

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20244062

研究課題名（和文）群速度エンジニアリングによる、時空間単一モード光子源の実現と応用

研究課題名（英文）Realization and application of single photons in a single spatio-temporal mode by group velocity engineering

研究代表者

竹内 繁樹 (TAKEUCHI SHIGEKI)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号：80321959

研究成果の概要（和文）：

本研究では、独立した光子源間で良質な量子干渉をもつ単一光子源の実現と、光量子回路への応用を目指した。その結果、95.8%と世界最高レベルの2光子干渉性を実現した。また、入力された2光子の特定の偏光相関成分を抜き出す「量子もつれフィルター」、および2001年にKnillらの提案した線形光学量子計算の基本となる、「制御NOT光量子回路」の実現に成功した。また、擬似位相整合結晶における群速度分散の制御を旨とし、デバイスの作成ならびに評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

The aim of this project was to realize single photon sources with spatio-temporal coherence and its application to optical quantum circuits. As a result, we succeeded in the realization of a single photon source with two photon interference visibility of 95.8%. We also succeeded in the realization of 'an entanglement filter' which extracts certain polarization correlations between the two-photon inputs, and 'controlled-NOT optical quantum circuit' which was proposed by Knill et. al. in 2001 and the first step towards the scalable linear optics quantum computation. We also developed quasi phase matching devices for the control of group velocity dispersion and evaluated them.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	17,100,000	5,130,000	22,230,000
2009年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2010年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
年度			
年度			
総計	37,700,000	11,310,000	49,010,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子情報・単一光子

1. 研究開始当初の背景

量子力学的な性質を直接情報処理や情報通信に応用することで、現在のコンピュータには時間がかかりすぎ解くことのできない問題を解く量子コンピュータや、高度なセキュリティを提供する、量子暗号・量子多者間

プロトコルなどの、量子情報通信処理の研究が活発に進められている。中でも光子は、量子情報の担体として、伝送特性に優れ、かつ外部からの擾乱に強いなど良質な特性を持つ。

つ。特に、2001年に、Knill, Laflamme, Milburnらによって、単一光子源と線形光学素子、および検出器を用いた量子計算スキームが示され、またその後1方向量子計算による改良も提案され、スケーラブルな量子コンピュータ実現の有力な候補ともなっている。

申請者らは、単一光子と線形光学素子を用いた量子アルゴリズムを実現した後、光子を用いた量子情報処理の実現をめざし、複数光子の量子状態制御の研究を積極的に進めてきた。特に光量子ゲートに関しては、2002年に線形光学素子を用いたシンプルな量子制御ノットゲート(Phys.Rev.A(2002))およびもつれ合い生成フィルタ(Phys. Rev. Lett. (2002))を提案、最近その制御ノットゲートの開発に成功(Phys. Rev. Lett. (2005))している。また、関連する光子の量子状態制御とその応用の研究として、4つのもつれ合いにある光子を用いた標準量子限界を超える位相測定感度の実現(Science, 2007)にも成功していた。

この線形光学を用いた量子情報処理では、半透鏡における光子間の量子干渉が決定的に重要である。

入射時刻を変化させながら2つの光子を半透鏡に入射させると、遅延時間が0、つまり2つの光子が同時に入射した場合に、同時計数率が完全に0になる。つまり、2つの光子は半透鏡のいずれか一方の出力から2つずつ固まって出力されることになる。これが2光子量子干渉である。光子数が3個以上の実験では、独立した別個のパラメトリック加法変換(Parametric Down Conversion, PDC)光源から発生した光子間の量子干渉が重要となる。しかしその場合、明瞭度87%と、当時として高水準の量子干渉性を実現していたものの、複数の量子ゲートを含んだ複雑な光量子回路を実現するには十分ではなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、時空間単一モード単一光子源を実現し、独立した光子源間での非常に良質(明瞭度95%以上)な量子干渉を達成、それを用いることで、光子数を増大させた光量子回路実験を実現することである。

