

令和元年6月9日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220712

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Realization and Application of Large-scale Quantum Entangled States Using Photonic Quantum Circuits

研究代表者

竹内 繁樹 (Takeuchi, Shigeki)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：80321959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 151,300,000円

研究成果の概要(和文)：大規模量子もつれ状態の実現に向け、「余剰光子の抑制された伝令付き単一光子源」、「光子のシリアルパラレル変換」の実証実験に成功、さらに大規模もつれ状態の検証を、従来に比べ大幅に簡便に可能な新手法を提案、実証した。また世界初の「量子シャッター」、「量子制御SWAPゲート操作」などの光量子回路を実現した。オンチップ光量子回路に関し、高Q値リング共振器を実現し光子対発生に成功、また有機・無機ハイブリッドデバイスによる広帯域変調にも成功した。そして、微細加工を駆使した「ナノファイバブリッグ共振器」を実現し、各種単一発光体とのハイブリッド単一光子源も実現するなど、様々な成果を得ることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子力学の基本的な原理を、情報通信・処理に応用する、量子情報科学が急速に発展している。その量子情報の担体として光子は、優れた制御性や、量子状態を保ったまま伝送が可能という特徴を持つ。これらの光子を効率よく生成し、多数の光子の量子相関を制御することで、従来の光計測の感度限界を超え、また量子通信や量子コンピューティングの応用が期待されている。本研究では、そのための様々な基盤的技術が開拓された。また、新たな光センシング応用など、当初予測を超える成果も得られた。

研究成果の概要(英文)：In order to realize large-scale entangled state, we have successfully demonstrated the heralded single photon with suppressed excess noise photons and the serial-parallel conversion of heralded single photons. Furthermore, we proposed and demonstrated a method to verify the large-scale entangled state much more simply than conventional methods. In addition, the world's first "quantum shutter" and "quantum controlled SWAP gate operation" have been realized using photonic quantum circuits. For the on-chip photonic circuit, we realized high-Q ring resonators and also observed photon pair generation. Furthermore, we realized broadband modulation in organic-inorganic hybrid devices. And we also realized high-quality nano-fiber Bragg cavity making full use of nano-scale microfabrication, and also realized hybrid single photon sources using various single light emitters.

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 量子計測 量子センシング

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子力学の基本的な原理を、情報通信・処理に応用する、量子情報科学が急速に発展している。その量子情報の担体として光子は、優れた制御性や、量子状態を保ったまま伝送が可能という特徴を持つ。申請者は、1990年代後半に単一光子と線形光学素子による量子アルゴリズムの実装を提案・検証、その後複数光子間の量子ゲート素子の提案・実証し、光量子回路の研究を推進してきた。その光量子回路の応用として、最近、Aaronson らによって理論的に提案された「ボソンサンプリング」と呼ばれる新しい問題が注目されている。光子数 N に対する多光子干渉確率の計算は、NP完全問題よりも困難なクラスに属することを示したもので、量子光学・量子情報だけでなく、計算の複雑性とはなにかという計算機科学の根本問題とも密接な関連をもつ。しかし、その後なされた検証実験は 2~4 個の光子を用いた最も初期的な原理検証でしか無く、光子数の増大は非常に重要な課題である。

また、光量子回路による多光子もつれの実現は、量子計測への応用にも画期的な意味を持つ。申請者らは、多光子もつれ状態を利用した、標準量子限界をこえる位相感度を実現、その成果を発展させ、量子もつれ光子対を利用した、微分干渉顕微鏡である「量子もつれ顕微鏡」を世界ではじめて実現するなどの成果を得ていた。もつれ状態の光子数が増大すれば、量子計測の感度の飛躍的な向上も期待される。

2. 研究の目的

本研究では、古典情報処理の限界に迫る、光子 10 個程度による大規模ボソンサンプリングの実現や、生成された多光子もつれ状態による、古典限界を凌駕する量子計測の実現を目指し、そのために必要となる「余剰光子の抑制された伝令付き単一光子源」、「光子のシリアルパラレル変換」の実現を目的とした。さらに現在のデスクトップ上での光学部品を用いた実装の問題であるサイズの増大の解決を目指し、光スイッチなども集積可能な「オンチップ光子源」の実現や、「ナノ光ファイバ光子源」の研究を進めた。

