

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：92704

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26706021

研究課題名(和文)多光子の無損失な波長変換法の構築と大規模量子計算への応用

研究課題名(英文)Deterministic wavelength conversion of multiple photons and its application to quantum computation

研究代表者

松田 信幸(Matsuda, Nobuyuki)

日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・研究主任

研究者番号：10587695

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,700,000円

研究成果の概要(和文)：量子情報通信において重要な単一光子の波長変換技術に関する新規手法を構築した。光ファイバ中の相互位相変調(XPM)を用い、従来法では困難であった常に効率100%の光子波長変換技術を確立するとともに、最大0.4 THzの光子波長シフトなどに成功した。変換に伴い単一光子の光子統計性や他の光子との量子もつれが保持されていることを確認し、本手法が量子情報通信実験へと適用可能であることを示した。さらに被変調光子数を増やし、相関2光子スペクトルの外部変調や、識別不可能な4光子の周波数空間ボゾン出力分布の観測に成功した。加えて、XPMを用いた時間領域光全反射という新たな光状態制御技術の知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new scheme for the wavelength conversion of single photons, which is essential for quantum information and communication technologies. Using cross-phase modulation in an optical fiber, we have successfully demonstrated lossless conversion of single photon wavelength and spectrum with up to 0.4 THz single side frequency shift. We also demonstrated that the scheme is applicable to manipulations of a non-classical frequency correlation, wave-packet interference, and entanglement between two photons, showing the applicability to quantum information processing. We further increased the number of simultaneously modulated photons up and demonstrated the external modulation of multiphoton spectral correlation and multiphoton quantum interference in a frequency space. Finally, we have numerically shown that temporal analog of the total internal reflection can be achieved using cross-phase modulation.

研究分野：量子光学、非線形光学

キーワード：量子光学 非線形光学 量子情報 光ファイバ

1. 研究開始当初の背景

量子暗号通信や量子計算・計測を初めとする量子情報通信技術において単一光子の波長変換は重要な技術である。拡張性の高い量子情報システムの構築のためには、できるだけ損失の少ない、理想的には効率 100%での光子波長変換が求められる。従来用いられていた光波混合過程(和周波発生など)に基づく波長変換法においては、高効率波長変換のために高強度のポンプ光が必要なことから、効率 100%での単一光子波長変換は実現されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来法とは異なる非線形光学過程である相互位相変調(XPM)を用い、実験条件によらず常に変換効率が 100%である光子波長変換手法を構築することである。また、被変調光の光子数を増やし、多光子の同時波長変換を実現するとともに、量子通信において重要な 2 光子間の識別可能性の制御や、量子計測の基礎となる周波数空間における多光子量子もつれの変調、そして光周波数領域における多光子干渉を用いた量子計算実験への応用を目指す。

3. 研究の方法

XPM は、ポンプ光によって誘起される媒質の屈折率変化を介して別の信号光の位相が変化する過程である。この位相を動的に変化させることで、位相の時間微分である光周波数(波長)を変化させることができる。また、媒質の屈折率の変化のみを用いているため、原理的に光子損失のない波長変換が実現可能である。従来法との比較を図 1 に示す。

単一光子波長変換を達成しつつ低雑音性を実現するための条件(大きく異なる 2 つの波長の間で等しい群速度を有すること)を満たす媒質として、図 2 の分散関係を有するフォトニック結晶ファイバを選定した。この選定が本研究の成功の鍵であった。さらに、ポンプ光と信号光(単一光子あるいは多光子)とが図に示した波長に合致するように光源を選定し、実験系を構築した。

