

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05071

研究課題名(和文)複合光共振器による高輝度・高フィデリティな光子対光源の開発

研究課題名(英文)Development of high-brightness and high-fidelity photon pair light source by compound optical resonator

研究代表者

渡邊 昌良 (Watanabe, Masayoshi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：00175697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：量子光源における発生制御において、光子対を高効率発生できる高フィデリティに寄与する基本光源の開発を目的とした研究を実施し、光子干渉の手法による基礎特性に関する計測を行った。量子状態の重ね合わせ原理を利用し、二光子干渉の測定の方法を基に、補助状態の位相と振幅を連続変換させる最尤推定および最小二乗法などの方法で新たな波動関数の測定を実施した。従来と異なる量子状態と古典状態の干渉による方法で3光子のド・ブローイ波長の測定を行った。さらにビジビリティの改善を目的とした発生過程におけるヘラルドの方法により純度が高い単一光子を生成したSPDC実験システムを構築しヘラルドの単一光子を発生した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光子にお代表される光の量子的性質は、情報通信、情報処理、計測などの将来への可能性として注目されている。特に、発生過程で二光子が同時に発生し量子固有の特性を共有する“光子対”の発生源が、基盤技術として重要である。しかし、発生過程は確率的であるため発生効率は一般に低く、実用化へのネックともなっている。本研究では、光パルスを効果的に適用した方法で発生過程の効率を高める技術を開発し、目的に応じ必要な光子対を集中的に高効率発生でき、なおかつ応用で量子特性がより確実に活用ができる光子対光源の技術開発を行うとともに発生光子の基礎特性の解明を行った。

研究成果の概要(英文)：In the generation control of the quantum light source, we conducted a study for the purpose of developing a basic light source that contributes to high fidelity that can efficiently generate photon pairs, and measured the basic characteristics by the method of photon interference. Using the principle of superposition of quantum states, based on the method of measuring two-photon interference, new wave function measurement is performed by methods such as maximum likelihood estimation and least squares method that continuously convert the phase and amplitude of auxiliary states. The de Broglie wavelength of three photons was measured by a method that differs from the conventional one by the interference between the quantum state and the classical state. Furthermore, we constructed a SPDC experimental system that generated single photons with high purity by Herald's method in the generation process for the purpose of improving visibility, and generated single photons of Herald.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス レーザー 量子光学 非線形光学結晶

## 1. 研究開始当初の背景

かつて基礎研究の対象とされた光の量子的性質が応用面で現実味を帯びつつある。とりわけ非線形光学過程で量子特有の関係(量子相関、量子もつれ)を持って対として発生される光子(光子対、光子ペア)をベースとする応用技術が注目されている。特に情報通信、情報処理に関係する分野では様々な提案や原理実証が国内外の研究機関からなされており、さらにスペクトルに多重分布する光子対による量子による多重通信などの将来へ向けた実用化を見据えた提案もあり、応用面での進展が求められている。

一方では基盤技術である光子発生源の性能が従来から課題となっている状況があり、発生過程として重要な非線形光学過程である“自然パラメトリック下方変換”(SPDC: Spontaneous Parametric Down-Conversion)は光子対発生のコアとなる量子的プロセスであるが発生面で十分なパラメトリック利得を得るのは技術的に十分とは言えず、現状の光源は、目的とする光子発生の効率(確率)が低いことから、量子計測に基礎を置く多くの実験で有意な計測結果を得るには長時間(数時間以上)を要しているのが一般的であり改善が望まれている。もし光子対の発生の確率が格段に改善され優れた“高輝度(発生の量)で高フィデリティ(量子相関の質)な光源”が実現すれば、当該分野の研究加速に大きく貢献することができるはずである。

当研究グループでは、これまでにコヒーレント光制御と波長変換(周波数上方変換を含む)に関する幾多の研究を実施してきた。特に高繰返し光パルスと光共振器を組合せた高効率変換方法で実用性を高める実績を得ている。また周波数上方変換と共に逆プロセスとなるパラメトリック過程での量子光の発生と特性計測に関する基礎研究も実施してきた。コム型スペクトル(高繰返し光パルスの多モードスペクトルに対応)に分布する光子対の優れた量子相関特性の可能性が外国のグループより報告されるなど当該分野でにわかに注目されてきた。これらのことから非線形過程に光共振器技術を複合化すれば高いパラメトリック利得とともに周波数選択的な制御で発生確率の向上とスペクトル内の選択が可能となり、機能的で実用性の高い量子光源が実現の可能性の着目が研究の背景である。

## 2. 研究の目的

光の量子的性質が情報通信、情報処理、精密計測、超微細加工など様々な応用へ新たな可能性から注目されているが、なかでも“量子もつれ”と呼ばれ量子固有の特性(量子相関)を共有しペアで発生する“光子対”は、革新的で魅力ある“光”として有用である。しかしながらその発生と制御は容易ではなく、現状では発生確率の限界から観測や計測に長時間を要するなど実用面の性能は十分とは言えず応用展開のネックとなっている。本研究では、高繰返し光パルスと光共振器を複合化することでコヒーレント光パルスでの光子対発生プロセスにおける効率を格段に高める技術を開発し、実用面から望まれる高輝度(光子対の発生量)かつ高フィデリティ(光子対の量子相関の質)で多機能な量子光源の開発を目的とした。