また、将来のさらなる光量子回路やもつれ光源の小型化を旨とする「オンチップ光子源」では、可視から中赤外まで広い透明領域を持つ、窒化シリコン系材料による実現を目指した。さらに、「ナノ光ファイバ光子源」については、テーパ光ファイバと単一発光体を結合した光子源の、ナノ微細加工を駆使した、飛躍的な性能向上を目指した。

3. 研究の方法

本研究は、京都大学の竹内グループ、九州大学の横山グループ、広島大学のホフマングループの 3 グループが密接に連携しつつ、共同研究として実施した。竹内グループは、デスクトップ型量子回路による単一光子源の開発と評価、光量子回路の新たな応用やボソンサンプリング・量子計測への応用とともに、微小共振器内蔵ナノ光ファイバの開発ならびに単一光子源への応用を実施した。また、横山グループと協力し、オンチップ光量子回路の設計、評価を行った。横山グループは、Si₃N₄ 等や有機・無機ハイブリッドによる集積光導波路を設計・製作ならびに素子評価を担当した。ホフマングループは、光量子回路を用いたボソンサンプリング、量子計測に関する理論構築・解析を担当した。また国際共同研究も実施した。

グループの全体会議を年に 1~2 回開催、進捗状況や課題について共有するとともに、研究の新展開についても議論を行った。

4. 研究成果

この 5 年間の研究により、「余剰光子の抑制された伝令付き単一光子源」、「光子のシリアルパラレル変換」の実証実験に成功した。また、デスクトップ型光量子回路を用いて、世界初の「量子シャッター」の検証実験に成功、Physics Today で紹介された。また、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。

また、Si₃N₄ オンチップ光量子回路に関しては、リング共振器(Q=250,000)を実現、光子対発生にも成功した。さらに、スロット構造を利用した有機・無機ハイブリッドデバイスにおいて、世界最高レベルの電気光学特性や、40GHz 以上の広帯域変調の確認などにも成功した。そして、微細加工を駆使したナノ光ファイバ「ナノファイバブラッグ共振器」を実現、単一発光体からの発光増強も確認した。さらに、量子計測への応用に関して、量子もつれ光を用いた超高分解能 2 光子干渉縞の観測にも成功した。

これらの成果は、Sci. Rep. (IF=4.1) 6 報、Opt. Exp. (IF=3.4) 8 報、Phys. Rev. A (IF=2.9) 5 報、ACS Photonics (IF=6.9) 3 報、Light: Sci.&Appl. (IF=14.1) 1 報を含む 47 報の査読付き論文、70 件の招待講演を含む 276 件の学会講演で発表した。その詳細について以下報告する。

(1) 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 (Optics Express 2016, Optics Express 2017 他)

「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 (OptExp2016)。次に、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」の実験に成功した。実験では、伝令信号の情報を用い、光子を2つの経路に分岐、分岐された光子間での2光子量子干渉にも成功した (OptExp2017, Editor's pick)。

さらに上記2つの技術を組み合わせ、伝令信号のない単一光子列をルーティングする従来法と比べて、光子数に対して指数的に高い効率で多光子並列状態を生成する方法を提案、さらに、その性能を実験で実証することに成功した (国際会議 Quantum2019, 論文投稿予定)。

本プロジェクト申請時の構想の軸をなすこれらのオリジナルな成果により、光子10個程度による大規模ボソンサンプリングの実現に向けて大幅な前進ができた。

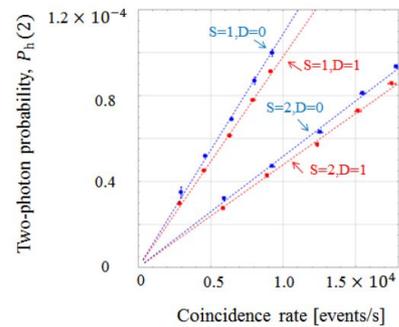


図 1. ハイブリッド型伝令付き単一光子源による複数光子発生率抑制結果。

(2) 多光子多モードシステム間もつれ状態の生成と制御 (New Journal of Physics 2017 他)

