

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14393

研究課題名(和文)光子対の周波数制御による光量子情報処理の高速化

研究課題名(英文)Accelerating photonic quantum information processing by a spectral modulation of photon pairs

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):本研究では、まずパラメトリック下方変換(SPDC)で生成した光子対の可干渉性に対して(1)励起レーザーの繰り返し周波数、(2)光子検出器の時間分解能の影響を取り入れた理論モデルを構築した。数値シミュレーションを実施した結果、GHzオーダーの繰り返し周波数であっても、光子検出器の時間分解能が高ければ、干渉性の高い光子対が得られることが明らかになった。次に、繰り返し周波数3.2GHzで光子対を独立に2対生成し、それらの間の二光子干渉を観測した。その結果、 0.88 ± 0.03 という古典限界を大きく超える明瞭度が得られ、独立に生成した光子を用いた二光子干渉実験におけるクロックレートの世界記録を更新した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自発的パラメトリック下方変換で生成した量子もつれ光子対は、量子通信の重要なリソースである一方で、高いクロックレートの励起レーザーを用いて生成すると干渉性が劣化するという問題を抱えており、応用の幅が大きく制限されていた。本研究では、この問題を解決し、高い干渉性を有する量子もつれ光子対生成の超高速生成を実現した。

研究成果の概要(英文): In this work, we developed a simple model to consider the influence of the repetition rate of the pump laser and timing jitter of the single photon detectors on the spectral purity, and experimentally demonstrated a high-visibility Hong-Ou-Mandel interference between two independent heralded single photons generated by spontaneous parametric down-conversion with 3.2 GHz-repetition-rate mode-locked pump pulses. The observed visibility of 0.88 ± 0.03 is much higher than the classical limit of 0.5, and in good agreement with the theoretical value of 0.93.

研究分野：量子光学

キーワード：量子光学 量子情報 量子通信

1. 研究開始当初の背景

量子もつれ光子対は量子通信や光量子計算を行う上で必要不可欠なリソースである。通常、量子もつれ光子対を生成するには、パラメトリック下方変換(SPDC)を用いる。SPDCとは二次の非線形光学効果であり、レーザ光で非線形光学結晶を励起することでエネルギー保存則を満たした光子対がレーザ光強度に比例した確率で生成される。SPDCで生成した量子もつれ光子対の検出レートは、 $\langle n \rangle \times \eta \times f$ に比例する。ここで、 $\langle n \rangle$ は1パルスあたりに1光子対が生成される確率、 η は光子対の検出効率、 f は励起レーザの繰り返し周波数である。 $\langle n \rangle$ は1が最大であり、超伝導単一光子検出器(SSPD)などの高い量子効率を有する検出器の登場により理想的な状況に近づきつつある。一方で、 $\langle n \rangle$ を大きく設定しすぎると $\langle n \rangle^2$ の確率で1パルスに単一光子以外の多光子対が同時に生成させることになる。これは多くの単一光子を用いた量子プロトコルにおいてエラーを生じさせる原因となる。そこで、量子もつれ光子対の質を落とさないためには、 $\langle n \rangle$

1 という条件が必須となる。つまり、質を保ったまま光量子情報処理の速度を上げるには、 f を大きくするしかないのが現状である。これまでの研究で、通信波長帯の連続波(cw)レーザに電気光学変調器(EOM)で位相変調を付加することで2.5GHzのパルス列(コムレーザ)の生成、及びその第二高調波発生(SHG)を励起光として用いたSPDCによる光子対の高速生成が報告されているが[1]、励起レーザの高繰り返し化に伴い、次の課題が明らかとなりつつある。すなわち、繰り返し周波数がGHzオーダのコムレーザでSPDCを励起した場合、励起条件が従来と比較して大きく変化し、ごくまばらな周波数で光子を励起することになる。(同じ帯域で比較した場合のコム本数は、従来用いられてきたチタンサファイアレーザ(繰り返し周波数: 80MHz)よりも2桁少ない)。ここでは詳細には立ち入らないが、この結果として、生成された光子対の持つ周波数相関をフィルタ等で除去できなくなり、2台の光源で独立に生成した光子対同士を干渉させることが難しくなることが予想される。量子もつれ交換等、単一光子を用いた量子通信プロトコルでは上記の干渉性(いわゆる「光子の識別不可能性」)を確保することが極めて重要となるが、傍証としてGHzオーダの励起光源で独立に発生させた光子対同士を干渉させた実験はこれまでに報告がなく、実際に解決すべき大きな課題であることが明らかとなりつつある。

