

令和元年6月25日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14130

研究課題名（和文）通信波長帯単一光子源の高速化に向けた光周波数コムの開発

研究課題名（英文）Development of GHz-repetition-rate optical frequency combs for ultrafast generation of single photons at telecom wavelength

研究代表者

和久井 健太郎 (Wakui, Kentaro)

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・主任研究員

研究者番号：90536442

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：単一光子は各種の量子通信実験において必要不可欠なリソースである。1.5  $\mu\text{m}$ 通信波長帯の単一光子生成では、光パラメトリック増幅過程の励起光源としてモード同期パルスレーザーがしばしば用いられるが、その繰り返し周波数は通常100MHz程度であり、単一光子の生成レート高速化を目指す際にボトルネックの一つとなっていた。そこで本研究では、この限界を打破するため10GHz以上の繰り返しを持つモード同期パルス光源を波長775nmにおいて開発した。また、開発した光源を使用し、従来と比較して遥かに高速に1550nm帯の単一光子や偏光量子もつれ光子対が生成できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単一光子は、量子通信や光量子計算など種々の量子情報通信プロトコルにおいて中心的に用いられる重要なリソースである。その生成レートはプロトコルのパフォーマンスや成否に直結するため、生成レートの向上は常に重要な課題となっている。本研究では、この生成レート向上を阻んできたいくつかの主要因のうち励起光源の高繰り返し化に取り組み、単一光子等の生成レートを劇的に向上させた。我々の開発したシステムは、成功確率が僅かな基礎理論の検証や伝送経路での減衰が大きいフィールド実証など基礎から応用の多岐にわたって、現代の様々な量子光学実験のパフォーマンス向上に大きく役立つ可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Single photons are an essential resource in various quantum communication experiments. For single photon generation at 1.5  $\mu\text{m}$  telecommunication wavelength by optical parametric amplification (OPA), mode-locked pulse lasers have often been used as a light source for excitation of OPA. However, the repetition rate of such lasers is usually 100MHz at best and has become one of the bottlenecks in aiming to further accelerate the single photon generation rate. To overcome the limitation, we developed a mode-locked pulse source at 775nm wavelength with a repetition rate exceeding 10GHz. Furthermore, using the light source, we generated heralded single photons and polarization entangled photon pairs at the telecom wavelength with a faster rate compared to the previous results. Our system thus could be useful for various quantum communication experiments where highly bright single photons are required due to low success probabilities or large attenuation.

研究分野：量子光学、量子情報、光周波数コム、高次高調波発生

キーワード：量子光学 光周波数コム

## 1. 研究開始当初の背景

単一光子は光を用いた量子通信・量子情報で必要不可欠のリソースであり、これまで様々な量子光学実験において活用されている。とりわけ量子暗号や光量子計算等への応用を考えた場合、リソースとなる単一光子の生成レート高速化は極めて重要な課題である。単一光子の生成においては、原子や量子ドットを用いた手法など様々なものが知られているが、最もよく利用されるのは光パラメトリック増幅 (Optical Parametric Amplifier: OPA) と呼ばれる 2 次の非線形光学過程を用いた手法であろう。OPA では、非線形光学結晶内で単一光子の 2 倍のエネルギーを持つ励起光が、いわゆる双子の光子のペアへと変換される。しかし、この光子対生成の過程は確率的であり、励起光の平均強度を高くしていくと、単一光子のペアだけでなく多光子のペア (2 個と 2 個、3 個と 3 個など) の生成確率が增大することになる。ここで、一部の特殊な光子検出器を除いて、通常的光子検出器は光子の有無のみを検出し、光子数を識別することはできない。検出において単一光子のペアと多光子のペアの区別がつかないことから、量子暗号等の各種量子通信プロトコルにおいてパフォーマンスの劣化を抑えるためには、OPA において多光子ペアの生成を抑制する必要がある。以上から、単一光子源を高速化するには、励起光の平均強度を抑えたまま繰り返し周波数を高める必要があることが分かる。

我々は、これまで光ファイバでの長距離通信に適した 1.5  $\mu\text{m}$  波長帯に特化し、単一光子・量子もつれ光子対生成の高性能化 (広帯域化・高純度化等) を進めてきた [1 - 3]。しかし、励起光源に市販のモード同期チタンサファイアレーザー (中心波長 750 - 800 nm、生成する光子の 2 倍波に相当) を用いており、励起パルスの繰り返し周波数はレーザー共振器長の逆数に対応する 76 MHz 付近に制限されてきた。この制限は光子生成高速化の際のボトルネックとなっており、OPA 励起光源の高繰り返し化は光子生成レート的高速化を図る際に重要な課題となっていた。

[1] R.-B. Jin *et al.*, *Opt. Commun.* **336**, 47 (2014).

