

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02652

研究課題名（和文）量子デバイス間遠隔ファイバーリンクシステムの構築

研究課題名（英文）Development of a remote fiber link system between quantum devices

研究代表者

堀切 智之（Horikiri, Tomoyuki）

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40530275

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、量子通信の長距離化用量子中継技術開発に向けた遠隔量子デバイス間リンクの研究を実施した。特に量子もつれ光源と希土類添加物量子メモリを各々周波数安定化し、10km光ファイバー伝送後に接続するシステム構築に成功した。これによって中継に典型的な距離があっても量子デバイス接続が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究技術は量子中継の実装につながる可能性があり、その実装を通じて量子コンピュータ同士の量子通信を介した接続や、安全な通信を任意の2地点間で可能にすると期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have studied on a link of remote quantum devices for the development of quantum repeater technology that contributes to long-distance quantum communication. In particular, we have succeeded in constructing a system in which a quantum entangled photon source and a rare-earth doped Pr:YSO quantum memory are each frequency-stabilized and connected via wavelength conversion after 10 km optical fiber transmission.

研究分野：量子情報

キーワード：量子通信 量子中継 量子メモリ 量子インターネット

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

量子通信長距離化には量子中継が必要である。量子中継は光の量子状態を遠方まで送る量子光源、光の量子状態を一時保存し量子中継操作を効率的に実施できるようにする量子メモリをコアとしたシステムである。これまで量子光源、量子メモリなどの各要素技術は研究が進んできたが、遠隔地に離れた状況で光と物質の量子系をつなぐ研究は進展があまりなかった。

2. 研究の目的

上記の背景にもとづき、量子中継実装に向け量子光源(2光子源)と量子メモリ(希土類添加物)をつなぐリモートシステムの構築を目的とした。

量子メモリは通常物質内量子系の基底準位 励起準位間遷移を利用して、光子を吸収もしくは発光する。この遷移周波数幅は狭く数 MHz 程度以下が典型的な値となる。光子源や量子メモリ制御用などにもちいるレーザー光源といった光デバイスは、数 MHz 程度の安定度は通常持たず、アクティブフィードバックによる制御が必要となる。そのため、本研究では、通信波長量子光源および量子メモリを開発した後、それらの制御レーザーおよび光源共振器、そして通信波長と量子メモリ波長をつなぐ励起レーザーまで含めた周波数安定化をし、光ファイバーを介した周波数マッチングによる結合システム開発を目的とする。

3. 研究の方法

量子メモリ結合用に狭線幅化を目的として開発した共振器 2 光子源、および周波数多重性をもつ希土類添加物 Pr:YSO 量子メモリを、リモートでつなぐインターフェースとして周波数安定化システムおよび波長変換システムを開発する。周波数安定化は量子光源の発生波長および量子メモリの遷移周波数を安定化するために必要で、各々マスターとなるレーザーの光コムへの安定化を施し、更に波長変換を介して共振器 2 光子源の通信波長(1514nm)と量子メモリの可視光波長(606nm)を結ぶ。

光コムは通信波長を中心として 1 オクターブに及ぶ広帯域化したファイバーコムで、キャリアエンベロープオフセット周波数および繰り返し周波数のロックにより、絶対周波数が安定化された周波数基準としての役割を果たす。この基準に対し、量子メモリ制御波長 606 nm を第二高調波発生により生成する基本波レーザー(1212nm) および通信波長 2 光子源の励起レーザー(1514nm)を安定化した。さらに通信波長光子が光ファイバ伝送されたのちの波長変換励起レーザーによる和周波発生で 606nm に変換されるのだが、その際通信波長レーザー、波長変換励起レーザー、量子メモリ制御レーザーらのビート情報をもとに波長変換励起レーザーに対してフィードバックを施すことで、長期安定な通信波長量子光源、量子メモリの結合システムを開発した。

4. 研究成果

光コムに対して安定化された共振器 2 光子源と波長変換励起レーザーによる波長変換生成光子は量子メモリ波長に非常に近いが、安定して量子メモリ波長にいつづけるわ

けではない。そのため、本研究では量子メモリ制御レーザーと波長変換光（量子と同じ波長を古典強度で用意）とのビート測定系を用いて、その値を一定にするよう波長変換励起レーザーにフィードバックするシステムを開発した。

