

# 研究終了報告書

## 「量子ネットワーク構成技術とその応用研究」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：堀切 智之

### 1. 研究のねらい

長距離量子(通信)ネットワーク構築による従来の情報通信・計算機環境とは抜本的に異なる次世代情報通信インフラが目標である。具体的には以下の量子技術開発による量子ネットワーク構築を目指す：1. 狭線幅増強量子もつれ光源(量子もつれコム)、2. 量子光波長変換、3. 周波数安定化、4. 多重化通信対応量子メモリー、5. 長距離ネットワークへ向けた上記1-4技術統合。これらにより、完全な情報セキュリティ(インターネットなどの秘匿通信、クラウド量子計算の秘匿化(ブラインドネス))、クラウド量子計算ネットワーク、および超高精度世界時計(world clock)などの基盤となる長距離量子ネットワークへとつなげる。

目標達成には、各要素および要素間インターフェースの100%近い高効率光-物質間状態制御実現システムが必要である。ネットワーク内伝播用量子状態メディアである(もつれ)光子は、GHz~THz周波数領域に至るスペクトル幅をもつ現状から、サブMHzにまで(もつれ光源自体からメモリーまでを包括的に)飛躍させ、光-物質間の高効率量子状態転送技術を通じ長距離ネットワーク実装へと至る量子中継器をターゲットとする。本研究で開発・統合をねらう各要素を次に記述する。

**量子もつれ光源(量子もつれコム)**：もつれ2光子同時生成とスペクトル操作による狭スペクトル化、2光子発生効率飛躍的增加により量子メモリー結合効率を高めるため、共振器構造を利用しMHz以下の極めて狭いスペクトルをもつ2光子源を開発する。

**波長変換**：量子メモリーは可視光において吸収を示す一方、量子光源光子は(光ファイバ伝播する限り)通信波長であるため。本研究では多重化通信波長帯(606nm-通信波長間を想定)にて実施する。

**周波数安定化**：通信長距離化を達成したい場合、光源から放出された光で安定に量子メモリー-吸収線を狙い打たなければならないが、量子信号の周波数安定化技術無しには不可能である。量子メモリーは非常に狭い遷移周波数幅を示し(<<GHz)、通信波長帯光子の伝播先でメモリーに保存するには、光源および波長変換励起レーザーにMHz以下スペクトル幅、周波数安定度が要求される。本研究では、光源-メモリーという通信路入口-出口間の相対周波数ロックまで考慮したフィードバック安定化システムを開発する。

**量子メモリーとシステム統合**：多重化メモリー：希土類添加結晶の量子領域高効率メモリー技術開発を行う。光エコー、ホールバーニングなど量子エレクトロニクス発展とともに開発されてきた技術による時間多重・波長多重技術へとメモリーと量子もつれコムとの統合によって目指す。

上記技術統合による長距離量子ネットワークをねらう。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

通信の完全なセキュリティを期待される量子通信長距離化用中継技術に資する以下の技

術開発を実施した。量子もつれ光源、波長変換、量子メモリー、周波数安定化である。量子中継では中継ノード間で量子状態を伝送する必要があり、光子がその媒体となる。本研究では、特に中継ノード内で量子状態を一時保存・再生する機能をもつ量子メモリーとの結合効率を100%に近づけることが可能な1MHz以下線幅の通信波長量子もつれを達成した。また理想的な量子もつれ状態に対する90%以上の忠実度を得た。その後通信波長と量子メモリー波長を結ぶ波長変換を実装し、10km光ファイバ伝送後の量子メモリー波長への変換および量子性の観測に成功した。これにより量子中継に必要な量子状態を伝送する通信波長量子もつれ光源、波長変換、そして量子メモリーへの結合に不可欠な周波数安定化までを実装できた。

別途、量子メモリーに関してはプラセオジウム添加結晶を用いて開発をし、単一光子レベル信号を入射した後、確定時間読み出しに対応するフォトンエコー信号観測に成功し、時分割多重化に対応できることを確認した。

