

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04445

研究課題名（和文）損失耐性のある量子測定の研究

研究課題名（英文）Research on a loss-tolerant quantum measurement

研究代表者

山本 俊（Yamamoto, Takashi）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：10403130

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、量子インターネットの中核となる損失耐性のある量子測定の要素技術開発および理論研究を行った。特に光子損失に耐性のある量子測定を実現するためには、多重化された光子の量子状態に対する一般化量子測定が必須であり、さらに光通信波長帯で動作する必要がある。本研究課題では、必要なリソースとなる光通信波長帯の多光子エンタングル状態の生成に向けて、タンデム型 type-II 疑似位相整合周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) 導波路を開発し、偏光量子もつれ光子対の生成を実現した。さらに、量子周波数コムを用いた量子もつれ光源による多重化を実現し、それを用いた量子計算手法を新たに提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、量子インターネットや量子コンピュータの実現のために重要な損失耐性をもたせた量子測定の研究である。開発を行った量子もつれ光源を拡張して、多体量子もつれ光子源を実現することで、長距離にわたって量子状態を送信することができ、量子鍵配送などの量子コンピュータに耐性のあるセキュア通信が可能となる。同時に、量子コンピュータを実現することも可能となる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed elemental technology and conducted theoretical research on loss-tolerant quantum measurement, which is the core technology of quantum internet. In order to achieve quantum measurements that are particularly resistant to photon loss, generalized quantum measurements for quantum states of multiplexed photons are essential and need to operate in the optical communication wavelength band. We developed a tandem type-II pseudo-phase-matched periodically poled lithium niobate (PPLN) waveguide to generate a multi-photon entangled state in the telecommunication band, which is a necessary resource, and realized the generation of polarization entangled photon pairs. Furthermore, multiplexing by entangled light source using quantum frequency comb was realized, and a quantum computation using it was proposed.

研究分野：量子情報科学

キーワード：量子光学 量子情報 量子通信 量子インターネット 量子コンピュータ 量子暗号 量子エレクトロニクス 量子ネットワーク

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

量子力学の名著である“Quantum Theory: Concepts and Methods”の著者である A. Peres は、Separability Criterion for Density Matrices”と題した自身の論文[1]において、量子系を測定する際に1回1回個別に測定するよりも、それらをまとめて一括測定を行ったほうが、より量子性を反映した測定結果を得ることが可能であることに言及している。一方で、同じく A. Peres が C. H. Bennett らと共同で執筆した“Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and EPR Channels”と題した論文[2]において提案されている有名な量子テレポーテーションでは、任意の量子状態に対して Bell 測定を1回1回個別に行っても、まとめて行う一括測定を行っても理想的な場合では等価である。この結果は、1回1回個別に行う逐次 Bell 測定がすでに情報理論的な上限を与える最適な操作になっていることから自然に導き出される。一方で、光子損失のように量子系がある確率で失われてしまうような、より現実的な状況では、逐次 Bell 測定よりも効率的な一般化 Bell 測定が存在する可能性は十分にある。実際に、量子中継においては、“All-photonic quantum repeaters”の提案[3]に見られるように、逐次 Bell 測定よりも効率的な一般化 Bell 測定が存在する。我々も、このような一般化 Bell 測定が可能な1つの方法を見出し、世界に先駆けて原理実証実験に成功し、“Experimental time-reversed adaptive Bell measurement towards all-photonic quantum repeaters”と題した論文[4]を発表している。本成果はイギリスの Institute of Physics (IOP)の機関誌 Physics World においても“The quantum internet comes closer”と題したニュース記事[5]になるなど、世界的にも認知される日本を代表する量子インターネットの研究成果となった。

光子損失があるもとの Bell 測定の効率化は、量子テレポーテーションや量子もつれ(エンタングルメント)スワッピングの効率化に直接つながり、ひいては量子インターネットを構築するための量子中継の効率化に直接つながる非常に重要なステップであり、学術的に非常にインパクトが大きい。量子インターネットは量子テレポーテーションの提案当時より検討され、2008年に H. J. Kimble が“The quantum internet,”と題した論文[6]を発表した。より現代的な構想としては、S. Wehner らが“Quantum internet: A vision for the road ahead,”と題した論文[7]を発表している。EUにおいては Quantum Internet Alliance[8]が立ち上がり、アメリカにおいてはエネルギー省(<https://www.osti.gov/biblio/1649002>)を中心に大規模な研究計画の検討が進められ、大規模な予算化が進んだ。これらの取り組みの特徴は、量子物理学の学術的研究を応用的な研究へ導き、更に発展させるための非常に長い道のりを、途中で挫折させずにシームレスにつなぐためのエコシステムの構築にあり、量子物理研究の未来像を提示したことである。このように、研究開始当初は、一般化 Bell 測定の量子インターネットにおける重要性が量子中継を介して認識され、一般化 Bell 測定を現実的な状況において、実現する手法の探索が重要となるとともに、エコシステムに組み込まれることによって、新たな展開も期待されていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、この損失耐性のある一般化 Bell 測定のような量子測定をより現実的な状況で実証するために、長距離光ファイバー通信で用いられる光通信波長帯での動作のための要素技術開発および多重化による高効率化のための要素技術開発、さらに一般化 Bell 測定を更に発展させた量子測定の理論研究を行う。