光子のスペクトル測定には、中心波長可変バンドパスフィルタあるいは波長選択スイッチ(本研究費にて購入)と単一光子アバランシェダイオードとを組み合わせた分光系

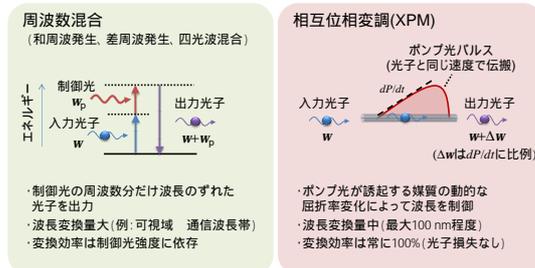


図 1 単一光子波長変換のための非線形光学効果

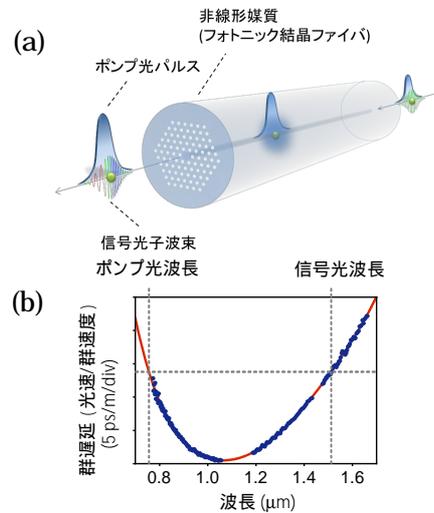


図 2 (a) XPM を用いた光子波長変換手法の模式図。(b)用いたフォトニック結晶ファイバの分散。

を用いた。研究期間の後半には、別予算にて購入した超伝導ナノワイヤ単一光子検出器と、本研究費で購入したファイバ分散補償モジュールを組み合わせた高速単一光子スペクトルアナライザを構築した。これにより、測定時間を大幅に短縮することに成功した(例えば二光子スペクトルの測定にかかる時間が 10 時間から数 10 秒へと大幅に短縮された)。

実験結果の検証のための理論計算には、ファイバ中の非線形パルス伝搬のシミュレーション手法としてよく用いられる非線形シュレディンガー方程式のスプリットステップフーリエ法による数値解法を非古典光波束に適用して用いた。

4. 研究成果

(1) 単一光子の無損失波長変換の実現

単一光子の波長変換
単一光子として、パラメトリック下方変換によって得られる伝令付き単一光子を用いた。単一光子波束とポンプ光パルス(時間幅 0.8 ps)とをフォトニック結晶ファイバへと入射し、出射後の単一光子のスペクトルを測定した。その結果、図 3 に示すように、単一光子の波長を変化させることに成功した。さらに光子のポンプ光に対する相対的な入射時間を制御すると、単一光子のスペクトル形状を様々に変化させることができた。得られた最大の波長シフト量は 3.2 nm (0.4 THz)であった。これは、ファイバの群速度分散により、光波間の有効相互作用長が制限されることによる。今後、より分散の少ないファイバや導波路を用いることで、波長変換量の向上が可能であると考えられる。

またこれらの実験結果は、XPM 効果を含む非線形シュレディンガー方程式に基づく理論計算の結果とよく一致した。このことにより、波長変換が XPM によって誘起されていることが確認できた。

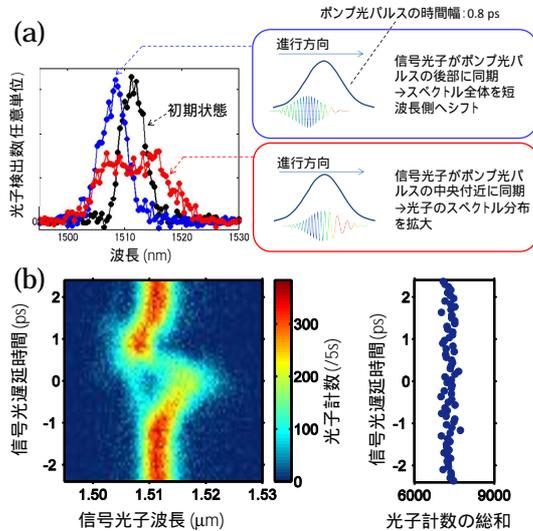


図 3 (a) 単一光子波長変換実験結果。(b)様々な光子遅延時間における光子スペクトル(左図)と、信号光子の総数(右図)。

光子損失の測定

図 3(b)左図の実験結果から、各遅延時間における光子計数の総数を図 3(b)右図に示す。これより、被変調光子数は波長変化の有無によらず一定であること、すなわち、本手法により無損失な波長変換が実現されたことが確認できた。なお、波長変換にともない、ファイバの複屈折による光子の微小な非線形偏波回転が観測された。この現象は、偏波面保存型の非線形ファイバを用いることで今後抑制できると考えられる。

