

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760048

研究課題名(和文) 時間領域量子もつれ光子波束操作技術の開発

研究課題名(英文) Control of a wavepacket for temporally entangled photons

研究代表者

清水 亮介 (Shimizu, Ryosuke)

電気通信大学・先端領域教育研究センター・特任准教授

研究者番号：50500401

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：強く相関した光子系に対する光科学研究を開拓することを目指し、量子もつれ光子波束の操作、検出技術の開発に関する実験研究を行った。超短パルスレーザー光を利用して単一光子の波長変換を行うことで、高い時間分解能を有する単一光子検出システムを構築することに成功した。また、自発パラメトリック下方変換過程より生成される光子対の二光子スペクトル制御を行い、高い明瞭度を持った四光子干渉波形を観測した。

研究成果の概要(英文)：We have developed control and detection techniques of an entangled-photon wavepacket in order to explore novel optical science in a strongly correlated photon system. We have successfully constructed a single-photon detection system with high temporal resolution, utilizing a wavelength-conversion technique at the single-photon level. Also we controlled two-photon spectral distribution of photon pairs generated from a spontaneous parametric down-conversion process, and performed four photon experiments. The resultant patterns showed quantum interference patterns with high visibilities.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用光学・量子光工学

キーワード：量子光学

1. 研究開始当初の背景

光科学技術は計測やイメージング、あるいは情報通信といった多方面の分野で応用されている。特に光パルスを用いた光計測技術では、光パルス形状だけでなく、パルス内部の電界を直接操作することが可能になり、光の古典的波動としての性質をほぼ完全に制御し、計測を行うことが出来つつある。こうした実現されている光科学技術のほとんどは、古典的な波動光学理論に基づいている。一方で、古典光学では説明不可能な光の量子性に起因した性質をもつ光(非古典光)を生成、制御することが出来るようになってきた。レーザーより出射される光パルスは、波動光学により説明可能な古典光の代表例であるが、この古典的パルス光を光子描像で考えた場合、光パルス内部に含まれる光子の数(光子統計性)や光パルス内部の光子と光子の間の量子相関(量子もつれ)は全く制御されていない。つまり、古典的な光パルスは独立した光子からなる光子群として考えることが出来る。一方で、光子統計性を制御した単一光子源やスクイズド光、また光子と光子の間の量子相関を制御した「量子もつれ光子」といった非古典光を生成することが近年可能になってきた。

光子-光子間の周波数自由度における量子相関(以後、「周波数量子もつれ」と呼ぶ)を制御した光源の作製が可能になりつつあり、周波数量子もつれ光子の制御は時間領域の量子相関にも大きく影響することが予想される。

2. 研究の目的

本研究では従来のフーリエ光学を量子もつれ光子に対しても適用可能な光子-光子間の量子相関を考慮したフーリエ光学(以後、「多光子フーリエ光学」と呼ぶ)へと拡張することで「周波数量子もつれ」の概念を確立し、時間領域量子もつれ光子波束の操作、検出技術を開発することを目指し、以下の二点を目的として研究を行った。

(1) 超短パルス光による和周波発生過程を利用した時間分解2光子スペクトルを計測技術の開発。超短パルスを用いた和周波発生過程を利用するとフェムト秒領域の時間分解2光子スペクトル計測が可能になる。そこで、超短パルスレーザーより得られたフェムト秒パルス光と通信波長帯に生成された量子もつれ光子とを和周波発生過程により可視波長帯へ波長変換するための技術開発を行い、周波数量子もつれ光源に適用する。

(2) 時間領域量子もつれ光子波束の任意波形制御技術の開発。光パルスが持つ周波数スペクトルの強度分布だけでなく、各周波数モード間の位相を制御することで、時間領域の光パルス波形を制御する技術は確立されている。この技術を周波数量子もつれ光子に対しても適用するため、強度だけでなく位相も制御することで時間領域の量子もつれ光子波束制御の可能を探る。