これまでボソンサンプリングなどの多光子量子回路の実験では、出力での各モードの光子数分布が主に議論され、量子状態の本質であるコヒーレンスは殆ど着目されなかった。本プロジェクトでは、多光子多モードもつれ状態のコヒーレンスを、モード間フーリエ変換を利用して、従来の量子トモグラフィを利用するより著しく簡便にもつれ合いの存在を検証・評価する理論の構築に広大ホフマングループが成功した (NJP2017)。さらに、京大竹内グループは、量子フーリエ変換回路の安定でコンパクトな実装方法などの工夫で、当該理論を3光子6モードもつれ状態に適用、我々の発案した手法により生成した3光子6モード状態の量子もつれ実証に成功した。(物理学会 2018, 論文投稿予定)。

(3) 制御 SWAP ゲート量子回路の実現 (Scientific Reports 2017)

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。この量子ゲートは、量子回路の簡約化に寄与するだけでなく、「量子指紋認証」や「量子最適複製」などの量子プロトコルに直接適用することができる重要なゲートである。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、出力の3光子が真のもつれ状態 (GHZ) であることも確認した (図 2)。

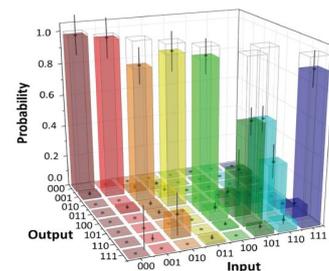


図 2. 制御 SWAP 実験結果。

(4) 量子シャッターの検証実験 (Scientific Reports 2016)

デスクトップ型量子回路を用いて量子シャッター実験の検証に初めて成功した。光子の2重スリット実験は「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、Aharonov と Vaidman は、もしスリットの場所に、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」を設置することを想定、もしも量子シャッターの状態が、初期状態とは異なるあ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、コヒーレンスを保ったまま完全にはねかえせることを理論的に示した。しかし、複数の場所に同時に存在する「量子シャッター」の実現は困難であり、検証実験はなされていなかった。我々は、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、その「反射率」が 0.61 ± 0.027 と、古典限界 (0.5) を超える結果を得ることに成功した。この成果は、一般紙で報道され、Physics Today においても、"Shutting a new door on locality" という記事で紹介された。

(5) オンチップ量子回路 1 リング共振器を用いた単一光子源 (ACS Photonics 2015 他多数)

オンチップ光量子回路の実現に向けて、可視～近赤外域で透明性が高く非線形光学特性の発現が期待できる窒化シリコン(SiNx)光導波路デバイスの作製を、九大横山グループを中心として共同で進めた。リング共振器を応用したチップ作製では、当初の共振特性(Q=50,000)を最大でQ=240,000まで増大し、リング・デバイスの高精度な作製を可能にした。また、独自のLSCVD法(OptMatExp2017)やPECVD法によるSiNxの組成調整、位相整合条件を満たす詳細な導波路設計と作製なども進め、4光波混合発生の実証実験と波長変換効率を高めた有機ポリマーとのハイブリッド型導波路も考案した。また、光信号を高効率で取り出すために、広帯域・高効率の入出力ポート(集光グレーティング)の設計・作製も進め、波長幅76nm(SciRep2015)、入出力効率52%(ApplOpt2018)の光導波路デバイスの作製にも成功した。また京大竹内グループでは、香港城市大学のChu教授との共同研究によって、高Q値高コントラストドーパガラスリング共振器を用いた光子対生成に成功した(ApplPhysExp2019)。実験では、CW光励起で、素子の破壊にいたる直前の入力までの範囲において、2光子吸収にともなう飽和が見られないことも確認、高輝度オンチップ光子対源の道を拓いた。

