

平成30年 5月30日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03704

研究課題名(和文) 光周波数領域におけるユニバーサル量子操作

研究課題名(英文) Universal quantum operation on optical frequency states

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) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光周波数を量子状態として扱い、その量子状態を自在に操作することができるユニバーサルな量子操作を目指して研究を行った。光は室温においても十分に量子性を保持できる理想的な物理系である。更に、周波数は最も正確に測れる物理量であるため、稠密な量子情報処理が可能である。基本操作である状態間の遷移は2次の非線形光学効果による和・差周波発生による光周波数変換で行う。通常の光量子情報処理はビームスプリッターを基本として実現される。これと同様の操作を変換効率50%の光周波数変換で行い、周波数領域のビームスプリッターを実現した。これを用いてHong-Ou-Mandel干渉等の干渉操作を実現した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have experimentally studied a universal set of quantum operations on states represented by optical frequencies. Optical quantum states are on ideal quantum system due to extremely low noise even at the room temperature. Furthermore, in optical frequency domain, the information can be encoded ultra-densely. In order to manipulate such states encoded in optical frequency domain, we developed a single photon frequency converter employing second order nonlinear crystal. In the case of 50% conversion efficiency, it acts as a beam splitter commonly used in standard optics. Using the frequency converter, we demonstrated Hong-Ou-Mandel interference and others to show the ability to the universal quantum operation.

研究分野：量子情報

キーワード：量子情報 量子エレクトロニクス 量子光学 波長変換 量子通信

1. 研究開始当初の背景

光の領域では非常に高周波数であるため、熱雑音が非常に小さく、室温においても十分に量子性を保持できる。そのため、光は量子性を見ることができる理想的な量子系として広く研究されている。特に通信に関しては、唯一の情報のキャリアである。光による量子情報処理の研究は量子情報研究の中で最も早い段階から行われており、特に量子暗号に代表される量子情報通信において非常に活躍している。一方、光と光の相互作用は非常に小さいため、当初は光の量子状態操作は難しいと考えられていた。しかし、量子テレポーテーションの実現や、その後の線形光学素子による光量子計算や測定ベースの量子計算等の進展により、任意の量子操作が可能であることが示されてきた。重要なことは光と光の相互作用を利用せず、線形光学素子による干渉効果に留める代わりに、リソースとなる光の特殊な量子状態生成と非常に高い性能の光子検出器による成功事象の事後選択により情報処理を行う点である。

量子テレポーテーションではリソースは Bell 状態と呼ばれる量子相関(エンタングルメント)をもつ量子状態である。送信者の量子系 A と受信者の量子系 B の複合系 AB の状態が Bell 状態にあるとする。送信者は送りたい量子状態をもつ量子系 A' と自身の保有する量子系 A の複合系 AA' に対して Bell 測定と呼ばれる射影測定を行い、受信者はその測定結果を元に量子系 B を変換することで送りたい量子状態を得ることができる。これが量子テレポーテーションである。直接、量子状態を送らないにもかかわらず、結果として量子状態が送れているという点が特徴なのであるが、その機構も面白い。予め用意しているリソースの量子状態(Bell 状態)は送りたい状態によらない全く独立なものである。その為、どんな送りたい状態にも対応できる万能なものである。測定結果は、送りたい量子系 A' の次元の 2 乗個をデジタル通信で送れば十分である。ただし、量子系を送らなくても量子テレポーテーションができるわけではなく、Bell 状態の共有には量子系を送る必要がある。つまり、量子テレポーテーションは量子状態の送信を量子系の送信と切り離れたプロトコルとなっている。

これは光の量子情報処理にとっては非常に重要であった。量子状態保持に最適な光の課題の一つは光子の損失である。(実は光子損失は少ないのであるが、それでも複雑な光回路や長距離通信では問題になってしまう。)量子状態がデコヒーレンスによって壊れてしまうというよりは、量子状態を保持している量子系がある確率でなくなってしまう。しかし、量子テレポーテーションではリソースとなる光子の生成が成功するまで、量子状態の送信を待機することができる。また、光の量子テレポーテーションにおける Bell 測定は光のビームスプリッターによる

Hong-Ou-Mandel(HOM)干渉と光子検出によって実現される。その際、光子がいるかいないか、つまり量子系の有無も同時に確認し、量子系が存在する場合のみを事後選択して成功の場合のみ量子状態をテレポートすることができる。量子状態を変えずにリソースの統計性に置き換えるといっても良いかもしれない。ここでも量子系の有無を確認する光子検出器は非常に重要な役割を果たしている。

Bell 状態ではない別のリソースを用意すればテレポーテーションをしながら演算できるだろうか?といった疑問は自然であり、線形光学素子を利用した量子計算へとつながる。このリソース状態もまた単一光子生成、単一光子検出器と線形光学回路により実現するため、この3つの要素技術開発が重要となる。単一光子生成は精力的に研究されている。線形光学回路はバルクの光学系から集積化された光回路へと微小化によるスケールアップが図られている。

