

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13483

研究課題名（和文）非線形光学の自在制御による大規模量子情報処理

研究課題名（英文）Large scale quantum information processing based on nonlinear optical interaction

研究代表者

生田 力三（Ikuta, Rikizo）

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：90626475

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：光源開発として、光パラメトリック下方変換による周波数多重化光子対の生成を行った。独自に設計した単共鳴共振器を用いることで大幅な広帯域化に成功し、1000重モード以上の周波数多重化光子対生成を実証した。また、この光源に偏光エンタングルメントを付与することで、大規模なハイパーエンタングルメント生成にも成功した。量子操作に関する研究として、単共鳴型の共振器を用いることで、共振器によって帯域を制限されることなく、光周波数変換効率を増強することに成功した。本周波数変換器は、周波数軸上での回転操作のほか、偏光状態の制御やハイパーエンタングルメント制御にも広く適用できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

古典的な多重化にとどまらず、周波数モード間にコヒーレンスをもつ量子周波数コム的大幅な広帯域化に成功した本研究成果は、光量子情報の大規模化に大きく貢献するものである。また、偏光と合わせることでハイパーエンタングルメントの生成にも成功しており、今後様々な応用が期待できる。帯域を制限しない光周波数変換の増強の実現により、状態生成のみならず状態制御の面でも貢献できたと考えている。本研究では、状態生成、制御ともに単共鳴光共振器を利用したが、この構成の共振器はこれまで研究事例が少ない。本デバイスは、どの周波数モードを共鳴・非共鳴にするかで大きく機能を変えることができ、学術的にも興味深い構造をしている。

研究成果の概要（英文）：As a light source development, we performed a frequency-multiplexed photon pair generation based on spontaneous parametric downconversion. By using a newly-developed singly-resonant cavity, we have succeeded in the bandwidth broadening, and have demonstrated frequency-multiplexed photon pair generation over 1000 modes. By adding polarization entanglement to this photon pairs, we generated a large-scale hyper entanglement. As another experiment by using a singly-resonant cavity, we have succeeded in enhancement of the optical frequency conversion efficiency without any bandwidth limitation. This frequency converter can be widely applied to the control of polarization state and hyper entanglement as well as the rotation operation on the frequency modes.

研究分野：量子情報、量子光学

キーワード：量子情報 量子エレクトロニクス 量子周波数コム パラメトリック下方変換 周波数多重 導波路共振器 波長変換 光量子計算

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

量子情報処理では、状態準備は光パラメトリック下方変換(SPDC)、量子操作は線形光学と事後選択操作、といったように確率操作を前提とした実験がほとんどであるが、スケーラブルな量子情報処理実現のためにはこうした確率動作を決定論的なものに近づける/置き換えていく必要がある。我々は、これまで量子周波数変換に基づく周波数自由度量子情報処理の研究を行ってきており、周波数が大規模な空間構造を自然に有していること、周波数に基づく光量子状態への非線形操作が光の周波数変換にそのまま対応すること、光周波数が最も精度よく計測可能な物理量であること、などの理由から、周波数がスケーラブルな量子情報にとって非常に良い自由度の候補になるのではないかと考えていた。また、我々が開発した 2 次の非線形光学と光共振器を一体化させた光周波数コム生成器が量子周波数コムと呼ばれる大規模光周波数量子状態生成と非常に相性が良いことから、この構造をうまく量子情報に活かすことで、大規模に周波数多重化された光子を容易かつ効率的に生成できる新しい光源ができるのではないかと考えていた。

### 2. 研究の目的

本研究は、共振器により増強された非常に強い 2 次の非線形光学効果を駆使することで、状態準備、状態操作どちらの面でも従来の成功確率を大幅に向上させる方式を提案・実装し、光による大規模量子情報処理の基礎を築くことを目的とした。より具体的には、

- (A) 1000 重モード以上の大規模に周波数多重化された光子源の実現
  - (B) 他の自由度を同時に制御することによる周波数コム上のハイパーエンタングル状態の実現
  - (C) 周波数軸上の回転素子としての高効率波長変換器の実現
  - (D) 回転操作に伴う幾何学的位相を利用した非線形量子操作の実現
- を目指して研究を行った。