光子統計性の確認

非線形相互作用によって信号光の単一光子性、すなわち光子統計性が変化しないことを確認する実験を行った。伝令付き単一光子を 50/50 スプリッタで分離し、2 台の単一光子検出器を用いて自己相関関数の測定を行った。得られた自己相関関数の値は XPM の有無にかかわらず 0.1 程度であった。すなわち波長変換によって単一光子性が失われていないことが確認できた。

(2) 1 光子波長変換による 2 光子相関制御 2 光子周波数相関の変調

パラメトリック下方変換などから得られる光子対は、一般にそれらの周波数の間に相関を持っている。この相関の制御は量子計測や計算をはじめとする様々な量子情報実験の応用上重要な技術である。我々はこの周波数相関の外部変調(光子対発生後の変調)に世界で初めて成功した。例えば、図 4(a)に示すような周波数相関をもつ光子対のうち、片方の光子のみに XPM 波長変換を施した。その結果、同図(b)に示すように分布全体をずらしたり、また薄く広げて延ばしたりと変化させることができた。ポンプ光パルスの波形整形により、更なる制御自由度の向上が期待さ

れる。

2 光子間の識別可能性の制御

ビームスプリッタにおける 2 光子の間の干渉は Hong-Ou-Mandel (HOM) 干渉と呼ばれ、様々な光量子情報プロトコルに必要な現象である。ただしシリコン導波路などのいくつかの光子対源は、等しい波長をもちながら経路が分離された 2 光子を直接発生できず、そのままでは HOM 干渉を利用することができない。そこで、非縮退 2 光子の波長を XPM によって揃え、HOM 干渉を復活させる実験を行った。

はじめに、図 5(a)の青い実線および破線で示されるようなスペクトルを持つ 2 光子を発生させた。これらのうち、光子 1 の波長を XPM によって同図赤線のように変化させた。波長変換の有無それぞれの条件において、2 光子をビームスプリッタの異なる入力ポートへと入力し、2 光子干渉波形を取得した。その結果、図 5(b)に示すように、波長変換によって明瞭度 50%以上の HOM 干渉が復活した。この実験により、XPM 波長変換を用いて 2 光子の波束の干渉を制御することに成功した。

2 光子間の量子もつれの制御

と同様の実験において二光子の周波数相関を逆方向に制御すると、上に突なバンプ形状を持つ 2 光子干渉波形が観測された。ポンゾンである光子を用いた干渉実験においては、バンプ形状は 2 光子に量子もつれがある場合にのみ観測されることが知られている。この結果より、XPM によって波長変換を受けた光子の量子コヒーレンス、すなわち量子重ね合わせ状態の位相が保持されていることが確認された。このことにより、XPM 波長変換が量子情報技術に適用可能であることを

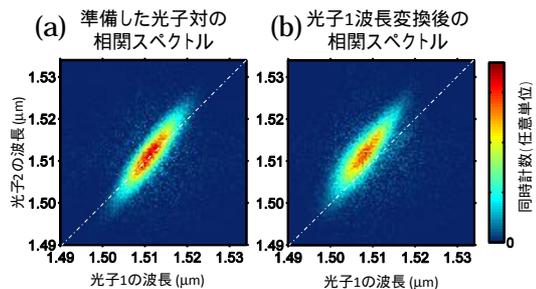


図 4 1 光子波長変換による 2 光子の相関スペクトルの制御

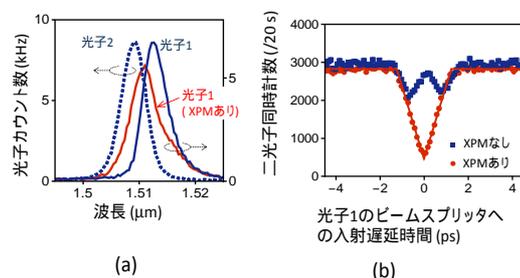


図 5 二光子の波長識別可能性の制御による二光子干渉の復活

示した。

ここまで述べた成果をまとめた論文は、Science Advances 誌に掲載された。また出版に合わせ報道発表を行った。

(3) 相関多光子の波長変換

2光子の同時波長変換

本手法の高い変換効率を生かし、相関2光子の同時波長変換実験を行った。図2(a)において信号光として互いに直交する相関2光子をファイバへと入射させ、ファイバ出力後に2光子を偏光ビームスプリッタで分離した後、2光子スペクトルを測定した。その結果、図6に示すように、入射遅延時間を調整してXPMを誘起すると、2光子スペクトルの大きな変化が観測された。このように、相関をもった2光子の波長を同時に変換することに成功した。