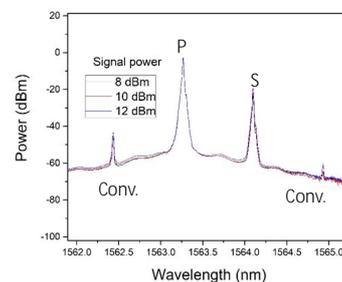


図3. 4光波混合発生の結果。

(6) オンチップ光量子回路 2 有機無機ハイブリッド高速変調デバイス(Scientific Reports 2015 他多数)

オンチップ光量子回路を実現する上で、電気光学を応用した位相制御やその高速変調、および光子光源との集積化は重要である。九大横山グループではシリコン光集積技術と有機ポリマーを応用した高効率・高速のハイブリッド変調素子の作製に成功した(ApplPhysLett2015)。得られたハイブリッド変調素子は、SiNxリングなど光子発生で有用な導波路デバイスとのオンチップ結合も可能であり(OptExp2017)、将来的には量子回路上の光子伝搬コントロールにも展開できることを示した。制御電圧や高速応答でも優れた特性を示し、CMOSドライバで動作可能な変調電圧(1V以下)と、40GHz以上の高周波数応答が可能である(OptExp2017)。また、これらの低電圧・広帯域制を活かした高速光伝送実験では、世界最速の100Gbit/s光信号の発生にも成功した。

(7) ナノファイバブラッグ共振器を用いた光子源の実現(Scientific Repots 2015 他)

光ファイバの一部を、直径を300ナノメートル程度にまで引き伸ばした「ナノ光ファイバ」に、集束されたGaイオンビーム(FIB)を用いて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)」の実現に成功した(図4)。観測されたQ値は300程度で、モード体積が³程度と極めて小さいため、大きな共振器効果が期待できる。さらに、張力を制御することで、20nmと固体微小共振器としては驚異的な共振波長掃引を実現した。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。

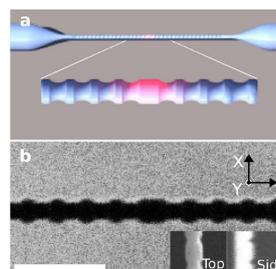


図4. NFBC概念図(上)とデバイスの走査イオン像(下)。白線は1μm。

その後、HeイオンFIBを用いた高精度加工に取り組んだ。GaイオンFIBと同じ160周期のNFBCで、Q値を300から450まで増大させることに成功した。また、640周期NFBCで、4170以上の高Q値を得ることに成功した(OptExp2019)。この改良されたNFBCに、発光体を結合させる実験を行い、発光増強と見られる発光ピークを確認した。

他に、新たな単一発光体のナノファイバとの結合にも取り組んだ。ワイドバンドギャップ薄膜である、ヘキサゴナル窒化ホウ素(hBN)欠陥中心単一発光体とのハイブリッド単一光子源(ACS Photonics 2017)や、単一窒素欠陥(NV)中心含有ダイヤモンドナノ結晶とのハイブリッド単一光子源を開発、NV中心の電子スピンを、光検出磁気共鳴を用いて検出することにも成功した(Nanotechnology, 2016)。また、量子科学技術研究開発機構と共同で、シリコンイオンをダイヤモンドナノ結晶に注入することで、シリコン欠陥(SiV)中心含有ダイヤモンドナノ結晶の作製も実現した。

また、従来法では困難であった、ミリメートル以上の広い観察領域中に存在する「ナノ構造」の高速検出という課題に対し、10nm以下の垂直方向分解能と光の波長以下の水平方向分解能で広範囲スキャン可能な、ナノ光ファイバを用いたセンシング手法を提案・実現した。

(8) 多光子量子干渉と光子数分布の関係の研究(Eur. Phys. J. 2016, Phys. Rev. A 2016)