### 3. 研究の方法

利用する物理過程は 2 次の非線形光学であるため、関与する光は 3 本である。目的で述べた(A)から(D)全てにおいて、3 本のうち 1 本のみを光共振器に閉じ込め、残り 2 本は閉じ込めない構造をもつ単共鳴型共振器を設計し、この共振器内部に非線形光学素子を埋め込んだ非線形光学導波路共振器を用いた。具体的には、2 次の非線形光学素子である PPLN 導波路の両端に、1560nm より長波長の通信波長帯に対しては高反射率、1560nm より短波長の通信波長および 780nm 近辺の波長に対しては低反射率となるような誘電体多層膜コーティングを施すことで、一体型の導波路共振器を構成し、実験を行った。

(A) 780nm を励起光とする SPDC では、生成される光子対のうち 1560nm より長波長のシグナル光には共鳴構造がなく、より短波長のアイドラ光にのみ共鳴構造がある状況となる。興味深いことに、エネルギー保存則によってアイドラ光の共鳴構造によってシグナル光にもクシ状構造が現れるが、実際にはシグナル光には共鳴構造がないため、多重共鳴共振器を用いた場合に見られるような光子対抑制効果が現れず(クラスター効果) 広帯域での周波数多重化光子対生成が可能となるはずである。

(B) PPLN 素子には偏光依存性がある。(A)において垂直偏光の光子を生成する配置にしていたとき、この装置をサニャック干渉回路内部に導入することで、コム状スペクトルをもつ偏光エンタングル光子対が生成されることとなる。このとき、周波数モード間にコヒーレンスがあると、偏光と周波数の角自由度でエンタングルメントを持つハイパーエンタングル状態が実現できる。サニャック干渉回路は位相安定であるだけでなく、偏光制御のために使用する装置が 1 個の導波路共振器で済むため、水平垂直偏光の光子が完全に一致したスペクトルをもつという特徴をもつ。

(C) 波長変換による回転操作では、1600nm 付近の光を励起光とする。これにより、波長変換の対象となる光子には共鳴構造がなく、励起光のみを閉じ込めた波長変換が実現できる。通常、多重共鳴共振器を用いた場合には共振器による増強効果と共に帯域の激減といった副作用が生じるが、単共鳴構造の場合は光子を一切閉じ込めないでそのような心配がない。20mm の PPLN の場合帯域が 100GHz 以上あるため、周波数に符号化された光子の情報を大量に詰め込むことが可能となる。共振構造がなければ周波数を基底とするプロット球の 1 回転操作にはワットレベルの励起光パワーが必要であるが、共振器構造によって大幅な低パワー励起が可能となる。

(D) PPLN 素子をもつ偏光依存性と位相整合による周波数依存性を利用すると、特定の偏光と特定の周波数のときのみ周波数変換操作を実行することができる。周波数モードの 1 回転操作に伴う幾何学的位相によってマイナス 1 の位相がつくため、うまく状態空間を選ぶことでコントロール NOT ゲートとして利用することができる。

### 4. 研究成果

(A) 実験では、1520 - 1600nm に渡り、1000 モード以上の周波数多重光子対の生成が確認できた。また、光子の同時計数測定に基づくビート測定により、周波数モード間の位相がよく定まっていることが確認できた。この結果は、生成された光子対が単なる古典的な周波数多重化状態にとどまらず、周波数モード間にコヒーレンスがある量子周波数コム状態であることを示唆している。本研究成果は PRL(2019)に掲載された。

(B) (A)で実現した量子周波数コム上に偏光エンタングルメントを付与することで、偏光と周波数のハイパーエンタングル状態を生成した。周波数モードはやはり 1000 モードを上回っており、非常に大規模なエンタングル状態が生成できていることが確認できた。論文準備中である。

(C) 通常の 20mm の PPLN 導波路では、最大変換効率を得るために 500mW 以上の励起光パワーを必要とする。しかし、共振器による増強効果により約 10 倍の低パワー化を達成した。より高パワーの励起光を入力することで、周波数変換後の再変換によって元の波長に戻ってくることを確認し、この周波数軸上の回転操作を行えるだけの強い非線形性が実現できていることを確かめた。本成果は現在論文準備中である。

(D) 水平偏光と垂直偏光の重ね合わせ状態を導波路共振器に入力し、垂直偏光の光の周波数変換を通して光の状態がどのように変化するかを追跡した。その結果、周波数の再変換によって幾何学的位相がつき、結果として入力偏光状態に対して直交した状態が出力されることを実験的に確かめた。本実験はレーザー光を用いて行なったが、入力光を周波数と偏光からなる適切な量子状態にすることで、ベル状態の生成やベル測定、多体エンタングルメントの生成など、様々な非線形な量子操作に応用できることを理論的に示した。本成果は論文準備中である。

