

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610082

研究課題名(和文)光子数分解型量子フーリエ変換分光計測装置の開発

研究課題名(英文)Development of photon-number-resolved Fourier transform spectroscopy

研究代表者

清水 亮介 (SHIMIZU, Ryosuke)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：50500401

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：量子光学研究分野で研究されてきた二光子量子干渉を、分光計測分野で確立されているフーリエ変換分光と融合させ、光子数分解型量子フーリエ変換分光計測手法の実現を目指した。はじめに、非線形結晶中の非共鳴状態から生成された二光子に対して光子数分解分光計測から得られたスペクトル分布と、二光子量子干渉測定から推定されるスペクトル幅とが一致することを実証した。さらに、CuCl単結晶中の励起子分子共鳴状態から放出される二光子を高効率に集光する実験技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：We propose a novel technique of Fourier transform spectroscopy, combined with two-photon quantum interference, with photon-number-resolving detection. Toward realization of this technique, we have carried out spectroscopic and interferometric quantum measurements in order to characterize spectral properties of photon pairs generated from a nonlinear crystal. The resultant spectral widths from these measurements showed consistent values. In addition, we have developed a technique to efficiently collect photon pairs from a resonant state of biexcitons in a CuCl crystal.

研究分野：量子光学

キーワード：量子光学 分光計測 非線形光学 光物性 二光子量子干渉

1. 研究開始当初の背景

光を電磁波として扱う波動光学を光子描像から見た場合、無相関な光子群の振る舞いを扱うことと等価とみなせる。一方で、「量子もつれ光子」として知られる強い量子相関を持った光子群の生成が可能になっている。量子もつれ光子は量子情報通信技術への応用を目的に、主として偏光自由度の量子相関制御、検出の研究が行われてきたが、近年では周波数自由度の量子相関を制御した「周波数量子もつれ光子」の生成制御が可能になってきた。従来、周波数自由度の光制御は、超短パルス光を利用する光科学研究全般において最も重要な制御であり、現在では超短パルス光の操作技術は光の古典的波動としての性質をほぼ完全に制御することが可能になっている。一方で、波動光学で説明される現象は、1つの光子の挙動を用いて説明される。このことは、レーザーから出射される光子群には、周波数相関が存在しないことに由来しており、従来の波動光学理論は、周波数量子もつれ光子のように、量子相関が存在する光子群には適用できない。そのため、周波数量子もつれ光子の生成、操作、検出が自在に出来るようになると、従来の波動光学の常識を打ち破る、光の究極的な利用と革新的な光科学技術への展開が期待できる。

2. 研究の目的

従来の分光計測では周波数や時間の各自由度で光を分割し、光強度分布(スペクトル)を取得する手法であるが、これに加えて光強度を「光子数」毎に分解することで単一光子レベルでの新しい非線形光学分光計測手法の開拓が期待出来る。本研究では、量子光学研究分野で研究されてきた二光子量子干渉を、分光計測分野で確立されているフーリエ変換分光と融合させ、光子数分解型量子フーリエ変換分光計測手法として確立することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 最初に、比較的単純な物理過程である自発パラメトリック下方変換(SPDC)過程より生成された二光子の周波数領域スペクトルを、二光子量子干渉波形のフーリエ変換により推定し、他の分光計測手法と比較することにより、研究の目的である「光子数分解型量子フーリエ変換分光計測手法」の妥当性を実証することに取り組んだ。

SPDC 過程による二光子生成に擬似位相整合素子を利用することで、所望の量子状態を高効率に生成することが可能になっている。SPDC に利用される擬似位相整合素子としては、周期分極反転構造を有したLiNbO₃結晶やKTP結晶(KTiOPO₄)がしばしば利用されている。一方で、LiTaO₃結晶を利用した擬似位相整合素子も利用可能であるが、前述の二つの素子と比較すると報告例は少ない。しかし、LiTaO₃結晶は複屈折性が非常に弱いため、特に type-II の位相整合条件による二光子生成において特徴的な振る舞いを示す。その一つが、広帯域にわたる二

光子生成が type-II 位相整合条件の下で可能なことである。一般に、type-0 もしくは type-I 位相整合条件では、数十 nm 以上にわたる広帯域スペクトルを伴った二光子を生成することは容易であるが、type-II 位相整合では困難である。例えば、10mm 以上の素子長を持つ PPLN (Periodically Poled LiNbO₃) や PPKTP (Periodically poled KTP) を用いて type-II の位相整合条件のもと、通信波長帯に二光子を生成すると、そのスペクトル帯域幅は 1nm 以下になる。一方で、同一の条件下で PPMgSLT (Periodically Poled MgO-doped stoichiometric LiTaO₃) を用いて二光子を生成した場合、30nm 以上のスペクトル帯域幅を持った二光子生成が可能である。本研究では、PPMgSLT から生成された二光子のスペクトル特性を以下の三つの手法を用いて測定を行うことで、分光計測手法としての二光子量子干渉の有用性を検証した。