## (2) 詳細

### 1. 量子もつれ光源開発

量子中継に用いる量子もつれ光源に必要な性能として、中継ノードで用いられる量子メモリーとの結合効率が高いことがある。本研究で開発する多重化量子通信用メモリーPr:YSOはその励起準位間隔によって決定される最大のメモリー可能吸収領域幅約5MHzを持つ。よって、量子もつれ光源はそれよりも狭いスペクトル幅をもつ必要がある。本研究では1MHzを切るスペクトル幅を達成し、100%結合効率を目標とする。図1は、開発もつれ光源の2光子時間相関関数測定結果である。

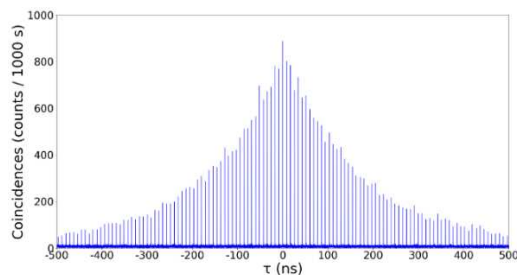


図1：光ファイバ伝送および波長変換後の2光子時間相関測定結果。横軸：2光子時間差、縦軸：2光子カウント数。共振器2光子源特有の楕構造が保存されている。

細かい楕状構造が大きな包絡線をもつことがわかる。この包絡線寿命から、スペクトル幅が評価でき、1MHz(0.95MHz)をきることが実証できた。共振器スペクトルにローレンツ関数を仮定すると、90%以上の結合効率を得られることがわかった。

更に、量子もつれ忠実度測定のため量子状態トモグラフィを実施し、量子もつれ忠実度最高値96%以上、ベル状態忠実度90%を得た(図2)。

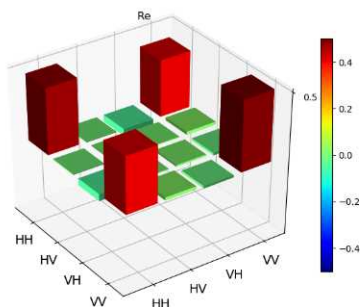


図2. 量子状態トモグラフィ結果。(実部のみ掲載)。

## 2. 波長変換

通信波長もつれ光子から量子メモリー波長(606nm 近辺)に高効率変換する波長変換システム構築を実施した。周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路に、波長変換励起レーザーおよび通信波長光を入射し、図3に示すように最高効率60%以上を得た。

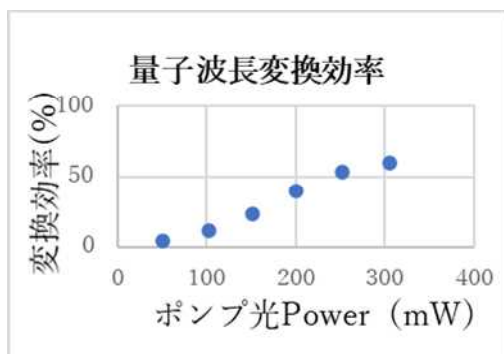


図3. 波長変換ポンプ光パワー依存性。

## 3. 周波数安定化技術開発

量子光源、波長変換、量子メモリーを安定的に結合するために、各々の励起レーザー、共振器などを安定化する必要があった。それらの各要素を 10kHz 以下の安定度で長時間安定化に成功し、一連の要素を長時間安定動作させる環境を整えた。また、量子光源と量子メモリーは長距離(>10km)離れており、リモート光リンクによる相対周波数安定化が必要なため、基準となる GPS 信号にロックされた光コムを開発した。図 4 は安定度評価結果であり、測定した時間に渡って 10kHz 程度以下の安定度が得られていることがわかり、今後の光リンクを使った長時間安定化に用いる目処がたった。