この結果、10 km光ファイバーを通じた通信波長量子光源の伝送後の量子メモリへの安定的な結合が12時間以上にわたり可能となった。

通信波長量子光源の示す2光子時間相関を、10 km光ファイバー伝送後の波長変換および量子メモリへの保存（1 μ 秒）・再生後も示すことに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Aizawa Naoto, Niizeki Kazuya, Sasaki Riku, Horikiri Tomoyuki	4. 巻 62
2. 論文標題 Sagnac interferometer-type nondegenerate polarization entangled two-photon source with a Fresnel rhomb	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 2273 ~ 2277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.484456	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 Ichihara Mayuka, Yoshida Daisuke, Hong Feng-Lei, Horikiri Tomoyuki	4. 巻 107
2. 論文標題 Frequency-multiplexed Hong-Ou-Mandel interference	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 032608 ~ 032608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.032608	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 Ito Ko, Kondo Takeshi, Mannami Kyoko, Niizeki Kazuya, Yoshida Daisuke, Minaguchi Kohei, Zheng Mingyang, Xie Xiuping, Hong Feng-Lei, Horikiri Tomoyuki	4. 巻 19
2. 論文標題 Frequency-Multiplexed Storage and Distribution of Narrowband Telecom Photon Pairs over a 10-km Fiber Link with Long-Term System Stability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 024070 ~ 024070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.19.024070	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 Yoshida Daisuke, Ichihara Mayuka, Kondo Takeshi, Hong Feng-Lei, Horikiri Tomoyuki	4. 巻 106
2. 論文標題 Single-shot high-resolution identification of discrete frequency modes of single-photon-level optical pulses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 052602 ~ 052602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.106.052602	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 Kondo Takeshi, Shindo Seiho, Yoshida Daisuke, Goji Yuma, Nishihara Mikitaka, Aizawa Taiki, Hong Feng-Lei, Horikiri Tomoyuki	4. 巻 61
2. 論文標題 Transfer of linewidth and frequency stability from an iodine-stabilized Nd:YAG laser to a quantum memory control laser through an optical frequency comb	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 088003 ~ 088003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac7f6f	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 Onozawa Ryo, Yoshida Daisuke, Niizeki Kazuya, Horikiri Tomoyuki	4. 巻 61
2. 論文標題 Cavity-enhanced two-photon source emitting narrow linewidth telecommunication wavelength photons for improved quantum memory-coupling efficiency enabling long-distance quantum communications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 102008 ~ 102008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac895b	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 Mannami Kyoko, Kondo Takeshi, Tsuno Tomoki, Miyashita Takuto, Yoshida Daisuke, Ito Ko, Niizeki Kazuya, Nakamura Ippei, Hong Feng-Lei, Horikiri Tomoyuki	4. 巻 29
2. 論文標題 Coupling of a quantum memory and telecommunication wavelength photons for high-rate entanglement distribution in quantum repeaters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 41522 ~ 41533
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.442876	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 Miyashita Takuto, Kondo Takeshi, Ikeda Kohei, Yoshii Kazumichi, Hong Feng-Lei, Horikiri Tomoyuki	4. 巻 60
2. 論文標題 Offset-locking-based frequency stabilization of external cavity diode lasers for long-distance quantum communication	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 122001 ~ 122001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac2e67	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22件(うち招待講演 2件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 堀切 智之
2. 発表標題 量子インターネットに向けた量子中継の研究開発
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀切 智之