[2] K. Wakui *et al.*, *Sci. Rep.* **4**, 4535 (2014).

[3] R.-B. Jin, *et al.*, *Opt. Express* **22**, 11498 (2014).

## 2. 研究の目的

以上の背景から、従来の量子光学実験で用いられてきた繰り返し周波数を凌駕する高繰り返しモード同期レーザーについて、我々は光通信分野で利用される光変調器を用いた光周波数コム発生技術に着目した。GHz 繰り返しのモード同期レーザーについては光共振器を用いた方法も知られているが、特に 10GHz を超えてくると光共振器を極めて小さく作る必要が生じ、必ずしも技術的に容易ではない。一方、光変調器ベースの光周波数コム発生手法では、光変調器を駆動する RF 周波数で光周波数コムの繰り返し周波数を容易に制御することができる。

本研究に先駆けて、我々は 2.5 GHz の繰り返しを持つ 1.5  $\mu\text{m}$  帯光周波数コム (以下、「基本波コム」) を基本波として利用し、その第 2 高調波発生 (Second Harmonic Generation: SHG) によって得られた 775 nm 帯光周波数コム (以下、「775 nm コム」) を OPA の励起光源に用いることで、量子もつれ光子対の生成レートを飛躍的に向上させることに成功した [4]。しかし、[4] では、繰り返しの高速化により基本波の尖頭値が低下したため SHG 効率も著しく低下し、得られた 775 nm コムの平均強度は 2.5 GHz 繰り返しで 35 mW 程度、10 GHz 繰り返しで 2 mW 程度と僅かであった。一方、多光子ペアが生じる励起光の平均強度は概ね 100 mW 以上と予想されたことから、励起光強度はまだ不十分であり、光子源の性能を最大限引き出すには至らなかった。

そこで、我々は本研究において繰り返しのさらなる高速化や SHG の特性改善等に取り組み、10 GHz 以上の繰り返し周波数でも高い SHG 強度を実現することで、光子対生成レートのさらなる向上を目指した。なお、OPA 励起光源の繰り返し周波数の高速化については、現在までに最大 10 GHz が報告されているが [5]、それ以上の繰り返し周波数を実現した例は未だ報告されていない。

[4] R.-B. Jin *et al.*, *Sci. Rep.* **4**, 7468 (2014).

[5] Ngah *et al.*, *Laser Photonics Rev.* **9**, L1-L5 (2015).

## 3. 研究の方法

我々は、まず dual-drive 型の Mach-Zehnder 変調器及び遅延干渉計を用いて、1550 nm において 25 GHz の繰り返し周波数持つ基本波コムを生成した。Dual-drive MZM を用いる手法では 1 段の変調器でフラットなスペクトル特性をもつ光周波数コムを発生させることができる [6, 7]。この基本波コムは、その後ファイバベースの光学系を通じて、パルス圧縮、光増幅、偏波制御等を行った上で、空間へと射出される。空間光学系では、非線形結晶として導波路型周期分極反転 LiNbO<sub>3</sub> 結晶 (periodically poled lithium niobate: PPLN) を用いた SHG 系を構築した。なお、SHG の効率を高めるため、本研究では [4] より変換効率の高い導波路型 PPLN を選定した。生成した 775 nm コムは、Sagnac 干渉計内部に導波路型 PPLN を配置する高効率の光子源 [8, 9] へ導波され、OPA の励起光として使用される。この OPA の過程を通じて光子対が生成される。

- [6] Sakamoto *et al.*, Opt. Lett. **33**, 890 (2008).
- [7] Morohashi *et al.*, Opt. Lett. **33**, 1192 (2008).
- [8] Tsujimoto *et al.*, Sci. Rep. **8**, 1446 (2018).
- [9] Meyer-Scott *et al.*, Opt. Express **26**, 32475 (2018).

