

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01815

研究課題名(和文) 光子の繰り返し発生と操作による決定論的光子数操作と量子計算

研究課題名(英文) Repetition of photon generation and manipulation process for deterministic photon-number manipulation and quantum computing

研究代表者

金田 文寛 (Kaneda, Fumihiro)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：80822478

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はこれまで効率が低かった量子光状態の発生や操作技術を成功できるまで繰り返し実行して疑似決定論的な技術へと高度化することを目標として研究を実施した。リング型量子メモリを利用した世界最高効率の単一光子発生の実証や、伝令付き単一光子源の純粋度改善手法の実証、そしてリング型量子メモリによる光子の保持時間の延長を実証することができた。当初最終目標としていた光子数操作や量子計算の実証実験は実施できなかったものの、以上の研究内容によって光子の発生や操作技術の大きな向上が実証されており、同様の研究方針で研究を継続していくことで、近い将来、実証実験が可能になると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、本質的に低効率であった量子光状態の発生技術を繰り返し実行し、発生効率を增強する仕組みを実証した。特に、量子情報処理における最も基本的な情報担体の一つである、単一光子状態の世界最高効率での発生技術が実証され、さらに疑似決定論的な発生への展望が示された。さらに、単一光子のみならず、より一般的な光子数状態や量子もつれ状態の高効率発生へ向けた基礎技術が実証されており、これらの成果は将来の量子技術の実現に貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：The scope of the study is to make efficient generation and manipulation of quantum state of light from inefficient processes and components, using repeated process, or time multiplexing. We demonstrated the highest single-photon generation via time-multiplexing technique. Also, we developed a highly pure heralded single-photon source and low-loss, long-life-time optical quantum memories. Our developed techniques and devices will largely improve the efficiency and precision in generation and manipulation of quantum states of light, and will be key components in large-scale single-photon based quantum computing and arbitrary photon number manipulation.

研究分野：量子光学

キーワード：光子 量子情報 量子光学

1. 研究開始当初の背景

量子情報処理及び量子計測の分野は、その学問が発生して以来、光子を用いた原理検証実験によって非常に大きく発展した。また、光子により検証された思考実験や古典論的直感に反する問題の検証に光子が使用された例は枚挙に暇がない。しかし、これまで使用されてきた光子発生源や操作・測定方法は確率的な動作に終わっていたため、量子情報処理や計測の拡張性が大きく制限されている。例えば、2018年に中国にて行われた12光子同時生成実験における成功事象はわずか1時間に数回程度しか起こらず、既存の手法による光子数の拡張は限界に達しつつある。今後、光子を原理検証の役割を超えて実用的に使用するためには決定論的な動作が可能なデバイスの開発が必須である。具体的には、量子光学システムが、1. 量子力学的に高い純粋度かつ光子数の揺らぎなしに光子の発生や操作を実行すること、2. 一度失ってしまうと取り戻すことができない光子を低損失に操作すること、3. 光子の操作回数が増加しても光学系が物理的に大きくならないような拡張性をもつこと、を満たすことが必要とされている。しかし、既存の技術はこれらの要求を全て満たすことはない。例えば、代表的な光子発生方法の一つである自発パラメトリック下方変換(SPDC)では低損失な一方で、発生確率が低く、光子数に揺らぎをもつ。最近注目されている集積化光学素子では拡張性は高いが損失が大きい、という問題を抱えている。

