ドット単一光子源の可能性を追求したい。(最近、CdSe/ZnS 量子ドットからの蛍光について $g^{(2)}(\tau=0) < 0.1$ の値を得た。)

(3) 光子数状態の量子状態制御についての理論研究1 量子位相ゲート

量子コンピュータや量子通信などで不可欠な、複数の光子の量子相関操作について、我々は、単一原子の非線形性を用いた自己位相変調効果について理論的な研究を行った。その結果、「片側キャビティと、共鳴条件を用いた自己位相変調素子」を新規に提案し、その半古典的、ならびに全量子力学的な解析に成功した。特に、この種の光量子デバイスに対して、入力光子波動関数が出力時にどのように変化するかは、しるかぎり今回の研究が初めての物である。

(4) 光子数状態の量子状態制御についての理論研究2 光子数状態間の量子もつれ合い

我々は、「2光子状態間もつれ合い状態」と、「2つの独立している、もつれ合い光子対」を見分ける方法を発案した。それは、 $(|HV\rangle, |RL\rangle, |PM\rangle)$ という、さきほどのものとは別の偏光基底の組の間の相関を見る方法である。R(L)は右回り(左回り)円偏光、P(M)は +45度(-45度)の斜め直線偏光である。さらに、この検証実験を行った結果、「2光子状態間もつれ合い状態」の生成を検証することに初めて成功した。

5 自己評価:

本プロジェクトの目的である「光子数状態の生成と制御」のうち、「生成」に関しては、概ね満足する結果が得られたと考えている。本プロジェクトの過程で、パラメトリック蛍光対の素性についての我々の理解が格段に進んだ。研究の中間点で $P(1)=0.4$ の光子源開発に成功、現在では $P(1)=0.55$ と高い存在確率をもつパラメトリック蛍光対を利用した光子対源によって、線形光学量子位相ゲートの動作確認を行えるところまで来た。また、本プロジェクトの知見を元に、単一光子源を用いた長距離高安全性量子暗号実験のプロジェクトも進行中である。

また、「制御」に関しても概ね満足すべき物と考えている。光子の量子の位相ゲートに関する研究(半古典、全量子力学的解析)は、他の論文において pioneering work として参照されている。また、2光子状態間もつれ合いも、「光子数状態」が単に「光子が2つ」という状態ではない、一筋縄ではない概念であることを興味深く示せた物だと思っている。

一方、「単一発光体を用いた単一光子源」については反省すべき点がある。室温でのアンチバンチングの確認は達成した物の、当初目的としていた光閉じこめによる $P(1)$ の増大には至らなかった。

今回、博士研究員を雇用し、そのみなさんと共同研究ができたことは、私にとって非常な喜びであり、大きな経験になった。彼らとの共同研究無くしてはこれだけ広範囲に研究の幹・枝を延ばすことは明らかに不可能であった。と同時に、もう少しうまく研究をドライブしてあげられなかったかと自分の経験不足を悔やむ部分もある。

6 研究総括の見解:

光による量子情報通信・処理の研究が急速に進展しているが、竹内氏はその一翼を担っている。量子情報通信・処理には、パルス内に光子が一つだけ含む「単一光子状態」が必要不可欠である。竹内氏の研究目標の第一は、この単一光子状態を高い確率で生成することであった。そのため

の第一の方法は、パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源の作製であった。ここでは、光子対をビーム状に発生させ、一方の光子を観測したときに、ゲートを開いて他方の光子を系に導入させ、さらにポンプ光強度を調整した。その結果、今まではパルス内の一光子の存在確率が 10%以下であったものが、40%までその確率を向上させた。単一光子を発生させる第二の方法として、単一の CdSe 量子ドットからの単一光子源の可能性を追求した。この場合には、光子のアンチバンチング、すなわち、同一時刻に 2 個の光子を観測する確率 $g^{(2)}(t=0)$ を 0.16 まで縮小した結果を得ている。このプロジェクトの第二の目標である光子数状態の制御は、理論的成果を挙げている。「2 光子状態間のもつれ合い状態」と「2 つの独立している、もつれ合い光子対」を見分ける方法などを提案している。