3. 研究の方法

以下の4つの方法で研究を進めた。

(1) 独立した光子源間での良質(明瞭度95%以上)な量子干渉の実現

複数の光子を用いた線形光学量子回路への応用に向け、従来の87%の2光子干渉の明瞭度を95%に向上することを目指した。これは、非干渉成分に換算すると、13%を5%以下と、エラー原因を1/3以下に押さえること

に相当する。

(2) 量子干渉性の、線形光学量子ゲートのエラーに及ぼす影響の理論的評価

線形光学量子ゲートのエラー要因として、入力光子の2光子干渉性の他に、光学素子(部分偏光ビームスプリッタ)の不完全性などが考えられる。本研究では、この原因について理論的に考察した。

(3) 疑似位相整合(Quasi Phase Matching, QPM)による非線形光学結晶への、群速度制御技術の適用。

疑似位相整合素子はその変換効率の高さから、新たなPDC光源として注目されている。しかし、その群速度の影響により、良質な2光子干渉を実現することは困難であった。本研究では、この問題をデバイスの設計によって克服することを目指した。

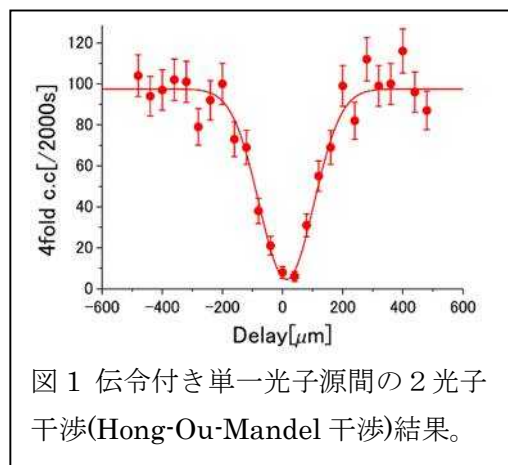


図1 伝令付き単一光子源間の2光子干渉(Hong-Ou-Mandel干渉)結果。

(4) 線形光学量子回路の実現

本研究で得られる、良質なPDC光源を利用して、ゲートを組み合わせた光量子回路の実現を目指した。光量子回路としては、我々自身が提案した、入力された2光子に対して特定の偏光相関成分だけを抜き出す「量子もつれフィルター」、および、2001年にKnill, Laflamme,およびMilburnによって提唱された制御ノットゲートの実現を目指した。

4. 研究成果

本研究において、下記の様な成果を得た。

(1) 独立した光子源間での良質(明瞭度96%)な量子干渉の実現。

パラメトリック下方変換により発生した光子の2光子干渉性を理論的に検討、その結果に基づき工夫した結果、 $95.8 \pm 1.9\%$ と、世界最高レベルの2光子干渉性をもつ光子源を実現した。検討の結果、我々は時間モードミスマッチを引き起こす要因として非線形光学結晶中での群速度不整合、および励起に利用しているパルス光の有限な時間幅(約

100 フェムト秒) に着目した。2光子干渉に与える影響をシンプルな理論モデルにより解析、対応する実験により有効性を確認した。またその解析に基づき、群速度不整合の大きさを最適化することにより、 $95.8 \pm 1.9\%$ と、世界最高レベルの2光子干渉性をもつ光子源の実現に成功した。(論文準備中)

(2) 量子干渉性の、線形光学量子ゲートのエラーに及ぼす影響の理論的評価

線形光学量子ゲートのエラー要因としては、入力光子の2光子干渉性の他に、光学素子の不完全性などが考えられる。その定量的評価は、実験で求められる光子の2光子干渉性を検討するために非常に重要である。本研究では、この原因について理論的に考察、各要因の寄与を定量的に明らかにした(New J. Phys. に掲載[1])