量子インターネットを形成する基本要素は、(1)様々な物理系で実現される物質量子系 A と光子をエンタングルさせる、(2)物質量子系 B と光子をエンタングルさせる、(3)離れた物質量子系 A と B からこの光子を伝搬させて、中間地点 C でそれらの光子に対して Bell 測定を行い、その結果を A と B に伝える、という一連の操作を行うことで物質量子系 A と B のエンタングルメントを実現する。この操作を、その他の系に拡張することで量子インターネットが実現する。一旦この量子インターネットが実現すると、隣り合う系間の Bell 測定によって、任意の2つの系にエンタングルメントを形成することが可能であり、それによって量子暗号通信等が可能になる。

この一連の操作の中で(3)では系 A からの光子の量子状態を Bell 測定による量子テレポーテーションによって、系 B へ転送し、それによって、系 A と系 B をエンタングルさせている。離れた物質量子系を伝搬する光子を介してエンタングルさせる重要な手法であるが、長距離伝搬には光損失がつきものである。例えば、系 A から中間地点(C)までの光子の透過率を T とすると、系 A と系 B からの光子がどちらも到着する確率は T^2 であり、エンタングルメントの成功率もこれに比例する。したがって1個のエンタングルメントを共有するためには平均 $1/T^2$ 回の繰り返しが必要となる。これは、1回1回個別に Bell 測定を行う逐次 Bell 測定を行うことを仮定した帰結である。この逐次 Bell 測定ではなく、複数回にまたがった一般化 Bell 測定にすることで、効率化が可能である。一般化 Bell 測定には、エンタングルメント生成の多重化が必要であるとともに、我々の論文[4]にも見られるように、測定のためのリソースとして、多体エンタングル状態が必要となる。

これを更に発展させるために、これまでの可視光帯の多体エンタングル状態ではなく、光通信

波長帯での多体エンタングル状態発生が必要であり、その元になる効率的な光通信波長帯の量子もつれ光源の要素技術開発を行う。また、このような量子もつれ光源が利用可能な新たな量子インターネットやそれに関わる量子コンピュータに必要な量子測定の方法を開拓する。

3. 研究の方法

上記の損失耐性のある一般化 Bell 測定を含めた量子測定を実現するためには多重化された量子もつれ光源が重要となる。この多重化には、量子もつれ光源を空間的に複数用意する方法(空間多重化)や周波数多重化のように一つの量子もつれ光源を利用して、周波数コムのように多重化する方法がある。これらの量子もつれ光源を通信波長帯において開発していく。

空間多重化に関しては、効率化を目指した要素技術開発を行う。従来用いられてきた導波路型 PPLN による自発パラメトリック 下方変換 (SPDC)による光通信波長帯の量子もつれ光源では、マッハツェンダー干渉計型やサニャック干渉計型のものが研究されてきたが、光学系の複雑さから損失の低減が難しく、多重度を高くすると、さらに光学系の複雑さが増す。これを回避し、高効率かつコンパクトな量子もつれ光源とすることが、空間多重化の研究課題となる。このために、従来用いられてきた Type0 位相整合(どの光子も偏光が同一)の導波路型 PPLN ではなく、Type-II 位相整合(発生する2つの光子の偏光が直交)の導波路型 PPLN を2つ形成し、それらが重ね合わされて量子もつれ光源となるタンデム構造の導波路型 PPLN を開発し、単一光路の効率的な量子もつれ光源を実現する。周波数多重化に関しては、我々が研究してきた単共鳴導波路型 PPLN[9, 10]によって、一つの光源を用いて、多数の周波数モードに光子対を発生させることのできる量子光周波数コムによる量子もつれ光源を実現する。また、量子もつれ光源を実際に光ファイバーにおいて実証可能な開発環境を確立する。さらに、このような量子光周波数コムによる新しい量子測定の方法を理論的に検討する。