竹内氏の「光と制御」プロジェクトに対する貢献は、上記の研究成果に加えて 2 つの面で特筆に値する。第一には、年 2 回企画した合宿研究会においては、リーダーシップを発揮して、質問とコメントによって研究会を盛り上げ、有意義な会に仕立ててくれた。それによって、この様な有意義で楽しい研究会という文化を創り出した。第二の貢献は、上記の単一光子源としての CdSe 量子ドットは、同じ「光と制御」チームの鳥本氏との共同研究である。この様に、22 名の「光と制御」の研究チーム間に共同研究の輪を拡げて、有効な共同体にした功績は大きい。

7 主な論文等:

論文

- 1 . Holger F. Hofmann, Kunihiro Kojima, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Optimized phase switching using a single atom nonlinearity' *Journal of Optics B*. vol.5, 218-221 (2003)
- 2 . Holger F. Hofmann 'Uncertainty characteristics of generalized quantum measurements' *Physical Review A*, vol.67, 022106 (2003)
- 3 . Holger F. Hofmann, Kunihiro Kojima, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Entanglement and four-wave mixing effects in the dissipation free nonlinear interaction of two photons at a single atom' *Physical Review A*. vol.68, 043813 (2003)
- 4 . Kunihiro Kojima, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Nonlinear interaction of two photons at a one-dimensional atom: spatiotemporal quantum coherence in the emitted field' *Physical Review A*. vol.68, 013803 (2003)
- 5 . Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi 'Violation of local uncertainty relations as a signature of entanglement' *Physical Review A*, vol.68, 032103 (2003)
- 6 . Holger F. Hofmann 'Bound entangled states violate a nonsymmetric local uncertainty relation' *Physical Review A*, vol.68, 034307 (2003)
- 7 . Kenji Tsujino, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Distinguishing genuine entangled two-photon-polarization states from independently generated pairs of entangled photons' *Physical Review Letters* vol.92, 153602 (2004)
- 8 . Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi 'Quantum-state tomography for spin-1 systems' *Physical Review A*, vol.69, 042108 (2004)
- 9 . Kunihiro Kojima, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi, and Keiji Sasaki 'Efficiencies for the single-mode operation of a quantum optical nonlinear shift gate' *Physical Review A*, vol.70 013810 (2004)
- 10 . Holger F. Hofmann 'Generation of highly nonclassical n-photon polarization states by superbunching at a photon bottleneck' *Physical Review A*, vol.70 023812 (2004)
- 11 . Kunihiro Kojima, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'A Study on the Shape of Two-Photon Wavefunctions after the Nonlinear Interaction with a One-Dimensional Atom' *Nonlinear Optics, Quantum Optics*, to be published (2004)

12. Hisaki Oka, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Effects of Decoherence on the Nonlinear Optical Phase Shift Obtained from a One-Dimensional Atom' Japanese Journal of Applied Physics, to be published (2004)

13. Shigeki Takeuchi, Ryo Okamoto, and Keiji Sasaki 'High-yield single photon source using gated spontaneous parametric down conversion' Applied Optics, vol.43 5708-2711 (2004)

他に2本投稿準備中

総説・著書

1. 竹内 繁樹 '量子コンピューター研究の近況レポート' 応用物理 71, 1367-1371 (2002)

2. 竹内 繁樹 '量子計算と量子情報理論 量子計算の実験' 別冊・数理科学 量子情報科学とその展開 量子コンピューター・暗号・情報通信 57-63 (2003)

3. 竹内 繁樹 '量子情報通信 量子計算・量子情報通信の未来と展望' 別冊・数理科学 量子情報科学とその展開 量子コンピューター・暗号・情報通信 191-198 (2003)

4. Shigeki Takeuchi 'I wish to be a photon juggler' Japan Society of Applied Physics International no.7 25-26 (2003)

5. 竹内 繁樹 '量子コンピューター 光の量子的な性質の究極の応用- O plus E vol.26 53-57 (2004)

6. 竹内 繁樹 '線形光学素子を用いた量子コンピューティング' 光学 33巻 284-290

7. 竹内 繁樹 '量子コンピューター' 講談社ブルーバックス (2005)

国際会議招待講演

1. Shigeki Takeuchi 'Quantum mechanics and single photon technology' 10th Anniversary RIES-Hokudai International Symposium (2002 12/11)

