

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540424

研究課題名(和文) 経路干渉計法を用いた光子対の軌道角運動量もつれ合い状態の検出に関する研究

研究課題名(英文) Study on detection of orbital angular momentum entangled photon states using path interferometer method

研究代表者

宮本 洋子 (MIYAMOTO, Yoko)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：50281655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は経路干渉計法を用いた光子対の軌道角運動量もつれ合い状態検出の特徴を実験的に明らかにすることを目的とした。比較対象の両ホログラムシフト法の実験と理論の比較を行い、もつれ合いの評価に与える影響を明らかにした。実験系を設計・改良し、検出用ホログラムの歪みを一桁減少させ、励起光源を開発した。期間中には経路干渉計法の実験に至らなかったが、これらの成果をもとに今後実験を進める予定である。さらに、光ビーム断面内の角運動量分布の定量評価手法を確立し、これを発展させた新たな研究に着手しつつある。また、複屈折結晶中で光渦が複雑な偏光分布に発展する現象の観察手法を提案・実証し、定量的な指標を確立した。

研究成果の概要(英文)：This project aimed to experimentally demonstrate characteristics of the detection of orbital angular momentum entangled photon states using the path interferometer method (PIM). We compared experiment and theory for the alternative hologram shifting method (HSM), and clarified how characteristic of HSM affects entanglement evaluation. We designed and refined the experimental setup, decreased by an order of magnitude distortions in the hologram for detection, and developed a pump source. We did not reach entanglement detection with PIM during the project period, but with these results experiments can now be advanced. In addition we established a technique to evaluate angular momentum distribution within a beam cross section, which has been developed into a new project. We also proposed and demonstrated a method to examine the unfolding of an optical vortex into a complex polarization distribution within a birefringent crystal, and established a quantitative measure for the process.

研究分野：量子光学

キーワード：光の軌道角運動量 もつれ合い 量子情報 ホログラム 光子相関 光渦 偏光特異点

1. 研究開始当初の背景

光子の軌道角運動量状態は整数量子数  $m$  に対応すること、多次元の重ね合わせ状態 (quNit) を構成することから、量子情報分野での応用が期待されている。2001年にウィーン大学の Mair らによって、パラメトリック蛍光のシグナル光とアイドラ光の軌道角運動量に光子レベルの相関があることが示され、その後の研究により各光子について3つ以上の基底が関わる多次元のもつれ合い状態であることが確認された。

軌道角運動量もつれ合い状態の検出には、各光子の軌道角運動量重ね合わせ状態での検出が不可欠である。宮本 (研究代表者) はこれまで、軌道角運動量重ね合わせ状態の検出手法として経路干渉計法を提案してきた [①]。従来法のホログラムシフト法と比べて対象外成分を効果的に排除することが特徴であるが、文献①では余分な成分の排除を定量的に確認するまでには至らなかった。

また、これとは別にホログラムシフト法による光子の同時計数分布について理論による検討を行い、重ね合わせの相対位相についてスキャンを行うと、2光子が多次元のもつれ合い状態であることを反映して非調和な振舞いが現れるという興味深い結果を得た [②]。

2. 研究の目的

本研究は経路干渉計法を用いた光子対の軌道角運動量もつれ合い状態検出の特徴を実験的に明らかにすることを目的とした。

経路干渉計法は軌道角運動量重ね合わせ状態の検出手法の1つである。従来法のホログラムシフト法と比べて対象外成分を効果的に排除することが特徴であり、軌道角運動量の古典的な相関が想定される場合には光子対の一方に適用するだけで効果が期待される。パラメトリック蛍光光子対の両方にホログラムシフト法を適用した場合と、一方に経路干渉計法を適用した場合との同時計数率の振舞いを比較し、この効果を確認することを目指した。

経路干渉計法のもう1つの特徴として、互いに直交する重ね合わせ状態の同時検出が可能であることが挙げられる。これを2つの排他的な結果のどちらかを与える2出力の検出器として用いることで、完全な Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 型の実験による軌道角運動量もつれ合い状態の初めての検出を目指した。

3. 研究の方法

図1に経路干渉計法の概略を示す [①]。ホログラムの1次回折光側では入射光中の軌道角運動量量子数  $m = m_H$  の成分が  $m=0$  に変換され、シングルモードファイバ SMF1 を通過する。一方、0次回折光側では入射光中の  $m=0$  成分がそのままシングルモードファイバ SMF0 を通過する。選別された2つの軌道角運