2. 研究の目的

以上の背景を鑑みて、本研究では弱く励起されたSPDCや、低損失な光量子メモリ内を組み合わせ、低確率な光子の発生・操作を成功するまで繰り返し実行できる機構を開発し、擬似決定論的な光子数操作や多数の単一光子の同時発生や量子計算を実行する装置・技術を実現することを目的として研究を実施した。光子発生の利得を弱くすれば当然発生・操作効率が低下してしまうが、同時に光子数の揺らぎ(の絶対値)も低減される。そこで光子を低損失な光量子メモリに閉じ込めておきながら、低利得な発生・増幅を繰り返し実行することで、低光子数雑音かつ決定論的な発生・操作が可能となる。また、本研究で提案する量子計算法は1つの干渉計をメモリに接続することで繰り返し利用し、実効的に多数干渉計による光量子回路が実装可能となる。したがって、本研究はこれまでの課題であった光学損失、光子数雑音、そして実験系の拡張性の問題を一挙に解決する研究手法となる。この繰り返し発生・操作方法は、現在量子計算媒体の有力候補であるトラップされたイオンや超伝導回路が必要な量子の数だけトラップや回路素子が必要な点と比較しても特徴的な点である。また本研究課題により、光の「光子数」の自由度における自在な状態操作が可能になることで、様々な光応用技術への「量子性」の波及が期待される。例えば、イメージング技術の改善や生体と光子の相互作用の直接観測など、既存技術への量子性の付加や従来観測が困難であった量子効果観測用のプローブとして使用可能となる。

3. 研究の方法

本研究期間では以下の方法、項目を実施した。

(1) SPDCとリング型量子メモリによる時間多重化伝令付き単一光子の実証

まず、本研究の繰り返し発生の有用性を実証すべく、SPDCによって発生する伝令付き単一光子を量子メモリに保存し、発生時間を多重化する単一光子発生実験をイリノイ大学のPaul Kwiat教授の研究グループとの共同研究によって行った。伝令付き単一光子はSPDCによって発生する光子のペアのうち、1光子を検出することで、同時発生するもう一方の光子の発生が伝令、確認される光子発生手法である。ただし、前述の通り、SPDCの成功確率は励起パルスあたり、1-10%程度と低い。リング型量子メモリは内部に電気光学スイッチを含む光リングであり、入力される光子を内部で任意回数周回させ、保持、遅延できるデバイスである。このメモリは既存の固体や原子系の量子メモリと比較して、低挿入損失(一周あたり1.2%)で広帯域(>10 THz)な光子を保存できる利点がある。リング周回時間をSPDCの励起パルス間隔と一致させることで、リング型メモリは励起パルス間隔の整数倍の遅延を実行する。そして、数十程度の連続したSPDC励起パルスのうち、どのパルスから伝令付き単一光子が発生しても、メモリによる適応的な遅延によって、一定の時間モードに単一光子が出力される。この時間多重化により、数十の励起イベントが単一の時間モードに集中するため、疑似決定論的な単一光子発生が可能となる。本手法は提案する光子数操作や量子計算における基本原理でもあり、有効性が実証されれば、本研究全体の意義が示されることとなる。一方で、この原理検証実験に使用したプロトタイプSPDC光源やメモリは本研究の最終的な目標である光子数操作や量子計算には性能が不十分であったため、以下の項目(2)(3)で要求される性能の改善や機能の実現に向けたさらなるデバイス開発を実施した。

(2) SPDC光源の開発

項目(1)で使用したSPDC光源では伝令付き単一光子の純粋度が90%程度であり、数光子程度の

発生や操作までしか量子性を示すことができない。そこで本研究では、SPDC を発生する非線形光学結晶の分極構造の変調をすることで、光子のペアの無損失な波形整形と、純粋度の改善に取り組んだ。分極構造を変調することで結晶内部での局所的な非線形性(光子の発生効率)を制御することが可能となり、光子の波形整形が可能となる。本研究では非線形性の分布をガウス型に近似することで純粋度の改善を狙った。また、光子のペアの周波数相関を高精度に測定する手法として、SPDC の逆過程である和周波発生を用いた手法を提案し、その実証実験を行った。

(3) リング型量子メモリの開発

本研究の光子を保持しながら繰り返し操作を実施する仕組みの実現には量子メモリによって低損失かつ多数の光子を保持する必要がある。項目(1)で使用したメモリの周回時間を大きく拡張する必要がある。そこで本研究ではリング内に 200 m の光ファイバーを導入し、周回時間を 12.5 ns から 1000 ns(80 倍)に拡張したメモリの開発を行った。さらに、複数の周回時間が異なるリング型メモリ(12.5 ns と 1000 ns のリング)を組み合わせることで、遅延の単位時間(12.5 ns)を維持しながら保持時間を延長する手法を提案し、その実証実験を行った。さらに光ファイバーを導入したメモリ開発の過程で、電気光学スイッチの消光比が大幅に向上する現象を観測したため、その詳細な検証と解析を実施した。