#### 4. 研究成果

我々は研究期間を通じて、OPA 励起用 775 nm コムの高繰り返し化に取り組み、最終年度には当初計画で目標としていた 10 GHz 付近を大きく超える 25 GHz まで繰り返し周波数を高速化することに成功した。また、より変換効率の高い導波路型 PPLN 結晶を SHG に用いることで、平均強度 100 mW 以上を得ることに成功した。生成した 775 nm コムのスペクトルの例を図 1 に示す。25 GHz 間隔で生成された各周波数モードが通常の光スペアナでも十分に分離できていることが分かる。なお、775 nm コムのパルス時間幅は 3.5 ps 程度であった。

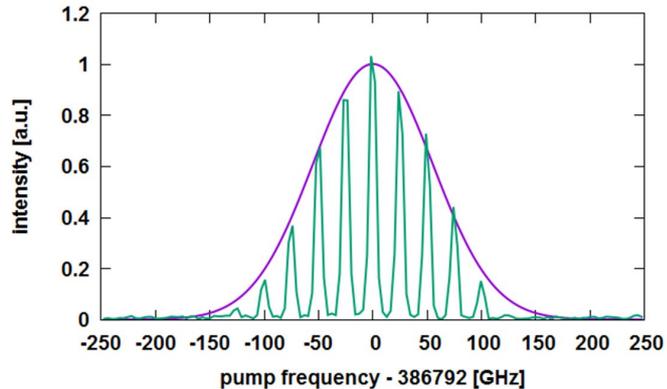


図 1. 775nm コムのスペクトル。緑：実験データ、紫：ガウス関数によるフィッティング結果

次に、導波路型結晶と Sagnac 干渉計を用いた高効率の光子源を構築したことにより、バルク型結晶を用いた従来システムと比較して遥かに低い励起光強度で高レートの光子対生成が可能となった。実際に、このシステムを用いて、 $\mu\text{W}$  オーダーのごく弱い励起光強度で Mcps 以上の光子対生成レートを実現した。

最後に、以上の高速かつ高効率な光子対生成システムを用いて量子もつれ光子対生成実験を行い、量子状態の忠実度を 90% 以上に保ったまま、従来と比較して遥かに高速で量子もつれ光子対が生成できることを実証した。なお、本研究では、光空間位相変調器及び 4f 系を用いて 1550 nm または 775 nm で動作する波形整形器も構築した。この技術は、励起光や単一光子の波形制御を可能とし、量子パルスゲートや任意波形単一光子等の実現に活用できる可能性がある。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. Yoshiaki Tsujimoto, Kentaro Wakui, Mikio Fujiwara, Kazuhiro Hayasaka, Shigehito Miki, Hiroataka Terai, Masahide Sasaki, and Masahiro Takeoka, "Optimal conditions for Bell test using spontaneous parametric down-conversion sources," Phys. Rev. A **98**, 063842 (2018).

〔学会発表〕(計 4 件)

1. 達本 吉朗, 和久井 健太郎, 藤原 幹生, 早坂 和弘, 三木 茂人, 寺井 弘高, 佐々木 雅英, 武岡 正裕, 「SPDC 光子対源を用いた CHSH 不等式の破れの最大化」, 日本物理学会第 73 回年次大会 (同志社大学・京田辺キャンパス), 2018 年 9 月 9 日.
2. 達本 吉朗, 和久井 健太郎, 藤原 幹生, 早坂 和弘, 三木 茂人, 寺井 弘高, 佐々木 雅英, 武岡 正裕, 「Optimal conditions for Bell test using a spontaneous parametric down-conversion source」, 8th International Conference on Quantum Cryptography (QCrypt 2018), Shanghai International Conference Center (上海), 2018 年 8 月 27 日.
3. 達本 吉朗, 和久井 健太郎, 藤原 幹生, 早坂 和弘, 三木 茂人, 寺井 弘高, 佐々木 雅英, 武岡 正裕, 「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」, 量子情報・物性の新潮流 (東京大学物性研究所・柏キャンパス), 2018 年 8 月 2 日.

4. 達本 吉朗, 和久井 健太郎, 藤原 幹生, 早坂 和弘, 三木 茂人, 寺井 弘高, 佐々木 雅英, 武岡 正裕,  
「Optimal conditions for Bell test using a spontaneous parametric down-conversion source」,  
第 38 回量子情報技術研究会 (QIT38), 広島国際会議場, 2018 年 6 月 5 日 .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

該当なし

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者：該当なし

(2)研究協力者：該当なし

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。