動量成分を干渉させ、位相変調器の調整により特定の位相差の重ね合わせ状態を光子検出器側 (出力1) に出力する。

一方、ホログラムシフト法では1次回折光のみを用い、ホログラム位置を光軸に垂直な面内でシフトすることにより観測基底を選挙する。

本研究に適した新しい実験系の構築のため、まず新規励起光源の導入に伴う光学素子の検討、実験系の設計の最適化、およびアライメント指針の検討による回転対称性の向上を行った。これらの検討結果をもとに実験系を組み立て、パラメトリック蛍光光子対に対するもつれ合い状態検出を、両光子にホログラムシフト法を用いる両ホログラムシフト法と、一方に経路干渉計法を用いるハイブリッド法とで行い、両者の違いを検証する。さらに光子対の両方に経路干渉計法を用いる両経路干渉計法や、完全な Einstein-Podolsky-Rosen 型の実験によるもつれ合い状態の検出等により高度な実験を行うことを計画した。

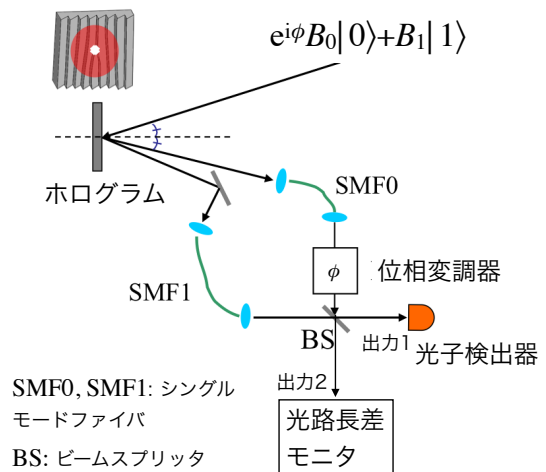


図1 経路干渉計法

4. 研究成果

(1) 実験系の検討

パラメトリック蛍光の励起光源として新たに波長 405nm の光源を導入するため、対応する光子対の波長 810 nm に合わせた光学系の検討を行った。ファイバ干渉計部品をモード関数径  $5.5 \mu\text{m}$  の偏波保持ファイバに統一して設計し、新規部品の購入や現有部品の修理等を進めるとともに、ファイバカップラを通して結合する自由空間モードの実験による同定を進めた。実験系の設計の最適化については、これまでの研究成果 [②] を活用して実験系のパラメタの検討を行った。アライメントについては励起光および光子対が全て同方向に伝搬する配置を採用して手順の簡略化を行い、アライメント精度を上げるための新タイプのファイバカップラの導入を検討した [Miyamoto, LPHYS '14 (2014) 他]。

(2) ホログラムの改良

両ホログラムシフト法とハイブリッド法

の違いを明確にするためには、実験系の回転対称性の向上が重要である。モード変換を行うホログラムの作製時の歪みを除去して回転対称性を向上させる方策に取り組み、ホログラムによって生成・検出されるビームの異方性を一桁減少させる手法について報告を行った [Miyamoto et al., Opt. Rev. (2013)].

ホログラム作製はポリマーの電子線露光によって行っているが、研究期間中に共同利用設備の露光装置の更新やこれまで用いていた材料の価格高騰があった。新しい電子線露光装置やホログラム材料について電子線照射条件と加工深さの関係の検討を行った [亀井 他, Optics and Photonics Japan 2013 (2013) 他]。新規材料である gL1000-5 は回折光学素子の作製に適したポリメタクリル酸メチル系のポリマーであり、我々が見出した条件は他の用途のホログラム作製にも有効と考えられる。

### (3) 両ホログラムシフト法の評価

両ホログラムシフト法は光子対の両方にホログラムシフト法を用いるもつれ合い状態検出手法である。この手法による実験結果とこれまでの成果である理論 [②] との比較を行った [Miyamoto, LPHYS '13 (2013)].

理論では光子対が同時に検出される同時計数率について、重ね合わせの相対位相についてスキャンを行うと、2光子が多次元のもつれ合い状態であること、ホログラムシフト法が余分な成分も含め検出を行うことを反映して非調和な振舞いが現われることが予想されていた。実験で得られた同時計数率のフーリエ解析により、非調和成分の存在が確認された。同時計数率の高コントラストの変動が得られる実験パラメータについても、理論と実験がよく一致することを確認できた。さらに、非調和成分がもつれ合いの評価に与える影響を検討した。

実験には改良の余地があるが、文献②の理論が実験的に検証され、両ホログラムシフト法の理解が着実に進んだと言える。

### (4) 励起光源の作製

励起光源はもつれ合い光子対を生成するために用いるもので、実験系の見直しにより 3-30 mm のコヒーレンス長を確保する必要が生じたため、外部共振器付き半導体レーザーを作製することになった。そのため、まず設計と性能評価手法の検討を行った [舘野 他, 情報フォトニクス研究会関東学生研究論文講演会 (2014)].