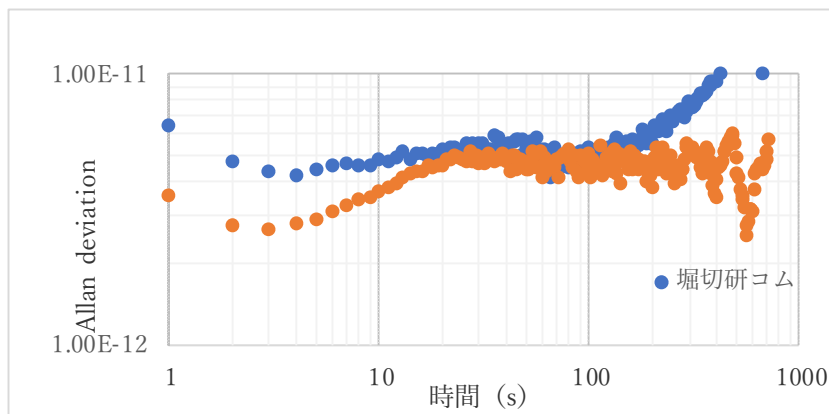


図 4: 開発光コム安定度評価結果。青: 開発コム、オレンジ: 基準となる共同研究先の光コム。

#### 4. 開発通信波長光子の光ファイバ伝送および波長変換の実装

開発した通信波長狭線幅2光子源を10km光ファイバ伝送し、その後波長変換して量子メモリー波長である606nm近辺に変換した。その際に2光子時間相関測定結果が図5であり、共振器2光子に特徴的な時間楕構造が観測されており、量子性を保ったままの長距離伝送に成功したことがわかる。これにより、量子もつれの長距離配布および量子メモリー内の静止量子状態としての配布の手前まで研究が進んだ。

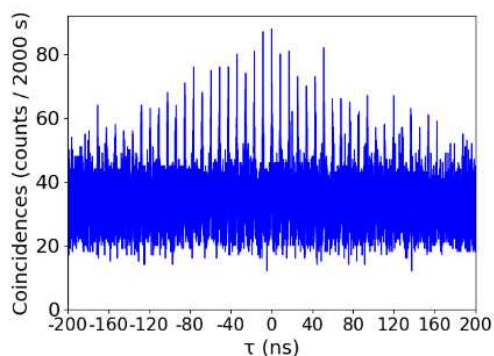


図 5: 通信波長光子の光ファイバ伝送および波長変換の2光子時間相関。

#### 5. 量子メモリー開発

時分割・波長分割多重量子通信に対応できるPr:YSOを用いた原子周波数コム方式の量子メモリー開発を進めた。

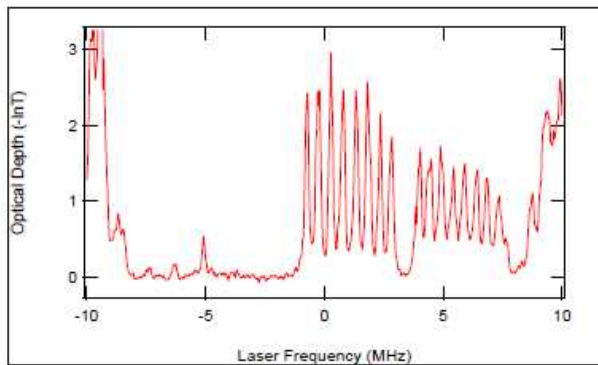


図6: Pr:YSO の吸収スペクトルに形成された原子周波数コム。楕本数に比例して時分割多重度が増加し、またこの楕構造形成エリアを不均一幅内に多数形成することで波長分割多重性が得られる。

図6は、Pr:YSO の吸収スペクトルに形成された原子周波数コムで、これにより時分割多重性が獲得できることが示された。また図7には、原子周波数コムの応答により一時保存された光が確定時間後に光子エコーとして放出される様子である。