研究期間内で実施した内容は以上であり、当初最終目標としていた光子数操作や量子計算の実証実験は実施できなかった。その原因としては、研究期間に新型コロナウイルス蔓延のために研究活動が一時的に停止してしまったことや、必要機器の入手が困難となってしまったことが挙げられる。しかし後述するように、以上の研究内容によって光子の発生や操作技術の大きく向上が実証されており、本研究の方針で研究を継続していくことで近い将来、実証実験が可能になると考えられる。

4. 研究成果

本研究での成果を以下に示す。

(1) SPDC とリング型量子メモリによる時間多重化伝令付き単一光子の実証

本実験では、最大 40 の励起パルス量子メモリによって多重化し、波長 1590 nm に発生する伝令付き単一光子の発生確率の向上を検証した。その結果、世界最高となる 67% の確率で単一光子が発生されていることが観測された。この成果により、本研究の繰り返し発生や操作の有用性が示された。また、多重化後の伝令付き単一光子の 2 光子干渉実験を実施したところ、多重化前と比較して干渉性が維持されていることが観測され、多重化後も伝令付き単一光子の純粋度が維持されていることが示された。したがって、開発した多重化単一光子源は光子の量子性を維持しながら発生確率の増強を達成していることが実証された。一方で、最大の単一光子発生確率を達成するためには、励起パルスあたりの光子のペア発生確率を 13% まで上げなければならず、そのために不要な 2 光子発生確率も約 8% 存在すると推定される。2 光子発生を抑制するためには、SPDC やメモリでの損失改善だけでなく、伝令信号発生のための光子検出器で高精度な光子数分解が必要となることが判明し、今後の研究のための重要な知見となった。

(2) SPDC 光源の開発

実験では、設計したガウス型に近似された非線形性プロファイルを持つ結晶と、一定の分極反転周期をもつ空間的に一定の非線形性をもつ結晶から発生する SPDC 光子ペアのスペクトル分布を測定し、比較した。その結果、本研究で開発した結晶では、一定周期の結晶を使用する場合に現れる sinc 型の周期的なピークが大きく抑制(> 8 dB)されるとともに、ピーク同士のスペクトル間隔が広がっていることが観測された。また、2 次の相関関数によって純粋度を直接測定したところ、一定周期の分極反転結晶では 82% であったのに対し、開発した結晶では 96% と大きく向上していた。さらに、適切な周波数フィルターを用いれば、主要ピークをほぼ無損失に透過させながら、不要なピークを除去できることも判明し、そのとき純粋度は 99% 以上となることがわかった。また、光子のペアの周波数相関測定として新たに開発した和周波発生による手法はこれまで利用されてきた光子のペアの同時検出に基づく手法よりも周波数分解能とシグナル・ノイズ比において優れていることが実証され、今後の SPDC 光源開発を優位に進められる技術となることが示された。

(3) リング型量子メモリの開発

まず、光ファイバーを導入したリング型メモリの開発では、光学系を構築し、リングダウン測定を実施した。その結果、1 周(1 μ s)あたり 11% の損失があり、保存時間は約 9 μ s であった。また、自由空間光学素子のみを使用したリング型メモリでも改善を実施し、1 周(12.5 ns)あたりの損失は 0.6% まで低減した(保存時間は 2 μ s)。光ファイバーを組み込んだメモリでの主な損失の要因は自由空間-ファイバー結合損失と、長さ調整のために実施したファイバー融着による損失である(～8%)。これらの問題は、今後集光光学系の見直しや融着のパラメータの最適化によって改善できるものと考えられる。開発したメモリはまだ大きな改善の余地がある一方で、本研究では、2 つのメモリを連結して使用すれば、自由空間メモリの遅延の単位時間(12.5 ns)を維

