

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分
平成29年3月23日現在

光量子回路を用いた大規模量子もつれ状態の実現と応用

Realization and application of large-scale quantum entangled states using photonic quantum circuits

課題番号：26220712

竹内 繁樹 (Takeuchi Shigeki)

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

本研究では大規模量子もつれ状態の実現に向け、単一光子源や光量子回路、オンチップ光量子回路などの研究を進めている。これまでに、余剰光子を抑制した単一光子源の実現や制御スワップゲートの実現、光量子回路を用いた「量子シャッター」の実現、世界最高クラスの光変調特性を持つ有機無機ハイブリッド素子、共振器内蔵ナノ光ファイバの実現などの成果を得た。

研究分野：量子工学、量子情報科学

キーワード：量子コンピュータ、ナノフォトニクス、光導波路、光子

1. 研究開始当初の背景

光子は、光ファイバ等で長距離伝送が可能であるなど、量子情報通信・処理や計測応用上、有力な情報担体である。なかでも、複数の光子が複数モードに存在する「多光子多モード状態」による大規模量子もつれ状態の実現は、ボソンサンプリングや量子計測の観点からも、近年注目を集めている。

2. 研究の目的

本研究では、10光子程度の大規模量子もつれ状態の実現に向けて、まず、余剰光子を抑制した単一光子源を、既存光学部品を組み合わせることで光学定盤上での実現を目指す。さらにその小型化に向け、窒化シリコン光導波路によるオンチップ光子源やナノ光ファイバ単一光子源の研究を進めるとともに、超高感度光量子計測への応用を試みる。

3. 研究の方法

京大竹内グループ、(光量子回路)、九大横山グループ(光導波路作成)、広大ホフマングループ(理論)が連携して実施した。具体的には、デスクトップ光量子回路(余剰光子発生を抑制された伝令付き単一光子源の実現と量子干渉など)、オンチップ光量子回路(窒化シリコン光導波路と有機光非線形材料のハイブリッド素子によるオンチップ単一光子源の研究)、ナノ光ファイバ光子源(「ナノ光ファイバ」に単一発光体を結合させた高効率単一光子源の研究)、理論・解析(多光子量子もつれ状態の評価や計測応用)の各項目について研究を行った。

4. これまでの成果

● 余剰光子を抑制した単一光子源の実現と光子のシリアルパラレル変換の実証

「光源の多重化」と「カスケードさせた光子検出器による、発生光子対数の識別」の双方を組み合わせたハイブリッド型伝令付き単一光子源を、世界で初めて実現した。そして従来法に比べ、複数光子の発生率を、44%に抑制されていることを確認した。さらに、電気光学素子により、伝令付き単一光子源から発生される単一光子列を複数の経路にルーティングする「シリアルパラレル変換器」の実験にも成功した。

● 制御 SWAP ゲート光量子回路の実現

外部入力光子に対する量子制御 SWAP ゲート操作を実現する光量子回路を世界で初めて実現した。量子制御 SWAP ゲートとは、3入力、3出力の量子ゲートであり、制御量子ビットが1のときのみ、2つの標的量子ビット間の状態を入れ替える操作を行う。我々は、この量子制御 SWAP ゲートの実現に外部から未知の状態の光子を入力できるものとして、初めて実現することに成功した。この量子ゲートは、量子回路の簡約化や「量子指紋認証」などへの応用が期待できる。

● 量子シャッターの検証実験

光子の2重スリット干渉実験は「粒子性と波動性」の両立を示す顕著な例として有名な実験である。これに対して、Aharonov と Vaidman は、もしも複数の位置に関して重ね合わせ状態をとりうる「量子シャッター」が

存在すれば、量子シャッターの状態が、初期状態とはことなる特定の重ね合わせ状態に変化した場合には、1個のシャッターを用いるだけで、2つのスリットに入射する光子を、完全にはねかえせることを理論的に示した。しかし、「量子シャッター」の実現は困難であり、実験的検証はなされてこなかった。我々は、光量子回路を用いてこの量子シャッター実験の検証に初めて成功した。