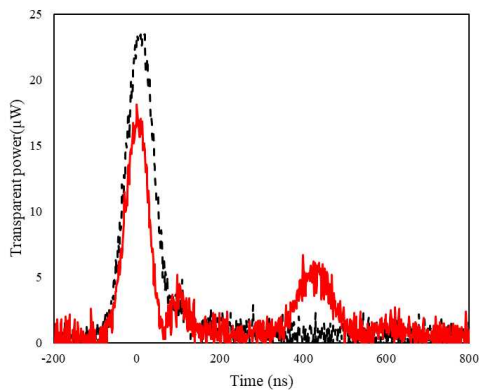


図7: 通信波長光の波長変換後の Pr:YSO から光子エコー信号観測結果。

図7は、通信波長レーザーを波長変換して量子メモリー波長(606nm)にしたのちに、Pr:YSO に入射、原子周波数コムにて吸収したのち、光子エコーとして放出される様子を示したものである。これにより、光子の吸収および再生機構の獲得ができた。今後は任意時間メモリー機能のためのメモリー準位への遷移機能を実装していく予定である。

### 3. 今後の展開

今後は、量子もつれ光の光ファイバ伝送後、量子メモリーと結合させるシステム実証を早期に実施する。

また、希土類添加結晶をもちいたシングルショット単一光子分光技術など、量子中継ノードで実施されるべき波長分割対応ベル測定機能などの開発をすすめ、量子インターネットへつながる中継技術実装に向けて準備を加速させる。

### 4. 自己評価

光源からメモリーまでの結合という意味では、最終段階がクリアできなかった。しかし、光源、波長変換、周波数安定化、量子メモリーの各要素開発は順調に進み、また光源・波長変換・周波数安定化をもちいた10km光ファイバ伝送と量子性観測までは完了しており、量子メモリーへの結合まであと一歩のところに来た。これにより、量子インターネットに不可欠な技術である多重化量子通信用中継技術の実装へと近づいたと考える。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:8件

1.

著者:Kazuya Niizeki, Daisuke Yoshida, Kou Ito, Ippei Nakamura, Nobuyuki Takei, Kotaro Okamura, Mingyang Zheng, Xiuping Xie, Tomoyuki Horikiri

発表論文タイトル:Two-photon comb with wavelength conversion and 20-km distribution for quantum communication

掲載誌名:Communications Physics

発行年, 巻号, 頁: 3, 138 (2020)

その他:DOI 10.1038/s42005-020-00406-1

概要

Quantum computing and quantum communication, have been greatly developed in recent years and expected to contribute to quantum internet technologies, including cloud quantum computing and unconditionally secure communication. However, long-distance quantum communication is challenging mainly because of optical fiber losses; quantum repeaters are indispensable for fiber-based transmission because unknown quantum states cannot be amplified with certainty. In this study, we demonstrate a versatile entanglement source in the telecom band for fiber-based quantum internet, which has a narrow linewidth of sub-MHz range, entanglement fidelity of more than 95%, and Bell-state generation even with frequency multimode. Furthermore, after a total distribution length of 20-km in fiber, two-photon correlation is observed with an easily identifiable normalized correlation coefficient, despite the limited bandwidth of the wavelength converter. The presented implementation promises an efficient method for entanglement distribution that is compatible with quantum memory and frequency-multiplexed long-distance quantum communication applications.

2.

著者:Daisuke Yoshida, Kazuya Niizeki, Shuhei Tamura, Tomoyuki Horikiri

発表論文タイトル:Entanglement distribution between quantum repeater nodes with an absorptive type memory

掲載誌名:International Journal of Quantum Information

発行年, 巻号, 頁:vol18,No.05,2050026(2020)

その他:DOI 10.1142/S0219749920500264

## 概要

Quantum repeaters, which are indispensable for long-distance quantum communication, are necessary for extending the entanglement from short distance to long distance; however, high-rate entanglement distribution, even between adjacent repeater nodes, has not been realized. In a recent work by [C. Jones et al., New J. Phys. 18 (2016) 083015], the entanglement distribution rate between adjacent repeater nodes was calculated for a plurality of quantum dots, nitrogen-vacancy centers in diamond, and trapped ions adopted as quantum memories inside the repeater nodes. Considering practical use, arranging a plurality of quantum memories becomes so difficult with the state-of-the-art technology. It is desirable that high-rate entanglement distribution is realized with as few memory crystals as possible. Here, we propose new entanglement distribution scheme with one quantum memory based on the atomic frequency comb which enables temporal multimode operation with one crystal. The adopted absorptive-type quantum memory degrades the difficulty of multimode operation compared with the previously investigated quantum memories directly generating spin-photon entanglement. It is shown that this scheme improves the distribution rate by nearly two orders of magnitude compared with the result in [C. Jones et al., New J. Phys. 18 (2016) 083015] and the experimental implementation is close by utilizing state-of-the-art technology.