2. 研究の目的

本研究では、励起レーザの繰り返し周波数と光子の識別不可能性の関係性を明らかにし、高い繰り返し周波数においても量子もつれ光子対を高レベルに干渉させられる基盤技術を開発する。より具体的には、GHzオーダの高繰り返しレーザを励起光とした場合でも、SPDC光子対を高レベルで干渉させる手法を開発する。また、開発した手法を用いることで、独立に生成した光子対を干渉させる実験を世界に先駆けて実施する。

3. 研究の方法

(1) 光源の高速化と光子の干渉性の関係を明らかにする理論モデルの構築

励起レーザの繰り返し周波数と光子検出器の時間分解能の影響をSPDC光子対の二光子波動関数に組み込んだ理論モデルを構築し、それぞれのパラメータが光子の純粋度に及ぼす影響を定量的に評価する。

(2) GHzオーダのクロックレートでの二光子干渉実験

GHzオーダの繰り返し周波数で動作する光子対源を2対立ち上げ、それらの間の高明瞭度な二光子干渉を観測する。また、得られた明瞭度を(1)の理論モデルを用いて評価する。

4. 研究成果

(1) 光子対の二光子波動関数に励起光の繰り返し周波数と光子検出器の時間分解能をパラメータとして組み込んだ理論モデルを構築し、数値シミュレーションで純粋度を解析した。その結果、当初の予想通り励起光の高繰り返し化にともな

って二光子波動関数は疎なコム構造となり、識別不可能性が劣化することを確認した。さらに、こうして生じた各コムの太さは、光子検出器の時間分解能の逆数で決まることを確認した。つまり、光子検出器のジッタが励起光の繰り返し周波数(コムの間隔)の逆数よりも十分小さければ、二光子波動関数は連続スペクトルと見なすことができ識別不可能な光子対を生成することができる。数値シミュレーションにより、現在の光子検出器(ジッタ :150ps)を用いても、繰り返し周波数3 GHz程度ならば、高明瞭度な二光子干渉が観

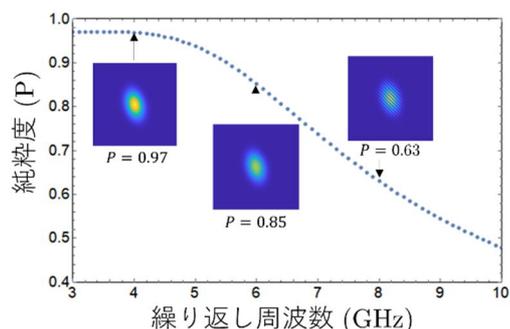


図1. 繰り返し周波数と純粋度の関係
光子検出器のジッタは150psとした

測できるという予想を得た。(図1参照)

(2) 繰り返し周波数 3.2GHz の励起レーザを立ち上げ、光子対を独立に二対生成して、それらの間の二光子干渉の実験を行った。その結果、明瞭度 $V=0.88 \pm 0.03$ を得た(図2参照)。この値はこれまで報告されてきたパルス励起の SPDC による二光子干渉の明瞭度と遜色なく、繰り返し周波数については世界記録を更新した。また、得られた明瞭度は、上述の純粋度に関するシミュレーション結果 ($P=0.97$) に加えて多光子生成の影響を考慮すると $V=0.93$ となり理論計算の結果が実験結果とよく合っていることを確認した。この結果は学術雑誌 Optics Express に発表した。

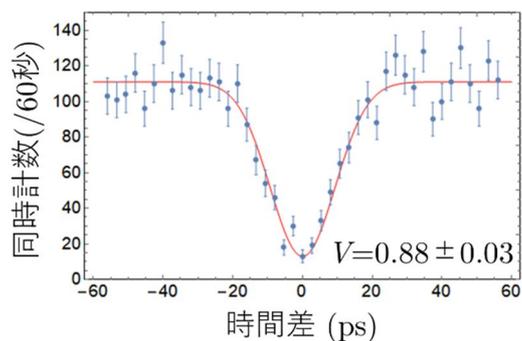


図2. 二光子干渉図 (明瞭度 $V=0.88 \pm 0.03$)