2. Shigeki Takeuchi 'Quantum Computation using Photons' The 8th International Symposium on Advanced Physical Fields (2003 1/16)

3. Shigeki Takeuchi, Ryo Okamoto and Keiji Sasaki 'Single photon source using parametric down conversion' SPIE Annual Meeting 2003 (2003 8/6)

4. Shigeki Takeuchi 'A high efficient single photon source and quantum phase gates for photonic qubits' ERATO Conference on Quantum Information Science 2003 (2003 9/6)

5. Shigeki Takeuchi 'Quantum information processing using Photons' 第6回日米先端科学技術-JAFoS (Japanese-American Frontiers of Science) シンポジウム (2003 12/8)

6. Shigeki Takeuchi 'Distinguishing genuine entangled two-photon-polarization states' Japan-Germany Colloquium 2004 on Quantum Optics (2004 2/12)

7. Shigeki Takeuchi 'Distinguishing entangled two-photon states and a highly efficient single photon source' The International Symposium on Quantum Info-Communications and Related Quantum Nanodevices 量子情報通信と量子ナノデバイスに関する国際シンポジウム (2004 3/12)

8. Shigeki Takeuchi, Kenji Tsujino, Holger F. Hofmann and Keiji Sasaki 'Distinguishing genuine entangled two-photon polarization states from independently generated pairs of entangled photons' SPIE Annual Meeting 2004 Optical Science and Technology (2004 8/5)

9. Shigeki Takeuchi 'Quantum information technologies using photons' KIAS-KAIST 2004 Workshop on Quantum Information Science (2004 8/30)

国際会議発表

1. Shigeki Takeuchi, Ryo Okamoto and Keiji Sasaki 'A Single photon source using parametric down conversion' International Conference on Quantum Information: Conceptual

- Foundations, Developments and Perspectives (2002 7/13)
- 2 . Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi 'Quantum computation with photonic qubits using linear optics and single photon technologies' International Conference on Quantum Information: Conceptual Foundations, Developments and Perspectives (2002 7/17)
 - 3 . Shigeki Takeuchi, Ryo Okamoto and Keiji Sasaki 'A single photon source using parametric down conversion' Erato Quantum Information Science symposium 2002 (2002 9/6)
 - 4 . Holger F. Hofmann 'Quantum teleportation: Information dynamics and non-local operations' Workshop on quantum information and quantum dynamics (2002 10/22)
 - 5 . Kunihiro Kojima, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Nonlinear interaction in a two photon pulse at an atom-cavity system' 10th Anniversary RIES-Hokudai International Symposium (2002 12/10)
 - 6 . Kunihiro Kojima, Shigeki Takeuchi, Keiji Sasaki and Holger F. Hofmann 'A fully quantum mechanical approach to the nonlinear interaction in two photon pulses at an atom-cavity system' CLEO EUROPE EQEC 2003 (2003 6/24)
 - 7 . Shigeki Takeuchi, Ryo Okamoto and Keiji Sasaki 'A single photon source using parametric down conversion' CLEO EUROPE EQEC 2003 (2003 6/25)
 - 8 . Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi, Kunihiro Kojima and Keiji Sasaki 'Generation of spatiotemporal two photon entanglement by an atom-cavity nonlinearity' CLEO EUROPE EQEC 2003 (2003 6/26)
 - 9 . Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi, Kunihiro Kojima and Keiji Sasaki 'Spatiotemporal coherence in the interaction of a two photon input pulse with an atom-cavity system' 16th International Conference on Laser Spectroscopy (2003 7/14)
 - 10 . Ryo Okamoto, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'A single photon source using parametric down conversion' 16th International Conference on Laser Spectroscopy (2003 7/14)
 - 11 . Kenji Tsujino, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Generation of entanglement between a pair of two photon polarization states using TYPE-II parametric down-conversion' 16th International Conference on Laser Spectroscopy (2003 7/15)
 - 12 . Shigeki Takeuchi 'Quantum information processing using photons' CREST&QNN03 Joint International Workshop (2003 7/23)
 - 13 . Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi 'Violation of local uncertainty relations by entangled N-level systems' Non-locality of Quantum Mechanics and Statistical Inference (A Satellite Workshop to EQIS'03) (2003 9/9)
 - 14 . Hisaki Oka, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Nonlinear phase shift obtained from a single atom embedded in a one-sided solid-state microcavity' The 5th RIES-Hokkaido Symposium on Advanced Nanoscience 織 [shoku] (2003 12/1)
 - 15 . Hiroaki Ohashi, Jun-ichi Hotta, Shigeki Takeuchi, Keiji Sasaki, Shin-ya Murakami, Tsukasa Torimoto and Bunsho Ootani 'Photoluminescence measurement of single CdSe nanoparticles' The 5th RIES-Hokkaido Symposium on Advanced Nanoscience 織 [shoku] (2003 12/1)
 - 16 . Hisaki Oka, Holger F. Hofmann, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki 'Effects of dephasing on the nonlinear phase shift obtained from a one-dimensional atom' Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications (NLO) (2004 8/4)