4. 研究成果

タンデム型 Type- 擬似位相整合 PPLN 導波路を用いた量子もつれ光子対生成に関しては、タンデム構造を持つ導波路型 PPLN の設計をおよび開発を行い、波長 780 nm の励起光により通信波長帯の波長 1539 nm および 1582 nm の偏光量子もつれ光子対を生成した[11]。

励起光として用いた波長 780nm のレーザーは、繰り返し周波数 80 MHz、パルス幅 100 fs の Ti:S レーザーである。波長幅を狭帯域化しパルス幅を 3 ps としている。導波路型 PPLN の結晶長は 20 mm であり、前半 10 mm においては、1540 nm と 1582 nm の光子対が生成され、それぞれの偏光が垂直(V)及び水平(H)である。後半の 10 mm では、同じ波長の光子対が生成されるが、各波長に発生する光子の偏光は前半のものと直交している。そのため、波長 1539 nm および 1582 nm に光子対が1つ発生した場合には、偏光量子もつれ光子対となっている。これを空間的に分離するために、生成された光子対はダイクロイックミラー(DM)により2つの光路に分離される。2つの光子は、それぞれバンドパスフィルターによって各中心波長 1539 nm および 1582 nm においてバンド幅 0.15 nm および 0.5 nm に狭帯域化される。最終的に、超伝導ナノ ストリップ 単一光子検出器 (SNSPD)によって検出され、Time-to-digital converter (TDC)により同時計数として測定される。この SNSPD は浜松ホトニクス株式会社と情報通信研究機構により共同開発されたものである。偏光に関する量子状態トモグラフィを行い、生成された量子もつれの評価を行った結果、Bell 状態との忠実度 $F=0.920$ が得られた。また、PPLN 導波路の結合効率 60 % と SNSPD の量子効率 80 % を考慮した結果、得られた量子もつれ光子対の輝度を推定すると 0.921×10^2 cps/mW であった。これは文献[12]の実験から推定した値と比べても約 5 倍大きく、導波路型 PPLN による効率化を示している。

周波数多重化では、広帯域に連続的に発生する SPDC による量子もつれ光子対を波長分割多重(WDM)技術を用いた波長フィルタによって複数の波長多重チャンネルに分割することが行われてきたが、これは波長分割多重(WDM)のモード以外の光子対への大きな損失を伴うため、光子対の輝度の低下に繋がる。本研究課題では、波長分割多重(WDM)のモードに一致する光共振器構造を導波路型 PPLN に対して構築した。これにより、共振器内で発生する共振器増強 SPDC により波長分割多重のモードに一致する周波数コム形状を持った効率的な光子対発生が可能である。また、Sagnac 干渉計を組み合わせることで、偏光量子もつれ光子対発生が実現する。共振器増強 SPDC として両端に反射コーティングを付与した単共鳴型 PPLN 導波路共振器(PPLN/WR)の開発を行い、FSR として 12.5 GHz を得た。これは、高密度波長分割多重(DWDM)技術における 25 GHz 間隔の周波数モードの半分に相当し、DWDM の 16ch フィルターを用いて、分離することができる。これにより、DWDM の各 ch での量子もつれ光子対の評価および配送を行った。その結果、各 ch において 0.81 から 0.96 の高忠実度の偏光量子もつれ光子対を観測することができた[13]。また、これらを利用した長距離光ファイバー通信の実証環境として、都市間光ファイバーでの単一光子伝送実験に成功した[14]。

この周波数多重化の新しい展開の一つとして、時間周波数 GKP 量子ビットへの利用による新しい量子計算手法の発見[15]がある。周波数多重化された単一光子からなる周波数コムモードを量子周波数コムとして、ピーク周波数を半周期分ずらした量子周波数コムを考慮して、それぞれを量子ビットの $|0\rangle$ と $|1\rangle$ として扱うことで、時間周波数 GKP 量子ビットとすることができる。この時間周波数 GKP 量子ビットは上記の周波数多重化光子対から生成することが可能である。また、この時間周波数 GKP 量子ビットの典型的な射影測定のためには、時間分解光子検出器、ビームス