3. 研究の方法

(1) 和周波光の発生には長さ 1 mm の PPMgSLT (Periodically Poled MgO-doped Stoichiometric LiTaO₃) 素子を利用した。PPMgSLT 素子は、一つの素子中に四種類の分極反転周期構造(8.40 μm, 8.48 μm, 8.55 μm, 8.62 μm)を持つ。実験では、はじめに和周波光発生強度が最大となるように、適当な周期と結晶温度を調べた。この際、素子の温度はペルチェ素子によって制御した。ここで、パルス時間幅 260 fs、繰り返し周波数 76.1 MHz、中心波長 792.0 nm で動作する Ti:sapphire レーザーをポンプ光源として用い、波長 1584.0 nm で動作する連続波の半導体レーザー(以後、被測定光と呼ぶ)との和周波光(波長 528 nm)を発生させた。和周波光への変換効率を向上させるためには、PPMgSLT 素子内部でのポンプ光と被測定光との空間的な重なりが重要となる。被測定光はシングルモード光ファイバーより出射されるため、等方的な空間モードを形成しているが、ポンプ光は Ti:sapphire レーザー内部のスリットによる影響から、楕円形の空間モードを持つ。そこで、二つのビームの素子内部での空間的重なりを改善するため、ポンプ光には空間フィルターを用いて波面整形を行い、等方的な空間分布を持つように調整した。素子への集光用レンズの前で被測定光とポンプ光とが平行になるように調整した後、焦点距離 30 mm のアクロマティックレンズへ入射した。この際、PPMgSLT 素子に対してポンプ光は垂直入射、被測定光はポンプ光に対して 4.2 度の入射角となるように、レンズ前での二つのビーム間隔を 2.2 mm に調整した。発生した和周波光は、焦点距離 50 mm レンズにより平行光にした後、Si 半導体光検出器を使ってその強度を測定した。測定の際、微弱な和周波光を測定するためには、十分に迷光を遮断する必要がある。そのため、レンズの前後に二枚のバンドパスフィルタ(透過帯域幅 20 nm)を用いた。

(2) 群速度整合条件を満たした PPKTP (Periodically Poled KTiOPO₄)素子は正の周波数相関を伴う量子もつれ状態を生成することが可能な素子として提案されたが、多量子ビットの量子情報通信技術の原理検証実験に有用な周波数無相関状態を持つ二光子状態を生成することも可能である。群速度整合 PPKTP 素子による二光子生成では、ポンプ光のスペクトル分布と PPKTP の素子長を制御することで周波数相関をある程度自在に制御できる。この特徴を利用すると、結晶長で決まる二光子周波数分布とうまく整合するように、ポンプ光のスペクトル分布を決定することで、周波数無相関なスペクトル分布を持つ二光子状態を直接得ることが可能になる。実際に、PPKTP の素子長 30 mm と整合するように、ポンプ光の波長 792 nm を中心にバンド幅 0.4 nm に設定し、二光子生成を行い、周波数無相関状態に近い状態が得られる。

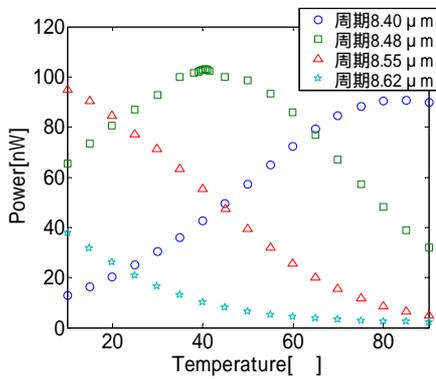


図1. 和周波発生強度の温度依存性。

4. 研究成果

(1) PPMgSLT 素子中の四種類の分極反転構造に対して、10 ~ 90 の範囲で素子温度を変化させ、和周波光強度を測定した結果を図1に示す。この際、ポンプ光、被測定光のレンズ前での光強度をそれぞれ 700 mW、8.71 mW に固定し、5 間隔で測定を行った。その結果、制御可能な素子温度の範囲で、最も効率良く和周波光が発生するのは分極反転周期 8.48 μm であることが分かった。さらに、この分極反転構造に対しては、変換効率が最大となる周辺で素子温度を0.5 間隔で変化させながら測定を行い、40.5 のときに最大の和周波光強度が得られることを確認した。