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 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Rikizo Ikuta, Ryoya Tani, Masahiro Ishizaki, Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Hiroataka Terai, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto	4. 巻 123
2. 論文標題 Frequency-Multiplexed Photon Pairs Over 1000 Modes from a Quadratic Nonlinear Optical Waveguide Resonator with a Singly Resonant Configuration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 193603
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.123.193603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koichiro Miyanishi, Yoshiaki Tsujimoto, Rikizo Ikuta, Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Taro Yamashita, Hiroataka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto	4. 巻 6
2. 論文標題 Robust entanglement distribution via telecom fibre assisted by an asynchronous counter-propagating laser light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41534-020-0273-5	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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 2件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 山崎 友裕, 生田 力三, 小林 俊輝, 三木 茂人, 藪野 正裕, 寺井 弘高, 井元 信之, 山本 俊
2. 発表標題 単共鳴共振器型PPLN導波路による偏光エンタングル光子対生成
3. 学会等名 2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生田 力三, 小林 俊輝, 山崎 友裕, 井元 信之, 山本 俊
2. 発表標題 単共鳴共振器型PPLN導波路による高効率光波長変換
3. 学会等名 2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎 友裕, 生田 力三, 小林 俊輝, 三木 茂人, 藪野 正裕, 寺井 弘高, 井元 信之, 山本 俊
2. 発表標題 周波数多重化された偏光エンタングル光子対の生成
3. 学会等名 ハイブリッド量子科学第9回領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生田力三
2. 発表標題 量子光中継技術の概要と最新動向
3. 学会等名 2019年度第1回光材料・応用技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎友裕, 生田力三, 小林俊輝, 三木茂人, 藪野正裕, 寺井弘高, 井元信之, 山本俊
2. 発表標題 周波数多重化された偏光エンタングル光子対の生成
3. 学会等名 第16回AMO討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Yamazaki, Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Hirotaka Terai, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Frequency Multiplexing of Polarization-Entangled Photon Pairs without External Filtering
3. 学会等名 International Symposium for Nano Science(ISNS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Yamazaki, Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Hirotaka Terai, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Frequency-multiplexed polarization-entangled photon pairs generated by cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019(ISNTT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta, Ryoya Tani, Masahiro Ishizaki, Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Hirotaka Terai, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Frequency-multiplexed singly-resonant photon pairs from quadratic nonlinear optical waveguide resonator
3. 学会等名 Cleo/Europe-EQEC (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生田力三
2. 発表標題 量子状態を保持した単一光子波長変換に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生田力三, 谷亮矢, 石崎理裕, 三木茂人, 藪野正裕, 寺井弘高, 山本俊, 井元信之
2. 発表標題 単共鳴共振器型PPLN導波路による光子対生成
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta
2. 発表標題 Frequency comb generation in a quadratic nonlinear waveguide resonator
3. 学会等名 SPIE Photonic West (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生田力三, 浅野元紀, 谷亮矢, 山本俊, 井元信之
2. 発表標題 PPLN導波路共振器による光周波数コム生成
3. 学会等名 ハイブリッド量子科学第8回領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta
2. 発表標題 Frequency comb generation by a PPLN waveguide resonator
3. 学会等名 International Workshop on Hybrid Quantum Systems
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 生田力三, 小林俊輝, 川上哲生, 三木茂人, 藪野正裕, 山下太郎, 寺井弘高, 小芦雅斗, 向井哲哉, 山本俊, 井元信之
2. 発表標題 偏光無依存型量子波長変換器による原子と通信波長光子間のエンタングルメント生成
3. 学会等名 ハイブリッド量子科学第7回領域会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 生田力三, 小林俊輝, 川上哲生, 三木茂人, 藪野正裕, 山下太郎, 寺井弘高, 小芦雅斗, 向井哲哉, 山本俊, 井元信之
2. 発表標題 Polarization insensitive frequency conversion for an atom-photon entanglement distribution via a telecom network
3. 学会等名 第38回量子情報技術研究会 (QIT38)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Tetsuo Kawakami, Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Masato Koashi, Tetsuya Mukai, Takashi Yamamoto, Nobuyuki Imoto
2. 発表標題 Polarization insensitive frequency conversion for an atom-photon entanglement distribution via a telecom network
3. 学会等名 Hybrid Approaches to Quantum-Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----