作製したレーザーの評価を行ったところ、予定していたパワーとコヒーレンス長の両方を確保することが難しいことが分かったが [舘野 他, Optics and Photonics Japan 2014 (2014)], その後の改良により適当な妥協点を見出しつつある [Miyamoto et al., OIE '15 (2015)].

光源作製に予想よりも時間が掛かったため、研究期間中にはハイブリッド法の実験に着手できなかったが、今後本光源を用いて研

究を進める計画である。

### (5) ビーム断面内の角運動量分布の評価

光子の軌道角運動量の起源であるビーム断面内のエネルギーの流れの分布やそれによって生じる角運動量分布について、実験により定量的に評価する方法を確立した [Miyamoto et al., J. Opt. (2013)]. 本手法ではビーム断面内の複素振幅分布を詳細に測定し、そこから計算によりエネルギーの流れや角運動量の分布を求める。これにより自由空間伝搬中にビーム断面内の光渦の回転方向が反転するケースについて、反転前後でビーム全体の角運動量の符号が不変であることを初めて実験により示した。さらにこれを発展させた新たな研究に着手しつつある。

### (6) 複屈折結晶中の光渦の展開の観測

パラメトリック下方変換をはじめとする非線形な光学過程の観測・応用では、本研究も含め複屈折を利用して位相整合条件を満たすよう設計することが多い。複屈折結晶中では一様な偏光状態の光渦が複雑な偏光分布に発展する展開現象が知られている。この様子を観察するために、複屈折干渉計を用いた実験系を提案し、実証を行った [Brundavanam et al., Opt. Express (2012)].

複雑な偏光分布に発展する様子をより詳しく観察するために実験系の改良を行った。また、展開現象の定量指標の理論を確立し、実験との比較を行った [Miyamoto, Correlation Optics (2015)]. また軌道角運動量をもつ光の定在波についても理論的に明らかにした [Vyas et al., Opt. Express (2015)]. 光渦の展開現象が軌道角運動量もつれ合い光子対の生成に与える影響について、今後検討を行っていく予定である。

### <引用文献>

- ① Y. Miyamoto, D. Kawase, M. Takeda, K. Sasaki, and S. Takeuchi: Detection of superposition in the orbital angular momentum of photons without excess components and its application in the verification of non-classical correlation, *Journal of Optics* **13**, 064027 (2011).
- ② D. Kawase, Y. Miyamoto, M. Takeda, K. Sasaki, and S. Takeuchi: Effect of high-dimensional entanglement of Laguerre-Gaussian modes in parametric downconversion, *Journal of the Optical Society of America B* **26**, 797-804 (2009).

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① S. Vyas, Y. Kozawa, and Y. Miyamoto: Creation of polarization gradients from superposition of counter

propagating vector LG beams, *Optics Express* **23**, 33970-33979 (2015), 査読有り.

DOI:10.1364/OE.23.033970

- ② Y. Miyamoto, A. Wada, T. Yonemura, and M. Takeda: Detailed measurement of phase distribution of an optical beam with inverting vortex, *Journal of Optics* **15**, 044002 (2013), 査読有り. DOI:10.1088/2040-8978/15/4/044002.
- ③ Y. Miyamoto, K. Bito, Y. Ozaki, A. Wada, and M. Takeda: Characterization and Compensation of Phase Distortions in Holograms for Generating and Detecting Doughnut Beams, *Optical Review* **20**, 127-131 (2013), 査読有り. DOI:10.1007/s10043-013-0018-1
- ④ M. M. Brundavanam, Y. Miyamoto, R. K. Singh, D. N. Naik, M. Takeda, and K. Nakagawa: Interferometer setup for the observation of polarization structure near the unfolding point of an optical vortex beam in a birefringent crystal, *Optics Express* **20**, 13573-13581 (2012), 査読有り. DOI:http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.013573

[学会発表] (計46件)

- ① Y. Miyamoto: Experimental setup to probe higher dimensional entanglement in orbital angular momentum and optimization of microtrap array for single atoms, 25th International Laser Physics Workshop (LPHYS '16), Yerevan (Armenia) (to be presented 2016.7.11-15) (Invited paper).
- ② Y. Miyamoto: Generation and analysis of high-dimensional orbital angular momentum entanglement of photons, the 5th Annual World Congress of Advanced Materials-2016 (WCAM-2016), Chongqing (China) (2016.6.6-8) (Invited paper).
- ③ 舘野博直, 宮本洋子, 中川賢一: パラメトリック蛍光励起用半導体レーザーの作製及びコヒーレンス長の測定 II, 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2015, 筑波大学東京キャンパス文京校舎 (東京都・文京区) (2015.10.28-30)
- ④ Y. Miyamoto: Analyzing the unfolding point of an optical vortex inside a birefringent crystal, 12th International Conference on Correlation Optics, Chernivtsi (Ukraine) (2015.9.14-18) (Invited paper).
- ⑤ Y. Miyamoto, T. Kamei, H. Tateno, K.