ブリッタおよび光インターリーバを用いることで実現でき、これらの組み合わせで、様々な量子測定が可能となる。この方法の優位な点は、従来は測定のために、光スイッチなどの能動的な光学素子が必要であり、そのために多くの損失が避けられなかったが、受動的な光学素子のみで実現するために、高効率化の可能性が見えてきた点である。また、任意の量子操作が可能であり、誤り耐性型量子計算で必要とされるような低いエラー率を達成できることが分かった。そのため、本研究成果により、新しい損失耐性のある量子測定への可能性も拓けた。

<引用文献>

- [1] A. Peres, Separability Criterion for Density Matrices, *Phys. Rev. Lett.* 77, 1413 (1996).
- [2] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, and W. K. Wootters, Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels, *Phys. Rev. Lett.* 70, 1895 (1993).
- [3] K. Azuma, K. Tamaki, and H.-K.Lo, All-photon quantum repeaters, *Nat. Commun.* 6, 6787 (2015).
- [4] Y. Hasegawa, R. Ikuta, N. Matsuda, et al. Experimental time-reversed adaptive Bell measurement towards all-photon quantum repeaters. *Nat Commun* 10, 378 (2019).
- [5] <https://physicsworld.com/a/the-quantum-internet-comes-closer/> (31 Jan 2019 掲載)
- [6] H. J. Kimble, The quantum internet, *Nature*, 453, 1023, (2008).
- [7] S. Wehner, D. Elkouss, R. Hanson, Quantum internet: A vision for the road ahead, *Science*, 362, eaam9288 (2018).
- [8] <http://quantum-internet.team/>
- [9] R. Ikuta, R. Tani, M. Ishizaki, S. Miki, M. Yabuno, H. Terai, N. Imoto, T. Yamamoto, Frequency-Multiplexed Photon Pairs Over 1000 Modes from a Quadratic Nonlinear Optical Waveguide Resonator with a Singly Resonant Configuration, *Phys. Rev. Lett.*, 123, 193603 (2019).
- [10] T. Yamazaki, R. Ikuta, T. Kobayashi, S. Miki, F. China, H. Terai, N. Imoto, T. Yamamoto, Massive-mode polarization entangled biphoton frequency comb, *Scientific Reports*, 12, 8964 (2022).
- [11] 原大貴、村上翔一、平岡駿佑、小林俊輝、知名史博、三木茂人、寺井弘高、小玉剛史、澤谷恒明、大友昭彦、下井英樹、生田力三、山本俊、タンデム型 type-II 擬似位相整合 PPLN 導波路を用いた偏光エンタングル光子対生成, 第 49 回量子情報技術研究会 (QIT49) 沖縄科学技術大学院大学 講堂 2023/12/17-19
- [12] C-W. Sun, S-H. Wu, J-C. Duan, J-W. Zhou, J-L. Xia, P. Xu, Z. Xie, Y-X. Gong, and S-N. Zhu, Compact polarization-entangled photon-pair source based on a dual-periodically-poled Ti:LiNbO3 waveguide, *Optics Letters* 44, 22, 5598 (2019).
- [13] R. Fujimoto, S. Murakami, T. Kobayashi, R. Ikuta, S. Miki, S. Miyajima, M. Yabuno, F. China, H. Terai, N. Imoto, T. Yamamoto, Entangled photon pair detection by superconducting nanowire single-photon detectors with a single-flux-quantum coincidence circuit, *Appl. Phys. Express*, 14, 10, 102001 (2021).
- [14] 小林 俊輝, 生田 力三, 山本 俊, 都市間光ファイバーでの単一光子伝送実験, 第 49 回量子情報技術研究会 (QIT49) 沖縄科学技術大学院大学 講堂 2023/12/17-19
- [15] T. Yamazaki, T. Arizono, T. Kobayashi, R. Ikuta, T. Yamamoto, Linear Optical Quantum Computation with Frequency-Comb Qubits and Passive Devices, *Phys. Rev. Lett.*, 130, 20, 200602 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamazaki Tomohiro, Ikuta Rikizo, Kobayashi Toshiki, Miki Shigehito, China Fumihito, Terai Hiroataka, Imoto Nobuyuki, Yamamoto Takashi	4. 巻 12
2. 論文標題 Massive-mode polarization entangled biphoton frequency comb	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8964-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-12691-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Fujimoto Rintaro, Yamazaki Tomohiro, Kobayashi Toshiki, Miki Shigehito, China Fumihito, Terai Hiroataka, Ikuta Rikizo, Yamamoto Takashi	4. 巻 30
2. 論文標題 Entanglement distribution using a biphoton frequency comb compatible with DWDM technology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 36711 ~ 36711
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.469344	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujimoto Rintaro, Murakami Shoichi, Kobayashi Toshiki, Ikuta Rikizo, Miki Shigehito, Miyajima Shigeyuki, Yabuno Masahiro, China Fumihito, Terai Hiroataka, Imoto Nobuyuki, Yamamoto Takashi	4. 巻 14
2. 論文標題 Entangled photon pair detection by superconducting nanowire single-photon detectors with a single-flux-quantum coincidence circuit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 102001 ~ 102001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac211e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ikuta Rikizo, Yokota Masayo, Kobayashi Toshiki, Imoto Nobuyuki, Yamamoto Takashi	4. 巻 17