持ちながらファイバーを組み込んだメモリの保持時間(9 μ s)まで光子を保持できることを新たに見出し、それを実証することができた。これは700程度の光子の時間モードを同期できるものとなっており、光子数操作や光子を用いた量子計算の実現のための重要技術となることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kaneda Fumihito, Oikawa Jo, Yabuno Masahiro, China Fumihito, Miki Shigehito, Terai Hirotaka, Mitsumori Yasuyoshi, Edamatsu Keiichi	4. 巻 28
2. 論文標題 Spectral characterization of photon-pair sources via classical sum-frequency generation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 38993 ~ 38993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.412448	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kaneda F., Kwiat P. G.	4. 巻 5
2. 論文標題 High-efficiency single-photon generation via large-scale active time multiplexing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaaw8586
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aaw8586	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 董庭瑞, Binho Le, Soyoun Baek, 金田文寛, 枝松圭一
2. 発表標題 Experimental variable strength measurement using quantum computers
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Pengfei Wang, Keiichi Edamatsu, Fumihito Kaneda
2. 発表標題 Electro-optic switch toward polarization-independent single-photon routing
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumihiro Kaneda
2. 発表標題 Pure single-photon generation using a domain-engineered nonlinear optical crystal
3. 学会等名 FRIS/TI-FRIS annual meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田文寛
2. 発表標題 時間多重化による量子光源の研究
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田文寛
2. 発表標題 小さな光子の積み重ね：多重化光子源
3. 学会等名 FRIS Hub meeting
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumihiro Kaneda, Jo Oikawa, Yasuyoshi Mitsumori, Keiichi Edamatsu
2. 発表標題 High-Precision Spectral Measurements of Photon-Pair Sources via Frequency-Resolved Sum-Frequency generation
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金井天馬, 三森康義, 枝松圭一, 金田文寛
2. 発表標題 空間モードフィルタリングによる高精度電気光学スイッチ
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金田文寛
2. 発表標題 時間多重化伝令付き単一光子および多光子源
3. 学会等名 量子情報技術研究会 (QIT) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金田文寛
2. 発表標題 高効率単一光子源, 量子もつれ, 不確定性関係の研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金井天馬, 三森康義, 枝松圭一, 金田文寛
2. 発表標題 光ファイバーを用いた長周期リング型量子メモリの開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 及川 憧, 三森 康義, 枝松 圭一, 金田 文寛
2. 発表標題 変調された周期分極反転結晶による周波数不可識別伝令付き単一光子対源の開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Soyoung Baek, Fumihiro Kaneda, Yasuyoshi Mitsumori, Keiichi Edamatsu
2. 発表標題 Study of momentum and position entanglement between photon pairs generated from parametric down-conversion
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumihiro Kaneda, Paul Kwiat
2. 発表標題 Time multiplexing for high-efficiency single-photon generation
3. 学会等名 The 2nd International Forum on Quantum Measurements and Sensing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Colin P. Lualdi, Fumihiro Kaneda, Joseph C. Chapman, Paul G. Kwiat
2. 発表標題 High-Efficiency Time-Multiplexed Single-Photon Source
3. 学会等名 Single photon workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fumihiro Kaneda, Jo Oikawa, Yasuyoshi Mitsumori, Keiichi Edamatsu
2. 発表標題 High-precision characterization of quantum optical resources via classical measurements
3. 学会等名 The 2nd International Forum on Quantum Measurements and Sensing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 及川 瞳, 金田 文寛, 三森 康義, 枝松 圭一
2. 発表標題 自発パラメトリック下方変換光子対の高精度位相整合スペクトル評価方法の開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 及川 瞳, 金田 文寛, 三森 康義, 枝松 圭一
2. 発表標題 和周波発生を用いた光子対源の高精度スペクトル特性評価
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 金田文寛, 清水亮介	4. 発行年 2021年
2. 出版社 NTS出版	5. 総ページ数 364
3. 書名 量子センシングハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------