国内会議招待講演

- 1 . 竹内 繁樹 '量子情報技術とナノサイエンス' 公開シンポジウム「光とナノサイエンス」 (2002 11/30)

2. 竹内 繁樹 ‘光子を用いた量子情報通信処理’ レーザー学会学術講演会第23回年次大会(2003 1/31)
3. 竹内 繁樹 ‘光子数状態の生成制御’ 計測自動制御学会第3回制御部門大会 (2003 5/29)
4. 竹内 繁樹 ‘光子を用いた量子計算’ レーザー学会創立30周年記念レーザー学会学術講演会第24回年次大会 (2004 1/30)
5. 竹内 繁樹 ‘光量子ビット’ 第42回茅コンファレンス「量子情報処理の物理と技術」(2004 8/23)
6. 竹内 繁樹 ‘光子を用いた量子計算’ 電子情報通信学会2004ソサイエティ大会 (2004 9/23)
7. 竹内 繁樹 ‘Experiments on quantum information processing using photons’ 量子情報処理シンポジウム (2004.12.21)
8. 竹内 繁樹 ‘単一光子源の研究現状-パラメトリック蛍光対利用を中心に’ 応用物理学会シンポジウム (2005 3/29)

国内会議発表

1. Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi ‘Realization of quantum operations on photonic qubits by linear optics and post-selection’ 第6回量子情報技術研究会 (2002 5/27)
2. 小島邦裕, Holger F. Hofmann, 竹内繁樹, 笹木敬司 ‘キャビティ-原子系に対する入出力関係の定式化’ 第6回量子情報技術研究会 (2002 5/27)
3. 小島邦裕, Holger F. Hofmann, 竹内繁樹, 笹木敬司 ‘2準位原子を介した2光子間非線形相互作用’ 日本物理学会 2002年秋季大会 (2002 9/7)
4. 竹内繁樹, ホフマン・F・ホルガ ‘Single entangled-photon pair generation using parametric down conversion and linear optics’ 日本物理学会 2002年秋季大会 (2002 9/9)
5. ホフマン・F・ホルガ, 竹内繁樹 ‘Nonlinear quantum optics with beam splitters, single photon sources, and precise detectors’ 日本物理学会 2002年秋季大会 (2002 9/9)
6. 岡本亮, 竹内繁樹, 笹木敬司 ‘パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源’ 日本物理学会 2002年秋季大会 (2002 9/9)
7. Holger F. Hofmann, Kunihiko Kojima, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki ‘Realization of a resonant non-linear phase flip in cavity quantum electrodynamics’ 第7回量子情報技術研究会 (2002 11/11)
8. 岡本亮, 竹内繁樹, 笹木敬司 ‘パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源’ 第7回量子情報技術研究会 (2002 11/11)
9. 小島邦裕, Holger F. Hofmann, 竹内繁樹, 笹木敬司 ‘単一2準位原子を用いた量子位相ゲートの効率’ 日本物理学会第58回年次大会 (2003 3/30)
10. Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi ‘Characterization of entanglement using sum uncertainty relations for N-level systems’ 第8回量子情報技術研究会 (2003 6/30)
11. 辻野賢治, Holger F. Hofmann, 竹内繁樹, 笹木敬司 ‘パラメトリック下方変換を用いた2モード内4光子発生の検証実験’ 第8回量子情報技術研究会 (2003 6/30)
12. 岡寿樹, Holger F. Hofmann, 竹内繁樹, 笹木敬司 ‘単一原子ドープ片側固体共振器を用いた非線形位相シフトの実現’ 第8回量子情報技術研究会 (2003 7/1)
13. 川瀬大輔, 辻野賢治, 竹内繁樹, 笹木敬司, 和田篤, 大湊寛之, 西原昇, 宮本洋子 ‘ホログラムおよびファイバー干渉計を用いた光子の軌道角運動量重ね合わせ状態の観測’ 第8回量子情報技術研究会 (2003 7/1)
14. 竹内繁樹 ‘光子量子ビットを用いた量子情報処理’ 文部科学省科学研究費補助金企画調査シンポジウム (2003 8/18)

