

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13487

研究課題名（和文）単一光子の非線形光学効果を用いた量子情報処理

研究課題名（英文）Quantum information processing using nonlinear interaction between single photons

研究代表者

遠本 吉朗 (Tsujimoto, Yoshiaki)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所量子ICT先端開発センター・研究員

研究者番号：80807470

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）：単一光子間の非線形光学効果を用いることで、これまでの線形光学素子のみを用いたアプローチでは実現できなかった課題を実現することができる。本研究では、独立に生成した量子もつれ光子対を繋げる操作である量子もつれ交換を、単一光子間の和周波発生(SFG)を用いて行うことを目指して研究を行った。具体的には、高効率に量子もつれ光子対を生成/検出するシステムと、高効率にSFGを誘起するSFGモジュールを新規開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単一光子間の非線形光学効果は光量子情報処理において非常に魅力的なツールである。例えば、量子通信においては装置無依存量子鍵配送を長距離化でき、量子計算においては量子計算機の構成を大幅に簡略化することが可能となる。当該研究期間中に実証実験を行うには至らなかったが、その為に我々が開発した量子もつれ光子対の高効率な生成/検出システムは、成功確率が低い実験や、ロスの大いフィールド実験において有用である。また、今回開発したSFGモジュールは高効率な波長変換デバイスとして応用でき、相互作用波長が異なる物理系をリンクする際に有用である。

研究成果の概要（英文）：Nonlinear interaction between single photons is an interesting tool to realize new quantum information processing which cannot be achieved only by using linear optics. We focus on the entanglement swapping, which is a quantum operation to connect two independently generated entangled photon pairs, via sum frequency generation (SFG) between single photons. Specifically, we developed a new system to efficiently generate and detect entangled photon pairs, and a new SFG system to efficiently induce nonlinear interaction.

研究分野：量子情報

キーワード：量子光学 量子情報 量子通信 量子暗号 非線形光学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

第二高調波発生(SHG)や和周波発生(SFG)などの非線形光学効果は、レーザの波長変換や分光などの様々な分野に応用され多大な成功を収めてきた。量子情報の分野においても、単一光子レベルの非線形光学効果を利用することで、これまでの線形光学素子を用いたアプローチでは極めて困難なタスクを実現するという理論提案が活発になされている。2011年には単一光子間のSFGを利用した量子もつれ交換の理論提案がなされた[1]。通常、量子もつれ交換はパラメトリック下方変換(SPDC)により生成した量子もつれ光子対と線形光学素子を用いて行うのが一般的である。しかし、このアプローチではSPDCが確率的な過程であるために、量子もつれ交換の成功を保証するためには、終状態を測定することで事後選択する必要があり、そのせいで応用の幅が制限されていた。中でも重要なものとして、次世代量子暗号技術とされる装置無依存量子鍵配送(DIQKD)がある。DIQKDは、量子もつれを利用することで光子の生成・測定装置が盗聴者に制御されている状況でも安全に秘密鍵を共有することができる量子鍵配送方式である。DIQKDを実現するためには、終状態を測定することなく質の高い量子もつれ交換を行うことが重要である。理論提案[1]の手法では独立に生成された光子間のSFGを検出することで、終状態を事後選択することなく量子もつれ交換の成功を保証することができ、一つに連結した光子対を引き続き用いることができる。単一光子間のSFGは2014年に初めて報告されたが[2]、効率が低く、現在に至るまで、SFGによる量子もつれ交換は報告されていない。

[1] N. Sangouard *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 120403 (2011).

[2] T. Guerreiro *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 173601 (2014).

