

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23684035

研究課題名(和文) 波長変換を利用した量子情報技術の開拓

研究課題名(英文) Quantum information technology based on wavelength conversion of a photon

研究代表者

山本 俊 (Yamamoto, Takashi)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：10403130

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,500,000円、(間接経費) 6,450,000円

研究成果の概要(和文)：光、原子、トラップイオンなど様々な物理系から実現される量子情報処理は、ここ20年の間に活発に研究されている。光は量子情報を運ぶ担い手として重要な役割を果たしている。一方、その他の物質系は量子情報のメモリや操作を特定の場所で行う役割を持っている。特に量子リピーターに注目すると物質系と光の量子もつれが基本的なリソースとして用いられる。これまでこのような量子もつれの生成が実現しているが光の波長は光ファイバー通信に不向きな可視光領域に限られていた。本研究では量子状態を壊さない波長変換技術を開拓し、量子状態を効率的に送信可能な可視光から通信波長への量子波長変換を実現した。

研究成果の概要(英文)：Quantum information processing employing diverse media such as photons, atoms and trapped ions have been actively studied over the past two decade. Photons play a significant role as a carrier of quantum information over a long distance. On the other hand, other matter systems are considered to be used as storage and manipulation of quantum information at a specific location. When we look at a quantum repeater, entanglement between matters and photons is considered as an elemental resource for the long distance quantum communication. Creations of the entanglement between matters and photons have been demonstrated, but it is limited for the visible wavelength of the photons that is not suitable for a long distance fiber telecommunication. In this project, we have demonstrated a wavelength converter while preserving the quantum state from visible to telecommunication wavelength for efficient transmission of the quantum states of photons.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス 量子光学 量子情報 波長変換

### 1. 研究開始当初の背景

国内及び国外を問わず、量子情報技術は光や冷却原子、イオントラップ、半導体など様々な物質系で精力的に研究されており、特に光は離れた系への量子状態送信の担い手として非常に注目されている。光を用いた量子情報処理の研究では可視光領域において非常に多くの研究が行われ、非線形光学効果である光パラメトリック変換を光子対発生に用いて8光子程度の実験が実現している。また、物質系において非常に成功している冷却原子、トラップイオン、半導体やダイヤモンド中のカラーセンターなどもその発光を利用して量子情報処理を行う場合には可視光領域付近の波長となるのがほとんどである。これらの物質系は量子情報を蓄積するメモリや、量子状態を制御するためにも利用されるため、非常に重要である。

しかしながら、長距離光ファイバー通信においてはより波長の長い光通信波長(1.55 μm帯)が用いられている。これはこの波長帯において光損失が0.2 dB/km程度であり、可視光における3~5 dB/kmと比べると格段に小さく、効率的に光通信が行えるからである。通信波長帯の光子1個を50 kmおくる場合にその到達確率は0.1であるのに対して、可視光の光子は同じ到達確率ではせいぜい3 km程度にとどまる(図1を参照)。このため可視光領域を用いた量子情報処理の従来研究の長距離通信への利用範囲は現在のところ限定的となってしまふ。

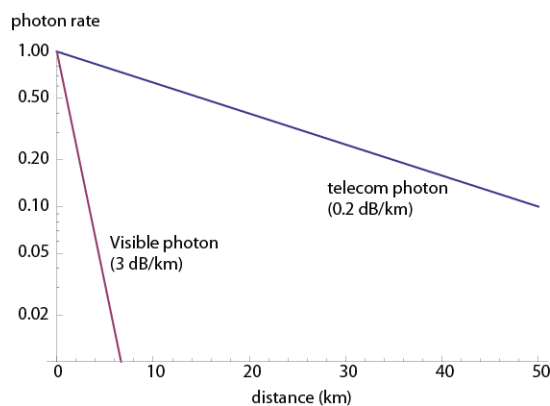


図1: 光ファイバーでの可視光子と通信波長帯光子の到達確率

このように長距離通信といった観点で考えると、この波長のギャップを埋めることが重要であると考えられる。また、光通信波長帯においては光通信用の光ファイバー光学部品や導波路、さらにシリコンフォトリソグラフィの進展によって広範な光操作が非常にコンパクト、高精度かつ低損失で行うことができるという利点もある。

このような通信波長帯における強みを十分に生かすことを模索すると量子情報をエンコードする光の自由度の利用拡大も重要

となる。たとえば光ファイバーも含めた導波路を用いる場合には自由空間において多く利用される偏光の自由度は必ずしも良いものではない。自由空間における量子情報処理では複数の自由度を用いて複雑な量子情報処理を達成する例が多く、導波路において偏光に代わる新たな自由度の開拓はより複雑な量子情報処理を行うといった観点からも重要である。波長自由度の量子状態は可能性のある興味深い候補であるが、これまでその操作は限定的でほとんど利用されていない。しかし、波長自由度の量子状態発生や検出を自在に行うことが可能となれば、導波路中での重要な自由度になると考えられる。