量子ゲートとしては、部分偏光ビームスプリッター (PPBS) を利用して実現した制御ノットゲート [2] をモデルとして選んだ (図 1)。このゲートは、反射率 $1/3$ の半透鏡における2光子干渉を利用し、2つの入力モードにそれぞれ1つずつ光子を入力し、2つの出力モードの双方において光子が1つずつ出力された場合 (確率 $1/9$) に制御ノットゲートとして動作する。PPBSは、垂直偏光成分、水平偏光成分に対してそれぞれ $1/3$ および 1 の反射率を理想的に持つ。この量子ゲートにおけるエラー要因としては、PPBSの各偏光に対する反射率の理想値からのずれに加え、反射光 (透過光) のそれらの偏光に依存した位相差、さらに入力された2光子の時空間的なモードミスマッチに起因する2光子干渉性の劣化をエラー原因として考えた。我々は、これらのエラー要因の寄与を、プロセスマトリクスを用いて理論的に解析した。その結果、特にエラー量が小さい領域で、要因ごとに異なる依存性を持つことを明らかにした。具体的には、垂直偏光に対する反射率や位相差に起因するエラーは、誤差の2次に比例するのに対し、水平偏光に対する反射率やモードミスマッチは誤差の1次に比例する。その結果、例えばエラーを 0.1% 以下に押さえ込みたい場合、垂直偏光反射率は 1% 程度まで誤差が許容されるが、水平偏光反射率の誤差は 0.1% 以下が求められる。同様に1次の依存性をもつ、光子の2光子干渉性 (モードミスマッチ) の低減も非常に重要であることが明らかとなった。またエラー間の相乗・相殺効果が全エラー量の 10% に達する場合があることなどを明らかにした。

(3) 疑似位相整合 (Quasi Phase Matching, QPM) による非線形光学結晶への、群速度制御技術の適用

疑似位相整合素子はその変換効率の高さ

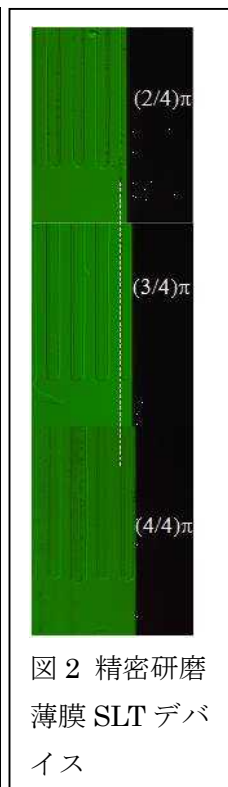


図 2 精密研磨
薄膜 SLT デ
バイス

から、新たな PDC 光源として注目されている。しかし、その群速度の影響により、良質な2光子干渉を実現することは困難であった。本研究では、この問題をデバイス設計によって克服することを目指した。

励起光として、波長 400nm 付近、および将来的なポンプ光量増大への対応を考慮し、材料として短波長域で光損傷耐性の高い Mg:SLT [ストイキオメトリックリチウムタンタレート] を選択した。Mg:SLT におけるシミュレーションの結果、時間的ウォークオフと空間的ウォークオフの間にトレードオフがあり、デバイス構造に工夫を要することが分かった。

これを解決する手段として、本研究では、励起光を複数回反射させることで、光子対および励起光の群速度分散を補償する方法について検討した。そのためには、厚さ $150\mu\text{m}$ の薄膜 SLT デバイスを、その分極反転構造の終端位置を精密制御しながら作成する必要があった。

図 2 に、金属電極を用いた電界印加定面積分極反転法により周期 $8.55\mu\text{m}$ の周期分極反転構造を形成した Mg:SLT デバイスを示す。均一な分極反転構造が得られていることはエッチング像から確認した。また群速度分散デバイスの薄片化に取り組み、デバイス厚さ $150\mu\text{m}$ で面内厚さ精度 1% 以下の研磨・加工技術を開発した。図 2 はこの精密研磨技術を用いて、研磨時の終端位置を精密制御した例である。異なるドメインの位置で終端することで、複数回反射の際の第二高調波もしくは発生する光子対の位相制御を可能にしている。それぞれ出射光の位相が $(2/4)\pi$ 、 $(3/4)\pi$ 、 $(4/4)\pi$ の場合に相当している。この技術により多重反射の際の位相ずれを抑制できた。また、機械的強度を強化するモジュールを同時に開発し、超低分散光子対発生モジュールを実現できた。