2. 研究の目的

本研究では、単一光子の非線形光学効果を高効率に実現する量子インターフェースを開発し、単一光子間のSFGを用いた量子もつれ交換高度化の原理検証実験を目的とする。単一光子間のSFGは、物理的に興味深い現象であるだけでなく、その観測によって質の高い量子もつれ交換の成功を保証することができる非常に魅力的なツールでもある。一方で、単一光子レベルでの非線形光学効果は小さく、SFGによる量子もつれ交換の実現には未だ至っていない。重要となるのは、(1)量子もつれ光子対の高効率な生成・検出システムの確立と、(2)高効率かつ安定なSFGモジュールの開発である。

3. 研究の方法

(1) 量子もつれ光子対の高効率な生成・検出システムの確立

まず、電気光学変調によって連続波レーザを変調して生成した波長 1550nm、繰り返し周波数 3.2GHz のモードロックレーザのSHGによって、SPDCのための波長 775nm の高速な励起光を得た。この励起光を、高効率にSPDCを行うことができる周期分極二オブ酸リチウム導波路(PPLN/W)へ入力することで、繰り返し周波数 3.2GHz、通信波長帯の量子もつれ光子対を生成した。この光子対を超伝導単一光子検出器(SSPD)で検出することで、高い単一光子性を保ったまま、高レートな光子対検出が可能となった。

(2) 高効率かつ安定なSFGモジュールの開発

SFGモジュールは、PPLN/Wをサニャック干渉計へ組み込むことで構成する。SFGモジュールが動作するために重要なことは、入力される二光子に対して「それぞれの光子の偏光状態を測定することなく、二光子の偏光が同じであるか、互いに直交するかを識別する」測定を行うことである。本構成では、両方の光子の偏光が横偏光の時には縦偏光のSFG光子が生成され、両方とも縦偏光の時には横偏光のSFG光子が出力される。したがって、縦偏光と横偏光の重ね合わせである斜め45度偏光のSFG光子を検出した条件の下では、入力光子の偏光が同じであったイベントを選択していることになる。

4. 研究成果

(1) 今回立ち上げた量子もつれ光子対源によって得られた、量子もつれ光子対の検出レートと忠実度の励起パワー依存性を図1に示す。忠実度(F)は0から1までの値をとり、1に近いほど最大量子もつれ状態に近い。また、 $F > 0.5$ の時に量子もつれが存在することが知られている。励起パワーを増加させると、量子もつれ光子対の検出レートは最大で1.4 MHzに達した。一方で、忠実度の低下は小さく、0.89以上という高い値を保っている。この実験結果から、超高効率かつ高品質な偏光エンタングル光子対の生成・検出を実現した。

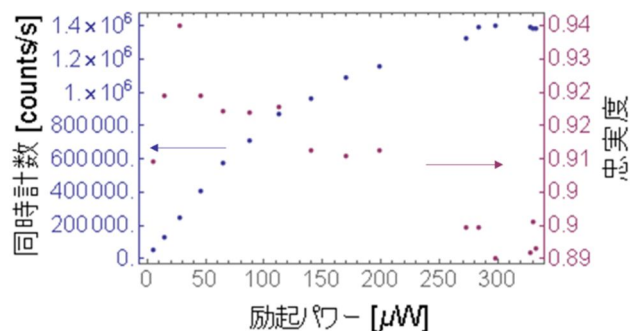


図1. 検出レートと忠実度のパワー依存性

(2) 今回開発したSFGモジュールを図2に示す。構成は、結晶長65mmのPPLN/Wを広帯域偏光ビームスプリッタ、半波長板、ミラーで構成されたサニャック干渉計の内部に配置したものである。PPLN/Wの分極反転周期はSFG(1565.3nm+1560.8nm 781.5nm)の効率が最も高くなるように設計されている。立ち上げたSFGモジュールについて、レーザー光を用いて第二高調波発生の変換効率を推定したところ変換効率は1129 [%/W]となり、高効率なSFGモジュールが開発できた。さらに、(1)の光子対源へ励起光とシグナル光を入力して差周波発生(DFG)を行い、得られたDFG光をSFGモジュールへ79%の効率で結合させることに成功した。単一光子レベルのSFGの観測は次年度中に実施できる見込みである。