(3) また、二光子干渉を利用して単一光子にエンコードされた量子状態を推定する新手法を提案し、本研究で構築した二光子干渉計を利用して実証実験を行った。二光子干渉で得られる干渉図 (Hong-Ou-Mandel dip) の深さ (Δ_k) は2つの入力光子がどれだけ近い量子状態にあるかについての情報を含むため、一方の光子(プローブ光)の量子状態が既知の場合、もう一方の光子(シグナル光子)の量子状態に関する情報を得ることができる(図3(a)参照)。この性質を利用すること

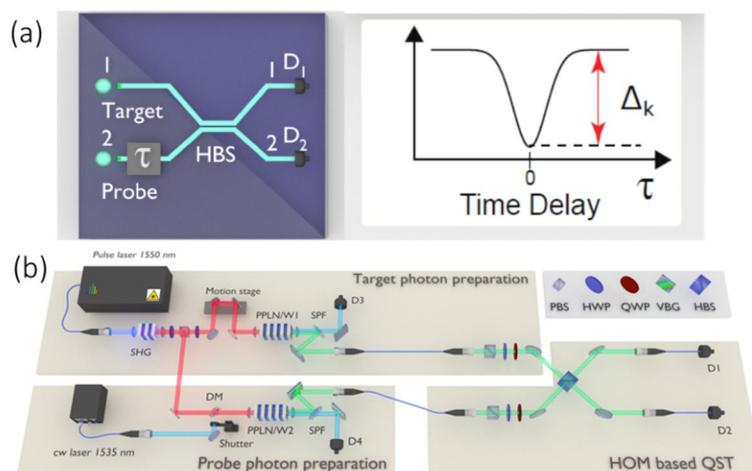


図3. (a) 二光子干渉図を利用した量子状態推定
(b) 偏光 qubit の状態推定実験

で、シグナル光子の量子状態の推定(いわゆる量子状態トモグラフィ)を実行することができる。本手法では、プローブ光を切り替えることで、様々な物理自由度における量子状態トモグラフィが実施できる。また、受動的な光学素子だけで測定系を構築できるため汎用性が高い。さらに、プローブ光として、レーザ光の様な古典的な光を用いても推定精度が低下しないというメリットがある。実証実験では、光子の偏光状態の推定をレーザ光との二光子干渉を用いて実施した(図3(b))。その結果、今回提案する手法が光子に対して直接射影測定を行う従来の手法と遜色ない精度での状態推定ができることを実証した。この結果については、現在論文を投稿中である。

< 引用文献 >

[1] R. Jin *et al.* Scientific Reports **4**, 7468 (2014).

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 2件）

1. 著者名 Wakui Kentaro, Tsujimoto Yoshiaki, Fujiwara Mikio, Morohashi Isao, Kishimoto Tadashi, China Fumihiro, Yabuno Masahiro, Miki Shigehito, Terai Hiroataka, Sasaki Masahide, Takeoka Masahiro	4. 巻 28
2. 論文標題 Ultra-high-rate nonclassical light source with 50 GHz-repetition-rate mode-locked pump pulses and multiplexed single-photon detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 22399 ~ 22411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.397030	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 Tsujimoto Yoshiaki, Wakui Kentaro, Fujiwara Mikio, Sasaki Masahide, Takeoka Masahiro	4. 巻 29
2. 論文標題 Ultra-fast Hong-Ou-Mandel interferometry via temporal filtering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 37150 ~ 37150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.430502	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4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 達本吉朗
2. 発表標題 Ultra-fast Hong-Ou-Mandel interferometry via temporal filtering
3. 学会等名 第43回量子情報技術研究会 (QIT43)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 達本吉朗
2. 発表標題 エンタングル光子対源の開発とその応用
3. 学会等名 量子技術ホライゾンー量子物理から量子インターネットを展望する 応用物理学会 量子情報工学研究会 主催 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 達本吉朗
2. 発表標題 High-visibility two-photon interference with ultra-fast pumping laser
3. 学会等名 The 10th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 達本吉朗
2. 発表標題 二光子干渉を用いた量子状態トモグラフィ
3. 学会等名 物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------