Shishido, and S. Vyas: Experimental system for comparison of hologram shifting and path interferometer methods in orbital angular momentum entanglement detection, OIE '15, The Eleventh Finland-Japan Joint Symposium on Optics in Engineering, Joensuu (Finland) (2015.9.1-2) (Invited paper).

- ⑥ Y. Miyamoto: Characterization of the unfolding of an optical vortex in a birefringent crystal, 14th Workshop on Information Optics (WIO 2015), 京都ガーデンパレス (京都府・京都市) (2015.6.1-5) (Invited paper).
- ⑦ Y. Miyamoto: Probing orbital angular momentum entangled photon pairs with holograms, 2015 EMN Optoelectronics Meeting, Beijing (China) (2015.4.24-27) (Invited paper).
- ⑧ 宮本洋子: 量子光工学とは, 精密工学会春季大会シンポジウム「量子光工学の現状」, 東洋大学白山キャンパス (東京都・文京区) (2015.3.17) (シンポジウム招待講演)
- ⑨ Y. Miyamoto: Singular Optical Modes and Quantum Information, Photonics 2014: 12th International Conference on Fiber Optics and Photonics, Kharagpur (India) (2014.12.13-16) (Invited paper).
- ⑩ M. M. Brundavanam, S. Vyas and Y. Miyamoto: Birefringent interferometer to observe the polarization structure near the unfolding point of an optical vortex beam, Photonics 2014: 12th International Conference on Fiber Optics and Photonics, Kharagpur (India) (2014.12.13-16).
- ⑪ Y. Miyamoto: Quantum information and orbital angular momentum of light, 20th National Conference on Atomic and Molecular Physics (NCAMP-XX), Trivandrum (India) (2014.12.9-12) (Invited paper).
- ⑫ 舘野博直, 宮本洋子, 亀井健: パラメトリック蛍光励起用半導体レーザーの作製及びコヒーレンス長の測定, 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2014, 筑波大学東京キャンパス文京校舎 (東京都・文京区) (2014.11.5-7)
- ⑬ 亀井健, 宮本洋子, 舘野博直: 光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出のためのホログラム作成についての研究 II, 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2014, 筑波大学東京キャンパス文京校舎 (東京都・文京区) (2014.11.5-7)
- ⑭ 宮本洋子: 光渦と偏光特異点, 日本光

学会 Optics and Photonics Japan 2014,  
筑波大学東京キャンパス文京校舎(東京都・文京区) (2014. 11. 5-7) (シンポジウム招待講演)

- ⑮ Y. Miyamoto: Towards analysis and manipulation of orbital angular momentum entangled photon pairs with a path interferometer system, 23rd International Laser Physics Workshop (LPHYS '14), Sofia (Bulgaria) (2014. 7. 14-18) (Invited paper).
- ⑯ 舘野博直, 宮本洋子, 亀井健: 外部共振器付き半導体レーザーの性能評価の研究, 第8回情報フォトンクス研究会関東学生研究論文講演会, 電気通信大学(東京都・調布市) (2014. 3. 4)
- ⑰ 亀井健, 宮本洋子, 舘野博直, ブランダーヴァナム・マールティ・マノージ: 光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出のためのホログラム作成についての研究, 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2013, 奈良県新公会堂(奈良県・奈良市) (2013. 11. 12-14)
- ⑱ Y. Miyamoto: Scalar and vector singularities in a birefringent interferometer, 11th International Conference on Correlation Optics, Chernivtsi (Ukraine) (2013. 9. 18-21) (Invited paper).
- ⑲ Y. Miyamoto: Anharmonicity in the detection of orbital angular momentum entangled photon pairs and photon counting holography, 22nd International Laser Physics Workshop (LPHYS '13), Prague (Czech Republic) (2013. 7. 15-19) (Invited paper).
- ⑳ 宮本洋子: 光 vortex の基礎と応用, 日本顕微鏡学会超分解能電子顕微鏡分科会第8回研究会「vortex ビームとその可能性」東京八重洲ホール(東京都・中央区) (2013. 3. 4) (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<http://www.qopt.es.uec.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮本 洋子 (MIYAMOTO, Yoko)

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: 50281655

### (2) 連携研究者

竹内 繁樹 (TAKEUCHI, Shigeki)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80321959

### (3) 海外研究協力者

MOLINA-TERRIZA, Gabriel

Macquarie 大学(オーストラリア)・Faculty  
of Science・ARC Future Fellow