多光子量子干渉の問題は、多数の自由度の量子化を伴うため理論的に困難である。広大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した(EurPhysJ2016)。この成果は、EPJ highlight に採択、“The

role of statistics in quantum scale observation explains microscale behavior” と題して EPJ ホームページで紹介され、**Phys. Org** や **Science News** などの海外主要科学ニュースサイトで報道された。さらにこの新しい解析方法を多光子干渉に適用、多光子量子干渉縞と入力光子数分布との関係を特定した (PhysRevA2016)。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簡明に説明することが可能である。

(10) 量子もつれ光等を用いた量子計測に関する研究 (Scientific Reports 2015, Phys. Rev. A 2017 他)

光計測の一つとして、低コヒーレンス干渉を用いた光コヒーレンストモグラフィ (以下古典 OCT) は、眼科などでも広く用いられている技術である。しかし、その分解能向上に向け、光源の帯域を広くすると、媒質中の群速度分散により分解能がかえって劣化するという問題があった。古典 OCT の分解能世界記録は $0.75 \mu\text{m}$ であるが、これは分散媒質が存在しない空気中での記録であった。今回我々は、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**として、科学新聞、京都新聞等でも広く報道された。また、有限の個数の光子の量子状態を、標準量子限界の精度で測定する手法として、我々は大阪大学の藤原彰夫教授らと共同で、**任意の光子量子ビット(3 パラメータ)の適応量子状態推定を世界で初めて実現、従来一般に用いられている量子トモグラフィを超える感度を達成した (PhysRevA2017)**。また、一般に推定対象は連続的に変化するため、そのような入力にも適用可能な「連続適応量子状態推定」を提案、特許出願を行った。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 47 件) すべて査読有り。

K. Sugiura, R. Okamoto, L. Zhang, L. Kang, J. Chen, P. Wu, S T. Chu, B E. Little and S. Takeuchi, An on-chip photon-pair source with negligible two-photon absorption, **Appl. Phys. Exp.**, Vol.12, 2019, pp.022006/1-3, 10.7567/1882-0786/aafaOf

H. Takashima, A. Fukuda, H. Maruya, T. Tashima, A W. Schell and S. Takeuchi, Fabrication of a nanofiber Bragg cavity with high quality factor using a focused helium ion beam, **Opt. Exp.**, Vol.27, No.5, 2019, pp.6792-6800, 10.1364/OE.27.006792

T. Kiyohara, R. Okamoto and S. Takeuchi, Serial-parallel conversion for single photons with heralding signals, **Opt. Exp.**, , Vol.25, No.26, 2017, pp.32443-32450, 10.1364/OE.25.032443

X. Cheng, J. Hong, A. M. Spring, and S. Yokoyama, Fabrication of high-Q factor ring resonator using LSCVD deposited Si_3N_4 film, **Opt. Mat. Exp.**, Vol.7, 2017, pp.2182-2187, doi.org/10.1364/OME.7.002182

R. Okamoto, S. Oyama, K. Yamagata, A. Fujiwara and S. Takeuchi, Experimental demonstration of adaptive quantum state estimation for single photonic qubits, **Phys. Rev A.**, Vol. 96, 2017, pp.022124/1-8, 10.1103/PhysRevA.96.022124

T. Ono, R. Okamoto, M. Tanida, H.F. Hofmann and S. Takeuchi, Implementation of a quantum controlled-SWAP gate with photonic circuits, **Scientific Reports**, Vol.7, 2017, pp.45353/1-12, 10.1038/srep45353

A. Schell, H. Takashima, T. T. Tran, I. Aharonovich and S. Takeuchi, Coupling quantum emitters in 2D materials with tapered fibers, **ACS Photonics**, Vol.4, 2017. pp.761-767, 10.1021/acsp Photonics.7b00025

F. Qiu, A. M. Spring, H. Miura, D. Maeda, M. Ozawa, K. Odoi, and S. Yokoyama, Athermal Hybrid Silicon/Polymer Ring Resonator Electro-optic Modulator, **ACS Photonics**, Vol.3,2016, pp.780-783, DOI:0.1021/acsp Photonics.5b00695