## 3. 研究の方法

実用性に優れた光子対発生光源を実現するため、SPDC過程における利得とスペクトル制御のための励起光と発生光の両側面からの取組みが研究課題となる。着実に実行し完成につなげるために必要な年度ごとの研究課題および研究体制を策定した。システムの基礎となる基本波パルス光源から順次開発を実施する。光共振器を組み合わせた手法で高効率なパラメトリック過程のための高強度励起源の開発を初年度の中心となる。高効率な光子対発生を実現し最適化のためのスペクトル制御、ビーム制御の複合型共振器光学系の開発が次年度以降の課題となる。システムをなす要素技術開発の最適化を経て、性能評価までの期間を3年とし学内外4名の研究体制で実施した。

## 4. 研究成果

高繰返し光パルス型光源の光子発生制御において光共振器を適用する方法にて、発生過程の効率を高めるための光源技術を開発し、目的に応じ必要な光子対を集中的に高効率発生できる高フィデリティに寄与する量子光源の開発を目的として研究を実施した。量子光検出・処理系として開発した低雑音で微弱光検出計測にて光子干渉の手法により発生効率とフィデリティ相互の基礎特性に関する計測を行った。新たな波動関数の測定方法により量子状態の重ね合わせ原理を利用した特有の量子状態の波動関数の測定可能となった。

ホモダイ検出器を用いる二光子干渉の測定の方法を新たに開発し、計測方法として補助状態

の位相と振幅を連続変換させる最尤推定法および最小二乗法などの方法で新たな波動関数の測定方法による計測を達成した。2光子とコヒーレント状態の干渉より世界で初めて3光子のド・プロイ波の測定に成功した。従来、ド・プロイ波の測定には主に量子状態と量子状態の干渉により観測されていたが量子状態と古典状態の干渉による方法で3光子のド・プロイ波長の測定実験を行った。さらに、タイプIIの方法による単一光子とコヒーレント状態の干渉において、これまで、2光子とコヒーレント状態の干渉の実験行ってきたが、ビジビリティが低いことが課題となっていた。これらの理由として生成された2光子の純度が低いためと考えられていた。そこで、タイプIIの非線形結晶を用いたヘラルドの方法により純度が高い単一光子を生成してビジビリティが85%以上の量子状態とコヒーレント状態の干渉実験をめざし、タイプIIのSPDC(自然パラメトリック下方変換)実験システムを構築しヘラルドの単一光子を生成することができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tingyu Li, Saburo Sakurai KatuyukiKasai, Lirong Wang, Masayoshi Watanabe, Yun Zhang	4. 巻 26
2. 論文標題 Experimental observation of three-photon interference between a two-photon state and a weak coherent state on a beam splitter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 20442-20449
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Yinghong Xue, Tingyu Li, Katsuyuki Kasai Yoshiko Okada-Shudo, Masayoshi Watanabe, Yun Zhang	4. 巻 7
2. 論文標題 Controlling quantum interference in phase space with amplitude	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 scientific reports	6. 最初と最後の頁 22291-1-22291-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optcom.2016.11.058	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 Daohua WU, K. Kasai, M. Watanabe and Y. Zhang	4. 巻 71
2. 論文標題 Observation of two-photon interference with continuous variables via homodyne detection	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 260 (1-7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjd/e2017-80379-y	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 Yun Zhang, Masaharu Hyodo, Yoshiko Okada-Shudo, Yun Zhu, Xiaoyang Wang, Guiling Wang, Chuangtian Chen, Shuntaro Watanabe, and Masayoshi Watanabe	4. 巻 387
2. 論文標題 Characteristics of pulse width for an enhanced second harmonic generation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Opt. Communications	6. 最初と最後の頁 241-244
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optcom.2016.11.058	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yun Zhang, Lirong Wang, and Masayoshi Watanabe
2. 発表標題 Multi-photon interference between a two-photon state and a weak coherent state
3. 学会等名 The International Photonics and Optoelectronics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yashuai Han, Daohua Wu, Katsuyuki Kasai, Masayoshi Watanabe, Yun Zhang
2. 発表標題 Interferometric measurement of a biphoton state with continuous-variables by homodyne detection
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 Daohua WU, Kota Kawamoto, K. Kasai, M. Watanabe and Y. Zhang
2. 発表標題 Observation of two-photon interference for continuous variables with homodyne detection
3. 学会等名 The 24th Congress of the International Commission for Optics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toru Asaka, Masayoshi Watanabe, Shingo Saito, Masaharu Hyodo
2. 発表標題 Generation of millimeter-wave signals by phase-locking of two longitudinal modes of laser using FPGA
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2017
4. 発表年 2017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
研究 分担 者	兵頭 政春  (Hyoudo Masaharu)  (30359088)	金沢大学・機械工学系・教授    (13301)	