続いて、被測定光の変換効率を以下のように見積もった。今回の実験では、ポンプ光は超短パルスレーザーである一方で、被測定光は連続波レーザーである。そのため、被測定光のうち実際に変換に寄与するのは、時間領域で超短パルスレーザーと重なる部分のみである。そこで、超短パルスレーザーと重なる部分の割合をポンプ光のパルスの時間幅と繰り返し周波数から求め、実効的な被測定光の強度とした。その結果、実際の被測定光の入射光強度 8.71 mW に対し、和周波光発生に寄与する実効的強度は 165 nW と見積もられた。変換効率は、エネルギーもしくは光子数の変換効率によって定義されるが、ここでは 1584 nm から 528 nm への光子数の変換と定義し、変換効率 20.8 %を得た。

次に、和周波光発生のポンプ光強度依存性を調べた。この測定では、ポンプ光の強度を 10 ~ 700 mW の間で変化させた。その結果を図2に示す。図中の点は測定値、直線は線形フィッ

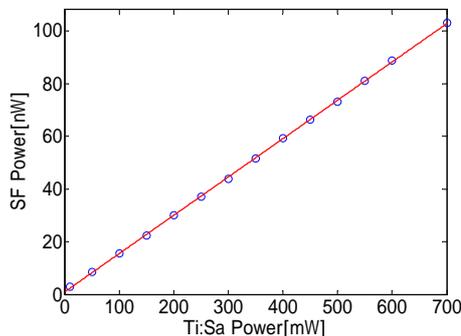


図2. 和周波発生強度のポンプ光強度依

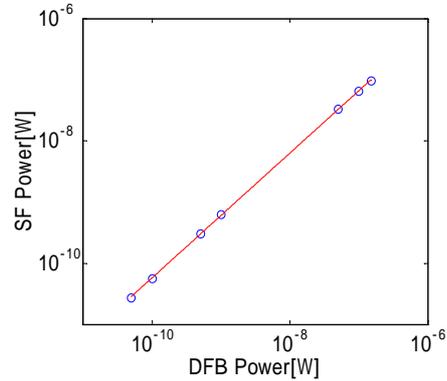


図3.和周波発生強度の被測定光強度依存性。

ティング結果である。結果から、ポンプ光強度に対して、和周波光強度は線形に増加しており、実際に利用できるポンプ光の範囲内では、和周波光発生の飽和効果は見られなかった。

最後に、この計測装置が単一光子レベルの測定感度を有することを確認するため、被測定光に対する和周波光発生強度を測定した。ここで、ポンプ光の強度は 700 mW に固定し、被測定光の実効的強度を 50 pW ~ 150 nW までの間で変化させ、その時の和周波光強度を測定した。その結果を図3に示す。前の実験と同様に、点は測定値を示し、直線は線形フィッティング結果を示す。こちらも被測定光の強度に対し、和周波光強度は線形に変化することが分かった。この測定において、最小の実効的被測定光強度 (50 pW) では、1 つのポンプ光パルス中に含まれる被測定光子数は平均 5.2 個であると見積もられた。このことは、今回開発した装置が単一光子レベル感度を有していることを示している。つまり、和周波光検出に用いている半導体検出器を単一光子検出器に切り替えることで、時間分解型の単一光子検出装置として機能することが分かった。この際、単一光子検出器への導入にシングルモード光ファイバーを用いることにより、迷光の影響を低減し、より感度の高い測定ができるようになる。

(2) 単一光子の生成には原子や量子ドットなどの物質中に存在する単一の二準位系を用いる方法が良く知られているが、同時生成する二光子を利用した「伝令付き単一光子源」は、光子を含まない空の光パルスを高確率で取り除けるため、実験の目的によっては質の高い単一光子状態を得ることが出来ることに特徴を持ち、量子情報通信技術に必要とされる単一光子光源を実現するための有力な手段の一つである。自発パラメトリック下方変換過程を経て放出された二光子を「伝令付き単一光子源」として利用する際の利点の一つに、波長可変性が挙げられる。特に、近年の擬似位相整合技術の進展により、分極反転周期を調整することで、任意の波長の光子対を高い変換効率で得ることが可能になってきている。しかし、周期分極反転により二次の非線形光学定数を変調することにより達成する位相整合と違い、群速度整合は線形光学定数により決定されるため、分極反転技術で制御することは