2. 発表標題 Coupling of a frequency-multiplexed two-photon source and a quantum memory for long-distance quantum communication
3. 学会等名 ALPS2022(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 進藤 成豊、吉木 万由子、洪 鋒雷、堀切 智之
2. 発表標題 ヨウ素分子P(41)56-0 吸収線を用いた1010 nm レーザーの周波数安定化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木 陸、相澤 太希、吉田 大輔、都野 智暉、堀切 智之、洪 鋒雷、赤松 大輔
2. 発表標題 非縮退狭線幅量子もつれ光子源の開発に向けたレーザーシステムの構築
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会 [物性]
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 進藤 成豊、近藤 健史、相澤 太希、西原 幹恭、吉木 万由子、洪 鋒雷、堀切 智之
2. 発表標題 長距離量子通信に向けた電気光学変調器型光コムの開発
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会 [物性]
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 市原 万友佳、吉田 大輔、洪 鋒雷、堀切 智之
2. 発表標題 波長多重量子中継に向けた希土類添加物質によるフォトンエコーの干渉
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会 [物性]
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増子 泰平、水口 皓平、洪 鋒雷、堀切 智之
2. 発表標題 希土類イオン添加結晶を用いた量子メモリにおける任意時間読み出し機構の開発
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会 [物性]
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 万浪 香子、水口 皓平、伊藤 洸、近藤 健史、新関 和哉、洪 鋒雷、堀切 智之
2. 発表標題 希土類イオン添加結晶量子メモリを用いた周波数多モード量子メモリ
3. 学会等名 第82回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水口 皓平、万浪 香子、増子 泰平、中村 一平、洪 鋒雷、堀切 智之
2. 発表標題 希土類イオン添加物結晶を用いた選択的 population transfer
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 進藤 成豊、近藤 健史、洪 鋒雷、堀切 智之
2. 発表標題 長距離量子通信における周波数安定化のための光周波数コムの開発
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水谷 宥介、堀切 智之
2. 発表標題 原子周波数コム量子メモリを用いた測定器無依存型量子鍵配送 (MDI-QKD) の配送レート改善
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤 健史、伊藤 洸、万浪 香子、進藤 成豊、新関 和哉、郷治 佑真、洪 鋒雷、堀切 智之
2. 発表標題 量子メモリ結合へ向けた和周波発生波長変換光を用いた周波数制御
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 洸, 近藤 健史, 万浪 香子, 新関 和哉, 水口 皓平, 洪 鋒雷, 堀切 智之
2. 発表標題 量子メモリ結合へ向けた和周波発生波長変換光子の信号雑音比の向上
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相澤 直人, 新関 和哉, 堀切 智之, 倉見谷 航洋, 洪 鋒雷
2. 発表標題 量子通信に向けたタイムピン干渉計の安定化
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 洸, 近藤 健史, 万浪 香子, 新関 和哉, 吉田 大輔, 水口 皓平, Mingyang Zheng, Xiuping Xie, 洪 鋒雷, 堀切 智之
2. 発表標題 量子中継器開発へ向けた通信波長光子源と可視光量子メモリの接続
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 Kazuya Niizeki, Daisuke Yoshida, Ko Ito, Ippei Nakamura, Nobuyuki Takei, Kotaro Okamura, Ming-Yang Zheng, Xiu-Ping Xie, Tomoyuki Horikiri
2. 発表標題 Two-photon Comb with Wavelength Conversion for Long-distance Quantum Communication
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村一平, 池田幸平, 洪 鋒雷, 堀切智之
2. 発表標題 原子周波数コム型量子メモリの高性能化に向けた補助光共振器によるレーザー線幅狭窄化
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新関和哉, 吉田大輔, 伊藤洸, 中村一平, 武井宣幸, 岡村幸太郎, Mingyang Zheng , Xiuping Xie , 堀切智之
2. 発表標題 長距離量子通信に向けた2光子源のスペクトル制御と波長変換
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田大輔, 都野智暉, 万浪香子, 中村一平, 洪鋒雷, 堀切智之
2. 発表標題 希土類イオン添加結晶を用いた微弱光パルスのシングルショット分光
3. 学会等名 第68回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮下拓士, 近藤健史, 池田幸平, 吉井一倫, 堀切智之, 洪鋒雷
2. 発表標題 AFC量子メモリ結合に向けたレーザーの周波数安定化
3. 学会等名 第68回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 都野智暉, 万浪香子, 吉田大輔, 郷治侑真, 池田幸平, 洪鋒雷, 中村一平, 堀切智之
2. 発表標題 希土類イオン添加結晶を用いた量子メモリの保存時間の向上、及び任意時間読み出しに向けたシーケンス開発
3. 学会等名 第68回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 万浪 香子, 都野 智暉, 吉田 大輔, 伊藤 洸, 新関 和哉, 宮下 拓士, 近藤 健史, 洪 鋒雷, 中村 一平, 堀切 智之
2. 発表標題 希土類イオン添加 結晶量子メモリを用いた通信波長光の 単一光子レベルフォトンエコー観測
3. 学会等名 第68回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

横浜国立大学 堀切研究室 http://www.horikiri-lab.ynu.ac.jp/

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	洪 鋒雷 (Hong Feng-Lei) (10260217)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	

6. 研究組織（つづき）

	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	中村 一平 (Nakamura Ippei) (10758949)	東京大学・大学院総合文化研究科・特任助教 (12601)	
研究分担者	吉井 一倫 (Yoshii Kazumichi) (90582627)	徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・特任准教授 (16101)	

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