このモジュールをチタンサファイアレーザーを用いて評価した。非線形過程としては、光子対発生逆過程である第二高調波発生 (SHG) のプロセスにより、波長 420nm の発生を確認した。

また、作成されたモジュールを用いて、パラメトリック下方変換光子対の生成を行い、

光子対と思われる蛍光の観察に成功した。

(4) 線形光学量子回路の実現

良質な PDC 光源を利用して、ゲートを組み合わせた光量子回路の実現を目指した。その結果、入力された 2 光子に対して特定の偏光相関成分だけを抜き出す「量子もつれフィルター」の実現した。この光量子回路の理論は、代表者自身らによって 2002 年に *Physical Review Letter* に提案していたが、4 つの 2 光子干渉、4 つの経路干渉を含む複雑な構成で合ったため、実現は非常に困難と考えられた。今回、本研究で開発した良質な 2 光子干渉性をもつ PDC 光源、および、独自に発案した部分偏光ビームスプリッター、変形サニャック干渉計などを組み合わせることで、その実現に成功した。本成果は、光子を用いた量子情報処理が、電子情報処理にたとえると、トランジスタなどの個々の素子の研究から一歩進み、ラジオなど機能をもった回路の研究に踏み出したことを象徴する成果として、米国科学雑誌 *Science* にニュースとともに掲載されると共に、国内外で広く報道された。

さらに、2001 年に Knill, Laframme, および Milburn (KLM) によって提唱された、線形光学量子計算の第一ステップとなる、制御ノットゲートの実現に成功した。KLM は、*Nature* に 2001 年に発表した論文中で次の事を明らかにした。

(a) 半透鏡における、補助光子と入力光子間での多光子量子干渉を利用することで、「成功信号」が出力された場合には、入力信号の光子数に対して非線形的な位相シフトを生じさせる「非線形位相シフトゲート(NS ゲート)」が実現できる。

(b) この NS ゲートを 2 つ組み合わせることで、制御ノット (C-NOT) ゲートが実現できる。

(c) このゲートは、16 回に 1 回しか「成功」しないが、この成功確率を、量子テレポーテーションと組み合わせることで、理論的には 1 に近づけられる。

それまでも、研究代表者らも線形光学素子を用いた量子アルゴリズムの実現を提案、実現 (*Phys. Rev. A*) していたが、量子ビットの増大に伴い、必要とする光路の数が指数関数的に増えるという問題があった。KLM らの提案は、この問題を解決し、線形光学素子に、単一光子源、および光子数検出器を組み合わせることで原理的に光子を用いた量子計算が実現できることを示す物として、これまでに 2000 近くの引用を受けるなど、画期的な提案で合った。

しかし、これまでに、NS ゲートはその作用の一部が検証されているがその完全な動作確認には至って織らず、KLM の C-NOT

ゲートに至っては、4 つの 2 光子干渉、4 つの経路干渉の安定化などの困難さから、実現されていなかった。

今回、本研究で得た高い 2 光子干渉性をもつ光子源を活用、また 3 種類の部分偏光ビームスプリッターや、変形サニャック干渉計などを組み合わせることで、今回初めて、KLM の提案した C-NOT ゲートの実現に成功した。本研究は、米国科学アカデミー紀要に採択され、近日掲載予定である。