T. Kiyohara, R. Okamoto and S. Takeuchi, Realization of multiplexing of heralded single photon sources using photon number resolving detectors, **Opt. Exp.**, Vol.24, 2016, pp. 27288-27297, org/10.1364/OE.24.027288

R. Okamoto and S. Takeuchi, Experimental demonstration of a quantum shutter closing two slits simultaneously, **Scientific Reports**, Vol.6, 2016, pp.35161/1-10, 10.1038/srep35161

A. Schell, H. Takashima, S. Kamioka, Y. Oe, M. Fujiwara, O. Benson and S. Takeuchi, Highly Efficient Coupling of nanolight emitters to an ultra-wide tunable nanofiber cavity, **Scientific Reports**, Vol.5, 2015, pp.9619/1-5, 10.1038/srep09619

[学会発表] (計 276 件)

清原孝行、岡本亮、竹内繁樹、伝令信号を用いた単一光子列のシリアルパラレル変換、2019 年第66回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2019、第3回応用物理学会フォトニクス奨励賞受賞記念招待講演

S. Yokoyama, G. Lu, X. Cheng, F. Qiu, Long-term Stable Electro-optic Polymers for Hybrid Integration, 2019 OFC, San Diego, USA, 2019 招待講演

S. Takeuchi, Photonic quantum circuits and quantum sensing, The 13th Japan-US Joint Seminar

on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Ishikawa, Japan, 2018, **招待講演**
竹内繁樹、光子を用いた量子計測とその展望、日本物理学会 領域4シンポジウム「量子テクノロジーによる計測技術の最前線」、東京理科大学、2017、**招待講演**
S. Takeuchi, Photonic quantum information and metrology : high-resolution quantum optical coherence tomography and a photonic quantum circuit for CSWAP, Quantum 2017, Torino, Italy, 2017, **招待講演**
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63回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2015、第17回光・量子エレクトロニクス業績賞（宅間宏賞）受賞記念**招待講演**

〔図書〕(計 9 件)

高島秀聡、竹内繁樹、パリティ、マイクロ光マニピュレーション共振器で光子を操る、Vol. 33, No. 8, pp. 26-32, 2018.
竹内繁樹、日本物理学会誌、多様な量子もつれの実現と新たな応用、Vol. 69, No. 12, pp. 852-859, 2014.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：光子の高精度状態計測方法
発明者：竹内繁樹
権利者：国立大学法人京都大学
種類：特許
番号：特願 2016-243236(P2016-243236)
出願年：2016 年
国内外の別：国内
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等：<http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/>
広報発表と新聞掲載等：(1) 量子シャッターの実現(日本経済新聞2016年10月17日他、Physics Todayに解説記事掲載) (2) 量子もつれ光を用いた狭帯域 2 光子干渉の実現(京都新聞、科学新聞に掲載)。(3) 本プロジェクトに関連する研究紹介(京都新聞に掲載)
アウトリーチ：科学カフェ京都第138回、2017年3月25日「光子のふしぎと量子情報科学」、100名。他 3 件
受賞：幸いにも、研究代表者の竹内が大阪科学賞(2015)、応用物理学会第17回光・量子エレクトロニクス業績賞（宅間宏賞）を、連携研究者の岡本が科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞(2017年)を、また参画学生も、清原孝行君が応用物理学会第3回フォトンクス奨励賞したのをはじめ、これら併せて計12件の賞を授与された。

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：横山 士吉
ローマ字氏名：(YOKOYAMA, Shiyoshi)
所属研究機関名：国立大学法人九州大学
部局名：先導物質化学研究所
職名：教授
研究者番号(8桁)：00359100
研究分担者氏名：Hofmann Holger. F
所属研究機関名：国立大学法人広島大学
部局名：先端物質科学研究科
職名：准教授
研究者番号(8桁)：90379909

(2)研究協力者

研究協力者氏名：岡本 亮
ローマ字氏名：(OKAMOTO, ryo)
研究協力者氏名：藤原 正澄
ローマ字氏名：(FUJIWARA, masazumi)
研究協力者氏名：高島 秀聡
ローマ字氏名：(TAKASHIMA, hideaki)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。