### 2. 研究の目的

上のような波長のギャップを埋める方法の一つとして、本研究では光の量子状態を保持したまま波長変換を行う量子波長変換を実現し、これを利用した量子情報技術の開拓を行う。上でも述べたとおり、量子情報処理の実現には量子光通信や物質系での量子状態制御や量子メモリを駆使する必要がある。しかし、これまで物質系からの発光を利用した非古典光の発生は可視光領域が多く、赤外領域にある光通信波長域とは大きなギャップがあった。この量子波長変換を用いることで、このギャップを埋め物質系からの量子状態を光通信を用いてより長距離通信が可能となる。また、量子波長変換を組み合わせることで波長自由度の量子状態の発生や検出が可能になるため、これを利用した新たな量子情報技術を開拓する。

特にこれまで光量子情報処理の実験でよく利用され、量子メモリとしてもよく用いられる Rb 原子の発光波長である 780 nm もしくは 795 nm から 1.5 μm 帯への量子波長変換を実現することを目指し、更にこれを利用した量子情報処理実験を行う。

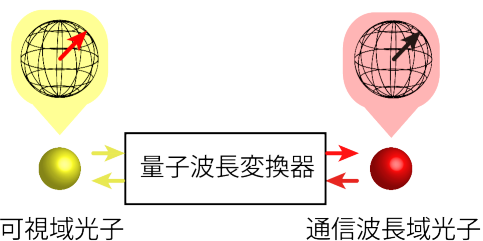


図2: 量子波長変換の概念図

### 3. 研究の方法

よく知られた光波長変換として2次の非線形光学効果による和周波発生もしくは差周波発生がある。変換される入力光は単一光子であるためこの非線形光学過程において高い変換効率、低い雑音光子発生および位相雑音であることが求められる。特に後ろの2項目に関しては古典光の入力の場合(強いレ

ーザー光の入力の場合)にはあまり気にすることがないが、ここでは非常に重要となる。我々はこのような非線形光学媒質として導波路型 PPLN 結晶を利用した。導波路構造であるために相互作用長を長くとることができ高い変換効率を実現することができる。波長 1600 nm の励起レーザー光を用い、780 nm の入力光子との差周波発生により 1522 nm の出力光子をえる。エネルギー保存則によって波長選択が行われ、選択する励起レーザー光の波長を調整することで出力光子の波長を調整することも可能である。

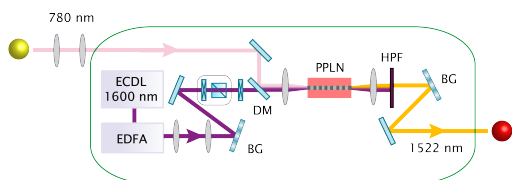


図 3 : 量子波長変換実験装置

図 3 にあるように導波路型 PPLN 結晶による波長変換を行う。古典光での変換効率は 70% を超える値を得るとともに出力光での非古典光の確認に十分な雑音特性が確認できている。波長 1600 nm の励起レーザー光は狭線幅 (150 kHz) の外部共振器レーザーを光増幅器により 1 W 程度にまで増幅したものをを用いる。入力光子はバルクの BBO 結晶を用いた光パラメトリック変換により 780 nm の光子対を発生し用意した。光パラメトリック変換も非線形光学過程であり、強い励起光 (390 nm) からエネルギー保存則を満たすように光子対発生が起こる。励起光はピコ秒モードロックチタンサファイアレーザーの第 2 高調波により発生した。

光子対の生成確率が 1 より十分小さくし、光子対のうち一方を検出した場合には、もう一方は単一光子状態に非常に近いものとなっており、非古典性をもつ。この非古典性の度合いは強度相関関数  $g(2)$  によって評価されることが一般的で、観測された  $g(2)$  が 1 より小さいと非古典性を有する。また、この光子対の状態を量子もつれ状態と呼ばれる量子的な相関を持った量子状態にすることもできる。この量子もつれ状態にある光子対の一方を上りの波長変換入力しその出力状態を評価することで任意の量子状態の入力に対する出力状態を推定することが可能となる。したがってこれら 2 つの評価方法を用いて実現した量子波長変換器の実現を確認する。

#### 4. 研究成果

光パラメトリック変換を利用した単一光子を入力光子 (780 nm) として波長変換を行い、出力の通信波長光子 (1522 nm) の強度相関関数  $g(2)$  を測定し 0.17 という値を得た。これにより出力光子の非古典性が

確認され量子波長変換として機能することが確認された。 $g(2)=0$  が理想的であるが、有限の値である主な原因は強い励起光 (1600 nm) から広帯域に発生するラマン散乱のうち 1522 nm のフィルターを透過してくる成分や検出器の暗計数による信号雑音比の低下である。

また、量子もつれ光子対 (780 nm) の一方を波長変換し、変換後の量子もつれの保存を確認する実験を行った。発生した量子もつれ状態の最大量子もつれ状態との忠実度は 0.95 であった。この光子対の一方を波長変換し、出力の量子状態 (一方は 780 nm の光子で他方は 1522 nm) と最大量子もつれ状態との忠実度を測定し 0.75 を得た。忠実度の低下はあるが忠実度が 0.5 を超えていることから量子もつれが残っていることが確認された。忠実度の低下の原因は上記と同様である。