15. 岡本亮、竹内繁樹、笹木敬司 ‘パラメトリック蛍光対を用いた単一光子源の実現’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003 9/21)
16. 川瀬大輔、辻野賢治、竹内繁樹、笹木敬司、和田篤、大湊寛之、西原昇、宮本洋子 ‘ホログラムとファイバー干渉計を用いた光子の軌道角運動量もつれ合い状態検証実験’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003 9/21)
17. 千葉孝志、大橋弘明、藤原英樹、堀田純一、竹内繁樹、笹木敬司 ‘単一 DiI 分子の遷移ダイナミクスの蛍光解析’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003 9/22)
18. Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi ‘Uncertainty characteristics of entangled photons’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003 9/23)
19. 岡寿樹、Holger F. Hofmann、竹内繁樹、笹木敬司 ‘単一原子ドープ固体共振器における入出力微弱光の非線形位相シフト’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003 9/23)
20. 大橋弘明、堀田純一、竹内繁樹、笹木敬司、村上伸也、鳥本司、大谷文章 ‘単一 CdSe 量子ドットの光学特性’ 日本物理学会2003年秋季大会 (2003 9/23)
21. 川瀬大輔、辻野賢治、竹内繁樹、笹木敬司、和田篤、大湊寛之、西原昇、宮本洋子 ‘光子対における軌道角運動量もつれ合いのホログラム位置スキャンによる確認実験’ 第10回量子情報技術研究会 (2004 5/24)
22. 大橋弘明、堀田純一、竹内繁樹、笹木敬司、村上伸也、鳥本司、大谷文章 ‘単一 CdSe 量子ドットからの発光の光子統計’ 日本物理学会2004年秋季大会 (2004 9/12)
23. 岡寿樹、Holger F. Hofmann、竹内繁樹、笹木敬司 ‘1次元原子の非線形光学応答に対するデコヒーレンスの影響’ 日本物理学会2004年秋季大会 (2004 9/13)
24. 小島邦裕、ホルガ・F・ホフマン、竹内繁樹、笹木敬司 ‘一次元原子との非線形相互作用による2光子波束形状変化についての理論解析’ 日本物理学会2004年秋季大会 (2004 9/13)

特許

1. 特開 2002-228997(出願 2001-028533)、「低損失光スイッチング方法及び光スイッチ装置」、平成 13 年 2 月 5 日出願、平成 14 年 8 月 14 日公開
竹内繁樹
2. 特開 2002-281029(出願 2001-081501)、「量子暗号通信システム」、平成 13 年 3 月 21 日出願、平成 14 年 9 月 27 日公開
竹内繁樹
3. 特開 2003-0228091(出願 2002-026085)、「もつれ合い光子対発生装置」、平成 14 年 2 月 1 日出願、平成 15 年 8 月 15 日公開
竹内繁樹
4. 特開 2004-20970(出願 2002-176385)、「位相シフト光スイッチ」、平成 14 年 6 月 17 日出願、平成 16 年 1 月 22 日公開
竹内繁樹、ホフマン・ホルガ(JST 研究員)

国際特許:

1. (特願 PCT/JP03/00762)「Entangled Photon Pair Generator」、平成 15 年 1 月 28 日 PCT 出願
竹内繁樹
2. (特願 PCT/JP02/02672)「Quantum Cipher Communication System」、平成 14 年 3 月 20 日 PCT 出願
竹内繁樹