分光器を使った通常の古典的スペクトル計測
 狭帯域の波長可変バンドパスフィルターを利用した二光子スペクトル計測
 差周波型および和周波型二光子量子干渉計測

(2) 前述の非線形結晶を利用した量子もつれ光子生成では、非共鳴過程により生成されるため、SPDC 過程に用いるポンプ光の性質により多くの部分が決まってしまう、物性研究の観点からは興味は低い。一方で、半導体による量子もつれ光子生成は物質内部の実状態を介して生成されるため、生成された量子もつれ光子は半導体内部の電子状態に関する情報を多く含む。そのため、半導体から生成された量子もつれ光子のスペクトル計測を行うことは、従来の分光計測では観測できなかった新しい物性情報を取得できることが期待出来る。近年、半導体中の励起子分子状態を介した量子もつれ光子の生成が報告されているが、その多くが偏光自由度の評価のみであり、二光子を用いた量子干渉実験は行われていない。本研究では、励起子分子状態を介して生成される二光子に対して、量子干渉測定を行うことで、励起子分子状態のスペクトル情報を取得することを目指した。量子干渉実験において、高い明瞭度の干渉波形を得るためには高い空間コヒーレンスをもった光子が必要である。そこで本研究では、半導体中から生成された二光子を、単一モードファイバを通して観測するための技術開発を行った。

4. 研究成果

(1) 30 mm 長の PPMgSLT 素子から生成された二光子に対して、前述の手法を用いて測定した二光子のスペクトル分布を図 1 に示す。この結果から、30 nm 以上のスペクトル帯域幅をともなった負の周波数相関を持つ二光子が生成出来ていることが確認できた。スペクトル帯域幅については、前述の述べた分光器による従来型の分光計測に

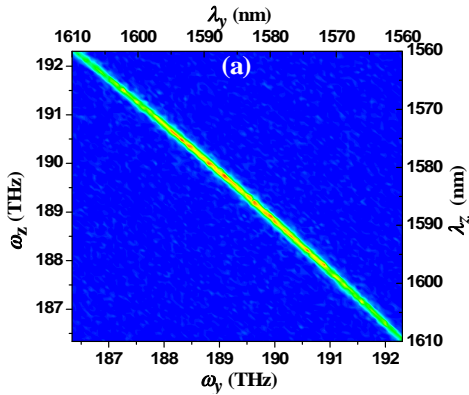


図 1: PPMgSLT 素子から生成された光子対の二光子スペクトル分布.

よっても確認を行い、二つの測定手法による結果に整合性があることを確かめている。

次に、前述の で述べた二光子の量子干渉計測を行った結果について述べる。二光子量子干渉は、量子情報通信技術や量子計測の原理実証実験ではしばしば用いられているが、大別すると Hong-Ou-Mandel (HOM) 干渉として知られる二光子の差周波数が表れる量子干渉と、標準量子限界を超えた位相敏感計測への応用が期待される和周波型の量子干渉とが存在する。差周波型の量子干渉波形をフーリエ変換することにより、二光子の差周波スペクトルを推定することが可能であり、同様に、和周波型の量子干渉波形からは和周波のスペクトル分布を推定することが可能である。この事実が本研究の基礎をなしているが、系統的に調べられていないため、PPMgSLT 素子より生成された二光子に対して、これら二種類の量子干渉波形を測定した。その結果を

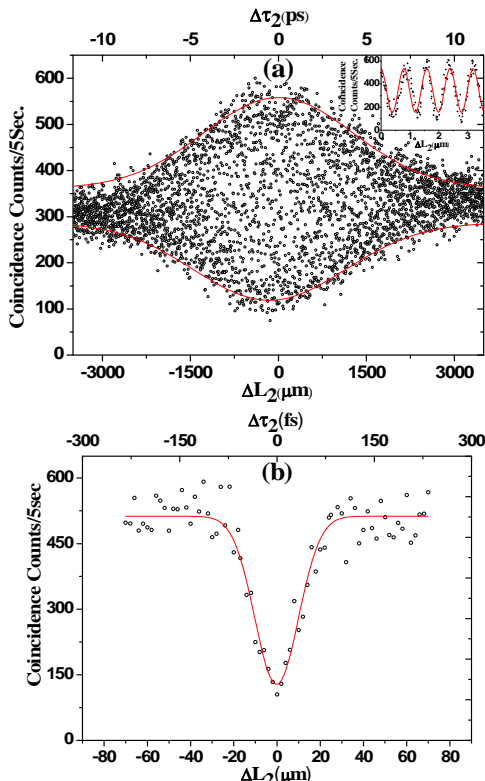


図 2: (a)和周波型および(b)差周波型の二光子量子干渉波形.