信号雑音比を向上させる方法はいくつか考えられるがラマン散乱光が広帯域であるため 1522 nm を透過させるフィルターの狭線幅化を行うことが重要である。また、検出器の暗計数を低減することも重要である。検出器に関しては超電導光子検出器の進展もあり、非常に低暗計数 (100 cps) のものも作成されるようになっておりそれによる信号雑音比の向上が期待できる。実際にこの改善を行ったところ忠実度が 0.93 と非常に高いものを得ることで、ほとんど雑音フリーといつてよいほどの量子波長変換器を実現することができた。

また、量子波長変換の魅力として、波長モードを利用した量子情報処理の開拓がある。この場合には 100% の波長変換を目指すのではなく、励起レーザー強度を調整し光を 50% 程度の変換効率にすることで部分波長変換器を作る。この場合には波長変換されない光子のモードの干渉性を確認しておく必要がある。波長変換されないのであるから変換前の干渉性を保持しているのは当然ではないかと思われるかもしれないが、実験では 100% の変換効率を達成できない不完全なものであるため、その確認は重要である。実験では 50% の変換効率の部分波長変換器になるように強度を調整し、非変換光の干渉の明瞭度が 90% 超になることを確認した。この部分波長変換器は波長自由度における分波器のような役割を持ち、これを利用することで異なる波長の間の量子状態操作を行うことが可能になることが重要である。

このように本研究では量子波長変換器を実現し、それによる量子状態を保持した効率的な波長変換を可能にした。また、部分量子波長変換器を同時に実現し波長自由度を用いた量子状態操作の新たな方法を見出した。これにより、物質系の量子状態を通信波長を介して長距離にわたって通信する方法や薬用自由度を用いた新たな量子情報処理の展開が生まれると期待している。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7件)

Rikizo Ikuta, Yoshiaki Kusaka, Tsuyoshi Kitano, Hiroshi Kato, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, Wide-band quantum interface for visible-to-telecommunication wavelength conversion, Nat. Commun. 2 537 (2011) doi: 10.1038/ncomms1544. 査読有

Rikizo Ikuta, Hiroshi Kato, Yoshiaki Kusaka, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Mikio Fujiwara, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Masahide Sasaki, Zhen Wang, Nobuyuki Imoto, High-fidelity conversion of photonic quantum information to telecommunication wavelength with superconducting single-photon detectors, Phys. Rev. A 87, 010301(R) (2013). 査読有

Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Hiroshi Kato, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Mikio Fujiwara, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Masahide Sasaki, Zhen Wang, Nobuyuki Imoto, Nonclassical two-photon interference between independent telecommunication light pulses converted by difference-frequency generation, Phys. Rev. A 88, 042317 (2013). 査読有

Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Hiroshi Kato, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Mikio Fujiwara, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Masahide Sasaki, Zhen Wang, Nobuyuki Imoto, Observation of two output light pulses from a partial wavelength converter preserving phase of an input light at a single-photon level, Opt. Express 21, 27865 (2013). 査読有

[学会発表](計 41件)

Takashi Yamamoto, Visible to Telecommunication wavelength conversion of single photons and its applications, The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy "Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications", 2013/4/9, Nara Prefectural New Public Hall, Japan  
Takashi Yamamoto, R. Ikuta, T. Kobayashi, H. Kato, S. Miki, T.

Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, N. Imoto, A photonic quantum interface for an optical fiber based quantum communication 20th Central European Workshop on Quantum Optics, 2013/6/17, KTH, Stockholm, Sweden  
Takashi Yamamoto, R. Ikuta, M. Koashi, N. Imoto, "A Photonic Quantum Interface for Visible-to-Telecommunication Wavelength Conversion" (invited 26 Sep.) IEEE PHOTONICS CONFERENCE 2012, 2012/9/26, Hyatt Regency San Francisco Airport, USA

山本俊, 生田力三, 北野剛史, 日下良章, 加藤大織, 小芦雅斗, 井元信之 "PPLNを用いた非古典光の周波数下方変換実験" 2011年秋季 第72回応用物理学会学術講演会 30a-ZR-7, 2011/8/30, 山形大学 小白川キャンパス

山本俊, "光量子状態制御と量子情報通信への応用"(招待講演) 第1回光科学異分野横断萌芽研究会 2011/8/10, かんぼの宿 奈良

山本俊, "光子の量子状態操作と量子情報通信"(講義名: 量子科学フロンティア) 2012/4/26 日本大学理工学部駿河台校舎(御茶ノ水)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本俊 (YAMAMOTO Takashi)  
大阪大学大学院・基礎工学研究科・准教授  
研究者番号: 10403130

(2) 連携研究者

小芦雅斗 (KOASHI Masato)  
東京大学・光量子科学研究センター・教授  
研究者番号: 90322099

連携研究者

井元信之 (IMOTO Nobuyuki)  
大阪大学大学院・基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 00313479