できない。つまり、群速度整合条件を満足させる波長は使用する結晶の屈折率分散特性によって一意に決定されてしまう。そのためスペクトル純度の高い単一光子状態を広帯域に渡って維持することは難しいように思われるが、群速度整合条件は、見方を変えると広帯域第二高調波発生として捉えることもできる。このことは、周波数無相関状態を広帯域渡って維持させることが可能であることを意味しており、結果として、高い純度を持った波長可変単一光子光源が実現できる。そこで、本実験では、群速度整合 PPKTP から生成された二光子が、広帯域に渡って無相関状態を維持していることを実験的に確かめるため、ポンプ光の波長を変えながら二光子スペクトルの測定を行った。さらに、得られた結果を定量的に評価するために、各光子のスペクトル純度を算出した。スペクトル純度の算出には、スペクトル強度および位相の情報が必要であるが、二光子の位相情報を取得する実験技術は確立されていないため、ここでは生成された二光子状態に位相の乱れはないものと仮定を行い、各光子の純度を算出した。その結果、発生した各光子は 1565nm から 1615nm の領域で 0.81 以上の純度を維持していることが確かめられた。この結果により、群速度整合 PPKTP 素子を利用することで、通信波長帯の L-band における波長可変の高純度単一光子光源への可能性が開けた。

高いスペクトル純度を持った光子は量子情報通信技術への応用が有用である。その場合、偶発的に生成した二光子対(四光子)による量子干渉を観測することが重要になる。光子の量子干渉には干渉計の配置により光子の差周波と和周波に対応する周期を伴った干渉が存在する。はじめに、通信波長帯に生成した周波数無相関 4 光子の和周波量子干渉測定により干渉周期が波長に対して 1/4 周期の波形を有する 4 光子量子干渉波形を高い明瞭度観測した。一方で、量子テレポーテーション実験をはじめとする線形光学量子計算(LOQC)の原理実証実験には、偶発的に一対ずつ生成された光子に対して差周波型の量子干渉がしばしば利用される。そこで、引き続き、差周波型の量子干渉(Hong-Ou-Mandel 干渉)実験を行った。その結果から、明瞭な Hong-Ou-Mandel 干渉波形が観測することに成功した。この結果から、群速度整合 PPKTP 素子から放出された周波数無相関二光子状態が、多量子ビットの量子情報通信プロトコル実証実験へ適用可能であることを実証した。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

Pulsed Sagnac polarization-entangled photon source with a PPKTP crystal at telecom wavelength.

R.-B. Jin, R. Shimizu, K. Wakui, M. Fujiwara, T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, Z. Wang, and M. Sasaki,

Opt. Express **22**(10), 11498-11507 (2014).

DOI: 10.1364/OE.22.011498

査読有

Entangled-state generation with an intrinsically pure single-photon source and a weak coherent source.

R.-B. Jin, R. Shimizu, F. Kaneda, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, Phys. Rev. A **88**, 012324/1-4 (2013).

DOI: 10.1103/PhysRevA.88.012324

査読有

Nonclassical interference between independent intrinsically pure single photons at telecom wavelength.

R.-B. Jin, K. Wakui, R. Shimizu, H. Benichi, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, Z. Wang, M. Fujiwara, and M. Sasaki, Phys. Rev. A **87**, 063801/1-4 (2013).

DOI: 10.1103/PhysRevA.87.063801

査読有

Widely tunable single photon source with high purity at telecom wavelength.

R.-B. Jin, R. Shimizu, K. Wakui, H. Benichi, and M. Sasaki, Opt. Express **21**(9), 10659-10666 (2013).

DOI: 10.1364/OE.21.010659

査読有

Four-photon quantum interferometry at a telecom wavelength.

M. Yabuno, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, Phys. Rev. A **86**, 010302(R)/1-4 (2012).

DOI: 10.1103/PhysRevA.86.010302

査読有

Entangled photon generation in two-period quasi-phase-matched parametric down-conversion.