2. 論文標題 Optical Frequency Tweezers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 034012 ~ 034012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.17.034012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Murakami Shoichi, Fujimoto Rintaro, Kobayashi Toshiki, Ikuta Rikizo, Inoue Asuka, Umeki Takeshi, Miki Shigehito, China Fumihiro, Terai Hiroataka, Kasahara Ryoichi, Mukai Tetsuya, Imoto Nobuyuki, Yamamoto Takashi	4. 巻 31
2. 論文標題 Quantum frequency conversion using 4-port fiber-pigtailed PPLN module	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 29271 ~ 29271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.494313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Roga Wojciech, Ikuta Rikizo, Horikiri Tomoyuki, Takeoka Masahiro	4. 巻 108
2. 論文標題 Efficient Dicke-state distribution in a network of lossy channels	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 12612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.108.012612	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamazaki Tomohiro, Arizono Tomoaki, Kobayashi Toshiki, Ikuta Rikizo, Yamamoto Takashi	4. 巻 130
2. 論文標題 Linear Optical Quantum Computation with Frequency-Comb Qubits and Passive Devices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 200602-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.200602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計33件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 山本俊, 藤井啓祐
2. 発表標題 量子情報技術
3. 学会等名 政策セミナー 国立国会図書館 調査及び立法考査局 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林祥吾, 村上翔一, 小林俊輝, 知名史博, 三木茂人, 寺井弘高, 小玉剛史, 澤谷恒明, 大友昭彦, 下井英樹, 生田力三, 山本俊
2. 発表標題 タンデム型 type-II 疑似位相整合PPLN 導波路による非縮退光子対生成
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本俊
2. 発表標題 コヒーレント周波数変換と量子コンピュータ
3. 学会等名 学振182委員会「テラヘルツ波科学技術と産業開拓」第51回研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本俊
2. 発表標題 量子通信・ネットワーク
3. 学会等名 応用物理学会 量子エレクトロニクス研究会 「量子エレクトロニクス～基礎から応用まで～」 （招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本俊, 生田力三
2. 発表標題 量子コンピュータや量子ネットワークと超伝導ナノワイヤ単一光子検出器システム
3. 学会等名 浜松ホトニクス量子関連講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本俊
2. 発表標題 量子インターネットとセキュリティ
3. 学会等名 Security Days Spring 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta, Masayo Yokota, Toshiki Kobayashi, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Optical frequency conversion using a resonator that is pre-resonated only to the desired converted frequency
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Generation and manipulation of photonic quantum states in the frequency domain
3. 学会等名 the 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Quantum network with photons
3. 学会等名 2022 Japan-Taiwan Advanced Quantum Technology Research and Development Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Generation and manipulation of photonic quantum states for quantum network
3. 学会等名 Quantum Innovation 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta
2. 発表標題 Application of PPLN Waveguide Resonators to Quantum Information Processing
3. 学会等名 12th Annual World Congress of Nano Science & Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本俊
2. 発表標題 量子インターネットから量子サイバースペース
3. 学会等名 第36回 大阪大学大学院基礎工学研究科 産学交流会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shoichi Murakami, Rintaro Fujimoto, Toshiki Kobayashi, Rikizo Ikuta, Asuka Inoue, Takeshi Umeki, Ryoichi Kasahara, Tetsuya Mukai, Shigehito Miki, Shigeyuki Miyajima, Masahiro Yabuno, Fumihiro China, Hiroataka Terai, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto
2. 発表標題 A fiber-coupled frequency converter based on a PPLN waveguide for quantum internet
3. 学会等名 第45回量子情報技術研究会(QIT45)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoki Yamazaki, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto
2. 発表標題 スタビライザー形式に基づく線形光学回路の解析