3.

著者: Kurumiko Nagao, Tomoyuki Horikiri, and Toshihiko Sasaki

発表論文タイトル: Blind quantum computation with a heralded single-photon source

掲載誌名: Physical Review A

発行年, 巻号, 頁: 99, 042324(2019)

その他: DOI 10.1103/PhysRevA.99.042324

## 概要

Blind quantum computation is a scheme that adds unconditional security to cloud quantum computation. In the protocol proposed by Broadbent, Fitzsimons, and Kashefi, the ability to prepare and transmit a single qubit is required for a user (client) who uses a quantum computer remotely. In case a weak coherent pulse is used as a pseudo-single-photon source, however, we must introduce decoy states, owing to the inherent risk of transmitting multiple photons. In this paper, we demonstrate that by using a heralded single-photon source and a probabilistic photon number resolving detector we can gain a higher blind state generation efficiency and longer access distance, owing to noise reduction on account of the heralding signal.

## (2) 特許出願

研究期間累積件数: 2 件 (特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	堀切智之, 吉田大輔, 新関和哉, 田村秀平
	発 明 の 名 称	通信ノード、及び量子通信システム
	出 願 人	国立大学法人横浜国立大学

出 願 日	2018/08/16
出 願 番 号	特願 2018-153107
公 開 番 号	特開 2020-028076
概 要	量子通信における量子もつれ共有レートを高くすることができる通信ノード、及び量子通信システムを提供する。

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【学会発表】

<国際>

1. 学会名 : Conference on Lasers and Electro-Optics2019

開催地 : San Jose Convention Center, San Jose, California, USA

日付 : 5-10 May 2019

著者 : Kazuya Niizeki, Daisuke Yoshida, Mingyang Zheng, Xiuping Xie, Kotaro Okamura, Nobuyuki Takei, Tomoyuki Horikiri

タイトル : Telecom Narrow Bandwidth Two-photon Source with High Fidelity Polarization Entanglement

2. 学会名 : 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018)

開催地 : Nagoya, JAPAN

日付 : September 8 - September 12, 2018

著者 : Daisuke Yoshida, Kazuya Niizeki, Shuhei Tamura, Tomoyuki Horikiri

タイトル : High rate entanglement distribution between quantum repeater nodes

<国内>

1. 学会名 : Optics & Photonics Japan 2019

開催地 : 大阪大学

日付 : 2019/12/3

著者 : 新関 和哉, 吉田 大輔, 伊藤 洸, 小野沢 涼, Mingyang Zheng, Xiuping Xie, 岡村 幸太郎, 武井 宣幸, 堀切 智之

タイトル : 長距離量子通信に向けた通信波長狭線幅 2 光子源と波長変換

2. 学会名 : 2019 年電子情報通信学会総合大会(招待講演)

開催地 : 早稲田大学

日付 : 2019/3/20

著者 : 堀切智之, 新関和哉, 吉田大輔, 岡村幸太郎, 武井宣幸, Mingyang Zheng, Xiuping Xie, 井上修一郎, 行方直人

タイトル : 量子ネットワーク用高輝度通信波長量子光源の開発

【プレスリリース】

日付 : 2020 年 8 月 12 日 18 時解禁

タイトル : 量子インターネットへ向けた通信波長 2 光子の長距離光ファイバ伝送および波長変換に成功

【URL】<https://www.ynu.ac.jp/hus/koho/24380/detail.html>