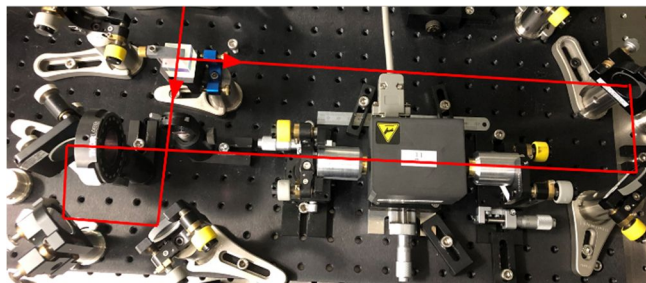


図2. 開発したSFGモジュール

(3) 線形光学素子を使った通常の量子もつれ交換を行った場合について DIQKD の鍵レートの限界を理論と実験の両面から調査した論文を、学術雑誌 New journal of physics に発表した。この研究成果により、線形光学素子を用いた量子もつれ交換では、終状態に対するベル不等式の破れが最大でも2.34程度に留まることが分かった。これは、終状態が最大量子もつれ状態からかけ離れた状態であることに起因する。SFGモジュールによる量子もつれ交換高度化が達成されれば、終状態は最大量子もつれ状態に近い状態となるため、より大きいベル不等式の破れが観測できると予想される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1. 著者名 Tsujiimoto Yoshiaki, Wakui Kentaro, Fujiwara Mikio, Hayasaka Kazuhiro, Miki Shigehito, Terai Hiroataka, Sasaki Masahide, Takeoka Masahiro | 4. 巻 98 |
| 2. 論文標題 Optimal conditions for the Bell test using spontaneous parametric down-conversion sources | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review A | 6. 最初と最後の頁 063842-063842 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.063842 | 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 Tsujiimoto Yoshiaki, You Chenglong, Wakui Kentaro, Fujiwara Mikio, Hayasaka Kazuhiro, Miki Shigehito, Terai Hiroataka, Sasaki Masahide, Dowling Jonathan P, Takeoka Masahiro | 4. 巻 22 |
| 2. 論文標題 Heralded amplification of nonlocality via entanglement swapping | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 New Journal of Physics | 6. 最初と最後の頁 023008 - 023008 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab61da | 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 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1. 著者名 Miyaniishi Koichiro, Tsujiimoto Yoshiaki, Ikuta Rikizo, Miki Shigehito, Yabuno Masahiro, Yamashita Taro, Terai Hiroataka, Yamamoto Takashi, Koashi Masato, Imoto Nobuyuki | 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 44-44 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 遠本吉朗 |
| 2. 発表標題 Optimal conditions for Bell test using spontaneous parametric down-conversion source |
| 3. 学会等名 8th International Conference on Quantum Cryptography (QCrypt 2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|----------------------------------------------|
| 1. 発表者名 達本吉朗 |
| 2. 発表標題 パラメトリック下方変換光子対源を用いたCHSH不等式の破れの最大化 |
| 3. 学会等名 量子情報・物性の新潮流 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 達本吉朗 |
| 2. 発表標題 Optimal conditions for Bell test using a spontaneous parametric down-conversion source |
| 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 達本吉朗 |
| 2. 発表標題 SPDC光子対源を用いたCHSH不等式の破れの最大化 |
| 3. 学会等名 物理学会第73回年次大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 達本吉朗 |
| 2. 発表標題 Optimal conditions for Bell test using spontaneous parametric down-conversion source |
| 3. 学会等名 International Symposium on Quantum Technologies (ISQT2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 達本吉朗 |
| 2. 発表標題 An optimal strategy to recover nonlocality of polarization-entangled state from a SPDC source via entanglement swapping relay |
| 3. 学会等名 CLEO/Europe-EQEC (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 達本吉朗 |
| 2. 発表標題 Heralded amplification of nonlocality via entanglement swapping for long-distance device-independent quantum key distribution |
| 3. 学会等名 第40回量子情報技術研究会 (QIT40) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------------------|
| 1. 発表者名 達本吉朗 |
| 2. 発表標題 Entanglement swappingによる伝令付き非局所性増幅 |
| 3. 学会等名 物理学会第74回年次大会 |
| 4. 発表年 2019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 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|