3. 学会等名 第45回量子情報技術研究会(QIT45)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本俊
2. 発表標題 ネットワーク型量子コンピュータ/量子インターネットの研究開発について
3. 学会等名 一般社団法人 電子情報技術産業協会 非ノイマン型情報処理へ向けたデバイス技術分科会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎友裕, 生田力三, 山本俊
2. 発表標題 スタビライザー形式に基づく線形光学回路の解析
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 生田力三, 横田雅世, 小林俊輝, 井元信之, 山本俊
2. 発表標題 光周波数ピンセット
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshiki Kobayashi, Tomohiro Yamazaki, Rintaro Fujimoto, Shigehito Miki, Fumihiro China, Hiroataka Terai, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Polarization-entangled biphoton frequency comb for DWDM technology
3. 学会等名 Quantum Innovation 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Potential tools for sensing applications from quantum-network technologies
3. 学会等名 EMERGING AND DISRUPTIVE TECHNOLOGIES TO ENHANCE DISASTER RESILIE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Yamamoto
2. 発表標題 Photonic quantum information processing in frequency domain
3. 学会等名 Okinawa School in Physics 2023: Coherent Quantum Dynamics (CQD 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Rikizo Ikuta
2. 発表標題 Second-order duality of light and its nonclassical complementarity
3. 学会等名 Cleo/Europe-EQEC (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Toshiki Kobayashi, Tomohiro Yamazaki, Rintaro Fujimoto, Shigehito Miki, Fumihiro China, Hirotaka Terai, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto
2 . 発表標題 DWDM-compatible entanglement distribution using a biphoton frequency comb
3 . 学会等名 Cleo/Europe-EQEC (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Rikizo Ikuta, Masayo Yokota, Toshiki Kobayashi, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto
2 . 発表標題 Singly resonant frequency conversion for manipulation of a frequency-multiplexed single photon
3 . 学会等名 Cleo/Europe-EQEC (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Shoichi Murakami, Shogo Hayashi, Toshiki Kobayashi, Fumihiro China, Shigehito Miki, Hirotaka Terai, Tsuyoshi Kodama, Tsuneaki Sawaya, Akihiko Ohtomo, Hideki Shimoi, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto
2 . 発表標題 Polarization-entangled photon pair generation with a tandem type-II quasi-phase-matched PPLN waveguide
3 . 学会等名 12th Advanced Lasers and Photon Sources Conference (ALPS2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Rikizo Ikuta, Tomohiro Yamazaki, Rintaro Fujimoto, Toshiki Kobayashi, Shigehito Miki, Fumihiro China, Hirotaka Terai, Takashi Yamamoto
2 . 発表標題 Frequency-multiplexed entanglement distribution with a massive-mode biphoton frequency comb generator
3 . 学会等名 12th Advanced Lasers and Photon Sources Conference (ALPS2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 生田力三
2. 発表標題 分極反転デバイスの量子インターネットへの応用
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 村上 翔一、小林 俊輝、三木 茂人、知名 史博、寺井 弘高、山本 俊、生田 力三
2. 発表標題 変換光のみを共振器増強した量子周波数変換実験
3. 学会等名 第49回量子情報技術研究会（QIT49）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林 俊輝、生田 力三、山本 俊
2. 発表標題 都市間光ファイバーでの単一光子伝送実験
3. 学会等名 第49回量子情報技術研究会（QIT49）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹中 真一、小林 俊輝、山本 俊、生田 力三
2. 発表標題 マッハツェンダー干渉計型の偏光無依存な量子周波数変換モジュール
3. 学会等名 第49回量子情報技術研究会（QIT49）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原大貴、村上翔一、平岡駿佑、小林俊輝、知名史博、三木茂人、寺井弘高、小玉剛史、澤谷恒明、大友昭彦、下井英樹、生田力三、山本俊
2. 発表標題 タンデム型 type-II 擬似位相整合 PPLN 導波路を用いた偏光エンタングル光子対生成
3. 学会等名 第49回量子情報技術研究会 (QIT49)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本俊
2. 発表標題 光が可能にする量子コンピュータから量子ネットワーク
3. 学会等名 浜松ホトニクス PHOTON FAIR 2023 特別セミナー (招待講演) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本俊
2. 発表標題 超伝導光子検出器による量子情報技術
3. 学会等名 超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 生田力三、有園友研、小林俊輝、山本俊
2. 発表標題 周波数多重量子通信のためのチャンネル切替可能な光周波数変換
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	小林 俊輝 (Kobayashi Toshiki) (60834091)	大阪大学・量子情報・量子生命研究センター・助教(常勤) (14401)	
研究 分担者	生田 力三 (Ikuta Rikizo) (90626475)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------