ここで実験結果は、単なる2光子スペクトルの短波長側や長波長側への全体的なシフトのみならず干渉構造を示している。これは、周波数のもつれた2光子の波動関数は、適切な直交周波数基底を選んで展開することで、異なるスペクトルを持った複数の波動関数の重ね合わせとして表されることによる。XPM効果はそれぞれの直交成分に独立に作用し、全体のコヒーレントな重ね合わせにより出力の2光子スペクトル形状が決まる。このモデルのもとに2光子の非線形伝搬をシミュレートしたところ、実験結果をよく説明する計算結果を得ることができた。

レーザー光パルス、あるいは1光子の非線形ファイバ伝搬はこれまで研究し尽くされているが、相関のある2光子波束の非線形ファイバ伝搬に関してはあまり調査されていなかった。本研究により、理論と実験の両面から、相関光子の非線形伝搬の振る舞いを明らかにすることができた。

さらに、ファイバ出射後にそれぞれの光子の偏光の識別可能性を消去し、周波数空間における2光子干渉実験を行うことに成功した。

4光子同時波長変換とボゾン出力分布の取得

前述の実験において被変調光子数を4個に

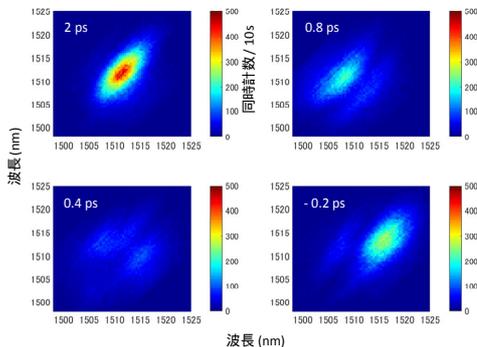


図6 相関2光子同時波長変換結果。各プロットの時間は信号光の遅延時間。

増加して XPM による周波数操作を行った後、光子の識別可能性を操作することで、提案時の最終目標であった4光子の周波数空間多光子干渉実験に成功した。この結果、光子の識別可能性の有無によって、得られるボゾン出力分布が大きく変化することが確認できた。なおこの研究においては、申請書に記載の通り遂行した、ブリストル大学との共同研究[1]（線形光学回路を用いた光量子情報処理の研究）で得られた知見を生かした。今後、得られた分布と光子状態変換の理論計算結果から、中間的な量子計算モデルであるボゾンサンプリング実験へと展開する。

(4) 当初の計画外の成果

研究遂行中に新たに得られた成果として、最近新たに提案された「時間領域における光全反射」現象[2]（図7）が、XPMを用いることにより現実条件下で実現可能であるという理論計算結果を得た。時間領域全反射においては、空間全反射における波数と周波数の役割がそのまま入れ替わるため、光子の周波数変換器としての応用が見込まれる。また、最近活発化している時間領域における新規物理現象の研究[3]における新しい知見が得られる可能性がある。今後、実験による観測を目指す。

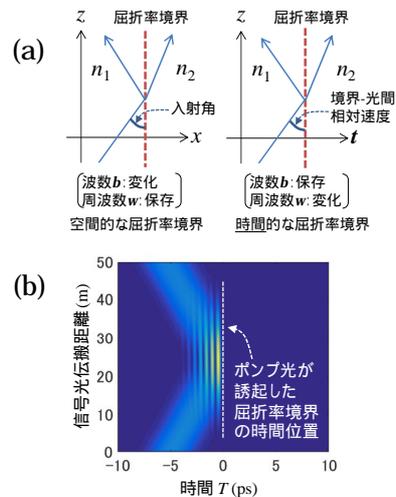


図7 (a) 時間領域における光全反射のアナロジー。(b) XPMを用いた時間領域光全反射の数値シミュレーション結果。

(5) まとめ

XPMを用いることで、無損失な単一光子波長変換を世界で初めて実現した。さらに被変調光の光子数を増やし、多光子の同時波長変換を実現するとともに、量子通信、計測、計算といった広範な量子情報処理技術へとつながる実験へと応用した。