図 2 に示す。図 2(a)が和周波型の量子干渉波形であり、(b)が差周波型の量子干渉波形である。これらの干渉波形の包絡線幅は、各々二光子の和周波および差周波のコヒーレンス時間を表している。これらのコヒーレンス時間からスペクトル幅を推定すると、和周波スペクトルの分布幅として ~ 0.37 nm、差周波スペクトルの分布幅として ~ 46 nmと推定された。これらの結果は、図 1 の二光子スペクトルにおいて観測される和周波および差周波方向の分布と良い一致を表しており、二光子量子干渉が高次のフーリエ変換分光として利用可能であることを示している。また、量子干渉の明瞭度が二光子スペクトル分布の対称性により決定されていることを直接的に示すことに成功した。

(2) 半導体中の共鳴状態を介して二光子を生成する過程として CuCl 単結晶中の励起子分子ハイパーパラメトリック散乱 (RHPS) を利用した。CuCl の励起子物性は、これまでの研究により十分に調べられており、RHPS 過程による二光子生成の報告も行われていることから、本研究の目的を達成するためには最適であると判断した。しかし、CuCl 単結晶は、強誘電体を使った非線形結晶と比べると、結晶品質にばらつきがあり、結晶表面も平坦な領域が制限されるため、安定的に二光子を観測するための技術開発が必要となる。また、過去に報告されている CuCl 単結晶を用いた二光子生成では、発生した光子を多モードファイバーに結合させて観測を行っている。しかし、多モードファイバーでは複数の伝搬モードの存在することにより干渉波形の明瞭度低下を招くことから、干渉計測用途には適さない。そのため、本研究では、単一モードファイバー二光子を結合させる実験技術の開発も併せて行った。実際の実験では、CuCl 単結晶から散乱された二光子を単一モードファイバーに結合した後、分光器により光子対のスペクトル成分のみを透過させ、単一光子検出器で光子を測定する。その後、二つの単一光子検出器からの電気信号に対して同時計数計測を行うことで二光子の生成レートを測定した。図 3 は、励起光強度を変化させながら、光子対の生成レートを測定した結果である。光子対の生成レートは $1\mu\text{W}$ の励起光強度で ~ 15 pairs/秒であった。他のグ

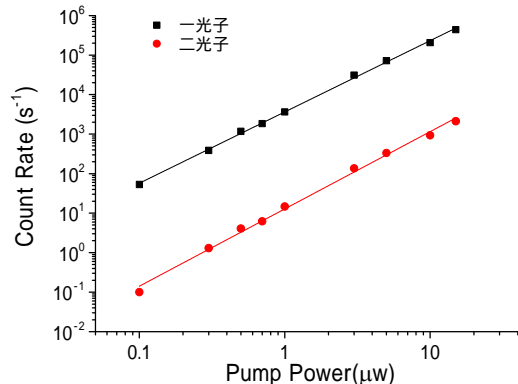


図 3: 一光子および二光子生成レートの励起光強度依存性.

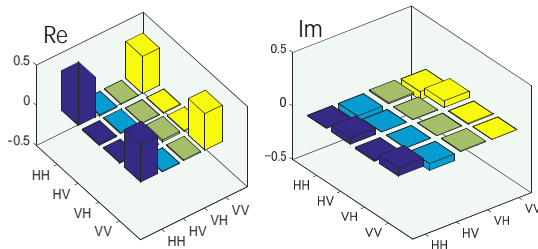


図4: 偏光量子状態トモグラフィ測定から推定された二光子密度行列の実部(左)および虚部(右).