● オンチップ光量子回路にむけたリング共振器、構想区変調デバイスの実現

九州大学横山グループの作成した、 $Q=50,000$ の Si_3N_4 リング共振器によって、実現4光波混合にともなう光子対発生にともなう非線形出力を確認した。さらに横山グループは、 Si_3N_4 と TiO_2 のハイブリッド構造を考案、 $Q=155,000$ のリング共振器の作成にも成功した。さらに光変調の高効率化の研究を進め、電気光学特性 TiO_2 スロット導波路と有機ポリマーによるハイブリッド変調素子の実現に成功、 $r_{33}=140 \text{ pm/V}$ を達成した。これは、無機 E/O デバイスの特性を大きく超え、世界最高レベルの光変調特性を示す結果である。

● ナノファイバブラッグ共振器を用いた光子源の実現

光ファイバの一部をテーパ状に引き延ばした「ナノ光ファイバ」に、集束イオンビームを用いて加工し、ブラッグ共振器を作り込んだ「ナノファイバブラッグ共振器(NFBC)」を実現、さらに単一の量子ドットを NFBC の共振器部分に結合させた、ハイブリッド光子源を構築、量子ドットからの発光が、パーセル効果により 2.7 倍に増強されていることを確認した。

● 量子もつれ光を用いた超高分解能 2 光子量子干渉縞の観測

我々は、量子もつれ光を用いた 2 光子干渉により、分解能 $0.54 \mu\text{m}$ に相当する 2 光子量子干渉縞を実現、また、群速度分散耐性を実証した。将来の超高分解能 OCT の実現も期待される成果である。

● 多光子量子干渉と光子数分布の関係に関する研究

広島大学ホフマングループは、量子統計を分析する新しい方法を開発し、量子コヒーレンスと決定論的ダイナミクスとの間の関係を発見、この新しい解析方法を多光子量子干渉の問題に適用し、多光子量子干渉縞と入力光子数分布との関係を解析した。この新しい理論は、2つの経路干渉計における位相シフトの作用に基づいて、縞の数およびそれらの周期性をうまく説明することが可能である。

5. 今後の計画

本プロジェクトはこれまで順調に進展しており、予定を超える成果も得られている。今後は、(1)ハイブリッド伝令付き単一光子源の性能向上、シリアルパラレル変換の高度化。(2)量子フーリエ変換を利用した、多モード多光子状態もつれ評価法の実現。(3) Si_3N_4 リング共振器光子対源の評価と高精度化、有機無機ハイブリッド変調素子との結合。(4)ナノファイバブラッグ共振器の Q 値の向上と、hBNなどを結合した高効率単一光子源の実現。(5)多モード多光子状態の量子もつれに関する理論の研究、多モード系の量子統計の研究、などを進める。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む) 査読付き論文 計 26 報のうち主要な例

- T. Kiyohara, R. Okamoto, and S. Takeuchi, "Realization of multiplexing of heralded single photon sources using photon number resolving detectors", **Optics Express**, Vol. 24, 27288-27297, 2016.
- R. Okamoto and S. Takeuchi, "Experimental demonstration of a quantum shutter closing two slits simultaneously", **Scientific Reports**, Vol. 6, 35161(1-10), 2016.
- W. Schell, H. Takashima, S. Kamioka, Y. Oe, M. Fujiwara, O. Benson, and S. Takeuchi, "Highly Efficient Coupling of Nanolight Emitters to a Ultra-Wide Tunable Nanofibre Cavity", **Scientific Reports**, Vol. 5, 9619(1-5), 2015.
- F. Qiu, A. M. Spring, and S. Yokoyama, "Athermal and high-Q hybrid TiO_2 - Si_3N_4 ring resonator via an etching-free fabrication technique", **ACS Photonics**, Vol. 2, 405-409, 2015.
- H. F. Hofmann, K. Hibino, K. Fujiwara, and J. Wu, "Quantum effects in the interference of photon number states", **Physical Review A**, Vol. 94, 043809(1-11), 2016.

受賞 計 6 件のうち主な例

- 竹内繁樹、量子光学、量子情報、量子非線形光学などの実験的研究、第 17 回光・量子エレクトロニクス業績賞 (宅間宏賞)、2016 年 3 月 19 日。
- 竹内繁樹、光子を用いた量子情報通信処理・量子計測の先駆的研究、第 33 回大阪科学賞、2015 年 10 月 28 日。
- X. Cheng, Best Poster Award, 12th International Conference on Nano-Molecular Electronics, Kobe, 2016 年 12 月 14 日。

ホームページ等

<http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>