なお、この項目の研究は、本研究の研究代表者、連携研究者の他、英国ブリストル大学のオプライアン・ジェレミー教授、広島大学のホフマン・ホルガー准教授、北海道大学の笹木敬司教授らとの共同研究として行われた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- (1) R. Okamoto, J. L. O'Brien, H. F. Hofmann, and S. Takeuchi, "Realization of a photonic quantum circuit combining effective optical nonlinearities into a Knill-Laflamme-Milburn C-NOT gate", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, (in press) (2011), 査読有
- (2) 栗村直, 「分極反転による波長変換デバイス」, *光アライアンス*, 21(6), pp. 6-9, (2010. 6), 査読有
- (3) T. Nagata, R. Okamoto, H. F. Hofmann, and S. Takeuchi, "Analysis of experimental error sources in a linear-optics quantum gate", *New Journal of Physics*, vol. 12 pp. 43053-1-43053-17, (2010. 4), 査読有
- (4) R. Okamoto, J. L. O'Brien, H. F. Hofmann, T. Nagata, K. Sasaki and S. Takeuchi, "An Entanglement Filter", *Science International*, vol. 323, pp. 483-485, (2009. 1), 査読有
- (5) D. Kawase, Y. Miyamoto, M. Takeda, K. Sasaki, and S. Takeuchi, "Observing Quantum Correlation of Photons in Laguerre-Gauss Modes Using the Gouy Phase", *Physical Review Letters*, vol. 101, pp. 050501-1-050501-4, (2008. 8), 査読有

[学会発表] (計 147 件)

- (1) S. Takeuchi, R. Okamoto, M. Fujiwara, H. Q. Zhao, H. Takashima, A. Tanaka, H. F. Hofmann, J. L. O'Brien, "Optical

quantum circuit combining tailored optical nonlinearities”, SPIE Photonics west 2011, The Moscone Center, (2011.1.26), Invited.

- (2) 竹内繁樹、「光子を操るー光量子回路の実現とその未来」、第71回応用物理学学会学術講演会特別シンポジウム「レーザー50周年」、長崎大学文教キャンパス、(2010.9.15)。
- (3) S. Takeuchi, “Photonic quantum circuits and its application”, Quantum2010 5th Workshop ad memoriam of Carlo Novero Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons / 3rd Italian Quantum information Science Conference IQIS 2010, I. N. RI. M. Conference Hall(formerly IEN Galileo Ferraris), (2010.5.24), Invited.
- (4) 栗村直, 「多極展開する分極反転非線形光学」、日本学術会議公開シンポジウム「先端フォトニクスの展望」, はーといん乃木坂, 東京都, 日本 (2010.4.9).
- (5) S. Takeuchi, “Realization of optical quantum circuits - an entanglement filter -”, 18th INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP (LPHYS'09), World Trade Center Barcelona, (2009.7.13), Invited.

[図書] (計3件)

- (1) 竹内繁樹、エヌ・ティー・エス、「第2編応用編 第1節 量子情報通信・処理の実現に向けた高効率固体量子位相ゲート」、2010, 440
- (2) 竹内繁樹、強光子場科学研究懇談会 発行、「I-1-6 光量子回路の現状と展望」、2010, 272, p.14
- (3) 竹内繁樹、オプトロニクス社、「線形光学素子を用いた量子計算ーそのしくみと最新状況ー」、2009, 528, pp.386-397

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称：テーパー光ファイバ
発明者：竹内繁樹
権利者：国立大学法人北海道大学
種類：特許
番号：特願 2009-28429
出願年月日：21年2月10日
国内外の別：国内

名称：テーパー光ファイバ
発明者：竹内繁樹
権利者：国立大学法人北海道大学

種類：特許
番号：特願 2010-015814
出願年月日：22年1月27日
国内外の別：国内

[その他]

(1) 報道関連

- ① 竹内繁樹、大和エイドリアン賞、(2010.12)
- ② 岡本亮、第4回日本物理学会若手奨励賞、(2010)
- ③ 竹内繁樹、第6回日本学術振興会賞、(2010.3)

(2) ホームページ等

www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qip/index.html

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
竹内 繁樹 (TAKEUCHI SHIGEKI)
北海道大学・電子科学研究所・教授
研究者番号：80321959
- (2) 研究分担者
栗村 直 (KURIMURA SUNAO)
独立行政法人 物質・材料研究機構・光科学センター・主任研究員
研究者番号：10287964
- (3) 連携研究者
岡本 亮 (OKAMOTO RYO)
北海道大学・電子科学研究所・助教
研究者番号：10435951