ループによる先行実験では、多モードファイバーに光子対を結合した際の生成レートが $1\mu\text{W}$ の励起光強度において ~ 0.1 pairs/秒であると報告されている。我々の実験では、集光条件が厳しい単一モードファイバを使っても、従来の報告より倍以上の高い検出効率を達成することに成功した。さらに、得られた二光子に対して偏光量子状態トモグラフィ測定を行い、密度行列の推定を行った(図4)。得られた密度行列から偏光量子もつれ状態を定量的に評価するための指標としてタングル(T)およびニアエントロピー(L)を導出した。その結果、 $T = 0.94$ および $L = 0.03$ を得た。CuCl を用いた従来の二光子生成の報告では、 $T = 0.56$, $L = 0.31$ であることから、我々の実験系においてより高い度合いと純度をもつ量子もつれを観測することに成功した。この結果から、CuCl から生成された二光子に対して量子干渉測定を行った場合に、高い明瞭度の干渉波形を得ることが期待出来、精度の高い実験が可能であることが確かめられた。

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6件)

Spectrally resolved Hong-Ou-Mandel interference between independent photon sources.

R.-B. Jin, T. Gerrits, M. Fujiwara, R. Wakabayashi, T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, R. Shimizu, M. Takeoka, and M. Sasaki, *Opt. Express* **23** (22), 28836-28848 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.028836

査読有

Highly efficient entanglement swapping and teleportation at telecom wavelength.

R.-B. Jin, M. Takeoka, U. Takagi, R. Shimizu, and M. Sasaki, *Sci. Rep.* **5**, 93333/1-7 (2015). DOI:10.1038/srep09333

査読有

Spectral properties of broadband biphotons generated from PPMgSLT under a type-II phase-matching condition.

N. S. Bisht and R. Shimizu, *J. Opt. Soc. Am. B* **32** (4), 550-554 (2015). DOI: 10.1364/JOSAB.32.000550

査読有

Efficient detection of a highly bright photon source using superconducting nanowire single photon detectors.

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

Opt. Comm. **336**, 47-54 (2015).

DOI:10.1016/j.optcom.2014.09.051

査読有

Efficient generation of twin photons with 2.5 GHz repetition-rate-tunable comb laser.

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

Sci. Rep. **4**, 7468/1-6 (2014).

DOI:10.1038/srep07468

査読有

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

[学会発表](計21件)

清水亮介, 齊藤拓真

周波数量子もつれ光子の二光子時間分布計測.

日本物理学会 第71回年次大会

2016年3月

東北学院大学泉キャンパス, 宮城県仙台市宇野諒, 杉村優, 菅原雅弘, 橋本優吾, 宮島顕祐, 清水亮介

CuCl単結晶から生成された光子対の単一モードファイバへの結合

日本物理学会 第71回年次大会

2016年3月

東北学院大学泉キャンパス, 宮城県仙台市

清水亮介

量子もつれ光子のフーリエ光学.

第28回先端光量子科学アライアンスセミナー

2015年11月

電気通信大学, 東京都調布市

R.-B. Jin, T. Gerrits, M. Fujiwara, M. Takeoka, R. Wakabayashi, T. Yamashita, S. Miki, R. Shimizu, H. Terai and M. Sasaki

Spectral correlation measurement in Hong-Ou-Mandel interference between two independent sources.

5th International Conference on Quantum Cryptography (QCrypt2015)

Sept. 28- Oct. 2 (2015)

Tokyo(Japan)

清水亮介

極微弱光領域のフォトニクス-量子もつれ光

子のフーリエ二重性.

光応用工学特別研究会

2015年6月

東京大学 生産技術研究所, 東京都目黒区

R.-B. Jin., R. Shimizu, M. Fujiwara, R. Wakabayashi, M. Takeoka, and M. Sasaki, Separable Schmidt modes generation by using a Hong-Ou-Mandel interference.

2015年第62回応用物理学会春季学術講演会

2015年3月

東海大学湘南キャンパス, 神奈川県平塚市

齊藤拓真, 清水亮介

周波数量子もつれ光子のフーリエ二重性.

第25回光物性研究会

2014年12月

神戸大学, 兵庫県神戸市

R.-B. Jin, M. Takeoka, U. Takagi, R. Shimizu, M. Sasaki:

Highly efficient entanglement swapping for long-distance quantum communication

4th international conference on quantum cryptography (Qcrypt2014)

September 5 (2014)

Paris (France).

清水亮介, Nandan Singh

Type-II PPMgSLT から生成された二光子のスペクトル特性.

第75回応用物理学会秋季学術講演会

2014年9月

北海道大学札幌キャンパス, 北海道札幌市

〔その他〕

ホームページ等

研究紹介記事: UEC e-Bulletin

“Quantum optics: Understanding spectral properties of broadband biphotons”

<http://www.ru.uec.ac.jp/e-bulletin/research-highlights/2015/understanding-spectral-properties-of-broadband-biphotons.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 亮介 (SHIMIZU Ryosuke)

電気通信大学大学院・情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 50500401