なお、最近我々の成果に続いて、電気光学変調器やオプトメカニカル位相シフタを用いて、損失のない単一光子波長変換を実現しようとする実験報告があった[4,5]。し

かしそのどちらにおいても、変換に伴う光子損失がないことが直接示されており、また実現された波長変換量は当研究で得られた値の半分以下であった。これらのことは、XPMが量子情報通信技術のための波長変換器として優れていることを示すものである。

参考文献

- [1] J. Carolan, *N. Matsuda et al.*, *Science* **349**, 6249 (2015).
- [2] B. W. Plansinis *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 183901 (2015).
- [3] S. Choi *et al.*, *Nature* **543**, 221 (2017).
- [4] L. J. Wright *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 023601 (2017).
- [5] L. Fan *et al.*, *Nat. Photon.* **10**, 766 (2016).

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 2 件)

N. Matsuda, “Deterministic reshaping of single-photon spectra using cross-phase modulation,” *Science Advances*, 査読有, vol. 2, e1501223 (2016).

松田信幸, 「集積フォトニクス技術を用いた光量子情報デバイス」, 光アライアンス, 査読無, 8月号, p.47 (2016).

[学会発表](計 11 件)

松田信幸, 「時間領域における光全反射の観測に向けて」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017/03/18, 大阪大学(大阪府豊中市).

N. Matsuda, “Spectral and spatial manipulation of single photons,” JSAP Workshop on Quantum Information and Related Fields (招待講演), 2017/03/03, 国立情報学研究所(東京都千代田区).

N. Matsuda, “Spectral and spatial manipulation of single photons in optical waveguides,” UK-Japan Quantum Communication Workshop Series III (招待講演), 2016/10/13, 在日英国大使館(東京都千代田区).

N. Matsuda, “Controlling two-photon frequency entanglement using cross-Kerr effect,” QCMC 2016, 2016/7/6, Singapore (Singapore).

N. Matsuda, “Spectral engineering of single photon wave packets using cross phase modulation,” *Spectral & Spatial Engineering of Quantum Light* (招待講演), 2016/03/31, Warsaw (Poland).

N. Matsuda, “Integrated optical waveguides for photonic quantum information devices,”

Nano-Optics/Photonics Young Researchers Meeting(招待講演), 2016/03/09, 京都工芸繊維大(京都府京都市).

松田信幸, 「集積フォトニクス技術を用いた光量子情報デバイス」, レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会 (招待講演), 2016/01/11, 名城大学(愛知県名古屋市).

松田信幸, 「相互位相変調を用いた二光子量子もつれ状態の操作」, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 15p-2M-5, 2015/09/17, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).

N. Matsuda, “Controlling frequency distinguishability of photons using cross-phase modulation,” *CLEO: 2015, OSA Technical Digest, FTu2A.3*, 2015年5月12日, San Jose (USA).

N. Matsuda, “Single-photon frequency conversion using cross-phase modulation,” *CLEO:2014, OSA Technical Digest, FW1A.6*, 2014年6月11日, San Jose (USA).

松田信幸, 「相互位相変調を用いた単一光子の量子周波数変換」, レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE), 2014/05/22, 福井大学(福井県福井市).

[その他]

報道発表 「量子情報通信のための、単一光子の波長変換に関する新手法を構築 ~ 光ファイバを用いて無損失に光子の波長を操作 ~ 」, 2016.3.26.

日経産業新聞、日刊工業新聞、通信興業新聞、科学新聞にて報道

研究代表者のホームページ

<http://www.brl.ntt.co.jp/people/nmatsuda/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

松田 信幸 (MATSUDA, Nobuyuki)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・研究主任

研究者番号: 10587695