W. Ueno, F. Kaneda, H. Suzuki, S. Nagano, A. Syouji, R. Shimizu, K. Suizu, and K. Edamatsu,

Opt. Express **20** (5), 5508-5517 (2012).

DOI: 10.1364/OE.20.005508

査読有

High-visibility nonclassical interference between intrinsically pure heralded single photons and photons from a weak coherent field.

R.-B. Jin, J. Zhang, R. Shimizu, N. Matsuda, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, Phys. Rev. A **83**, 031805(R)/1-4 (2011).

DOI: 10.1103/PhysRevA.83.031805

査読有

[学会発表](計 17 件)

Nandan Singh, Ryosuke Shimizu

Broadband polarization entangled photon pair generation in type-II parametric down-conversion.

第 61 回応用物理学会春期学術講演会
2014 年 3 月

青山学院大学相模原キャンパス
齊藤拓真, 清水亮介
アップコンバージョン法による単一光子時間分解計測装置の開発
第24回光物性研究会
2013年12月
大阪市立大学
R. -B. Jin, K. Wakui, R. Shimizu, H. Benichi, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, Z. Wang, M. Fujiwara and M. Sasaki
Nonclassical interference between independent intrinsically pure single photons at telecom wavelength
Single Photon Workshop 2013
2013年10月
Oak Ridge, Tennessee, USA
清水亮介
通信波長帯における主は数無相関光子対の直接生成と多光子干渉実験
第74回応用物理学会秋季学術講演会
2013年9月
同志社大学京田辺キャンパス
清水亮介
光子数分解分光計測から見る量子もつれ光子
量子エレクトロニクス研究会
2011年12月10日
上智大学軽井沢セミナーハウス
清水亮介
光計測技術への応用に向けた周波数量子もつれ状態の制御
2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会
2011年8月29日
山形大学
M. Yabuno, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu
Measurement of reduced four-photon de Broglie wavelength at telecom wavelength
2011 IQEC/CLEO Pacific Rim
2011年8月
Sydney, Australia

〔産業財産権〕

取得状況(計5件)

名称: GENERATOR OF POLARIZATION ENTANGLED PHOTON PAIRS AND METHOD OF GENERATIONG THE SAME 発明者: Ryosuke Shimizu, Keiichi Edamatsu
権利者: 科学技術振興機構
種類: 特許
番号: EP 2439585
取得年月日: 2014年4月30日
国内外の別: 国外
名称: GENERATOR OF POLARIZATION ENTANGLED PHOTON PAIRS AND METHOD OF GENERATIONG THE SAME 発明者: Ryosuke Shimizu, Keiichi Edamatsu

権利者: 科学技術振興機構
種類: 特許
番号: US 8,488,231
取得年月日: 2013年7月16日
国内外の別: 国外
名称: 非縮退偏光量子もつれ光子対生成装置及び非縮退偏光量子もつれ光子対生成方法
発明者: 清水亮介, 長能重博, 枝松圭一
権利者: 科学技術振興機構
種類: 特許
番号: 特許 第5240864号
取得年月日: 2013年4月12日
国内外の別: 国内
名称: 偏光量子もつれ光子対の生成装置及びその生成方法
発明者: 清水亮介, 枝松圭一
権利者: 科学技術振興機構
種類: 特許
番号: 特許 第5099393号
取得年月日: 2012年10月5日
国内外の別: 国内
名称: NON-DEGENERATE POLARIZATION-ENTANGLED PHOTON PAIR GENERATION DEVICE AND NON-DEGENERATE POLARIZATION-ENTANGLED PHOTON PAIR GENERATION METHOD
発明者: Ryosuke Shimizu, Shigehiro Nagano, Keiichi Edamatsu
権利者: 科学技術振興機構
種類: 特許
番号: US 8,173,982
取得年月日: 2012年5月8日
国内外の別: 国外

〔その他〕

ホームページ等

インタビュー記事(「ようこそ量子」)

<http://www.ryosi.com/qis/201308/01/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 亮介 (SHIMIZU, Ryosuke)

電気通信大学・先端領域教育研究センター・特任准教授

研究者番号: 50500401