2. 研究の目的

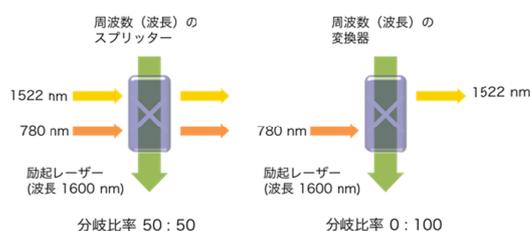
本研究では、このような集積化による空間多重化された光回路を用いるのではなく、光周波数多重化をした多次元ヒルベルト空間にたいするユニバーサル量子操作を実現することを目標に研究を行った。光周波数は現在、最も正確に測定できる物理量であるため、光周波数に量子情報を符号化すれば最も稠密に量子情報処理が可能である。しかし、他の物理量と異なり、光周波数の量子操作は未開拓である。本研究ではこれまで実現していない光周波数における任意の量子操作およびそれを利用した任意の状態への射影測定に着目して研究を行う。

3. 研究の方法

光周波数を基底状態として量子操作を行うためには状態間の遷移を実現することが必要である。これには図1にあるような非線形光学効果である差周波発生および和周波発生として知られる光周波数変換器を用いる。非線形光学結晶に非常に強い励起光を入射することで図1右のように780nmから1522nmの光子へと変換される。ここで励起光である1600nmの光と1522nmの光のエネルギーの和は780nmのエネルギーに相当し、エネルギー保存則が成り立つ。また、非線形光学結晶中では位相整合が満たされている。励起光強度によって変換効率を変化させることができる。十分に強い励起光を用いると100%の光子の波長変換が実現する。入射する光子の波長を780nmから1522nmへ変更すると、1522nmから780nmの光子の波長変換が実現する。したがって、この2つの周波数の状態に対するビットフリップ操作が可能である。

この光周波数変換器の変換効率を50%にした場合、780nmの光子の入射に対して、

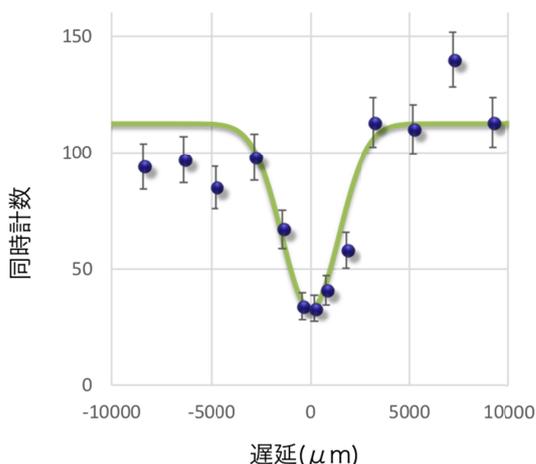
1522nm の光子が 780nm の光子が 50%の確率で出射される。1522nm の光子の入射に対しても同様である。これは Bell 測定でも利用されたビームスプリッターにほかならない。したがって、1522nm の光子と 780nm の光子の同時入射に対して HOM 干渉が起こるはずである。また、このビームスプリッターは 780nm の光子の入射によって 780nm の 1522nm の状態の重ね合わせ状態を用意することができる。また、この重ね合わせ状態に対してこの周波数自由度のビームスプリッターを用いると周波数状態に対する射影測定が可能である。励起強度を変えることで分岐比を変えることができ、ビットフリップと任意の位相操作が可能であるため、任意の量子ビット操作が可能である。これと適切なリソース状態を準備して、ビームスプリッターでの HOM 干渉効果を用いれば C-NOT ゲー



トが可能である。したがって理想的にはユニバーサルな量子操作が可能である。

4 . 研究成果

本研究では、まず、基本となる周波数自由度のビームスプリッターを実証し、それによる HOM 干渉を世界で初めて観測した。入力に 780nm の単一光子と 1522nm の微弱コヒーレント光を用いて実験を行った。慎重に励起光強度を調整し、変換効率 0.4 を得た。この変換効率で観測を行った HOM ディップが以下の図である。



2つの光子の遅延が 0 の点、つまり同時光子入射の場合に visibility=0.71 を得た。古典限界である 0.5 を超える十分高い visibility

であった。変換効率を 0.5 に調整し、微弱コヒーレント光を単一光子に置き換えることで 0.98 程度が可能であることもわかった[論文]。また、このビームスプリッターを用いた干渉実験を行い、非常に高い visibility が可能であることもわかった[論文]。これにより光周波数自由度のユニバーサル量子操作が可能であることがわかった。これに加えて、狭線幅光子対による多光子干渉に関する要素技術の開拓[論文]。Plasmonic マテリアルの周波数依存性を用いた量子操作[論文]などの進展があった。

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 6 件)

Yoshiaki Tsujimoto, Motoki Tanaka, Nobuo Iwasaki, Rikizo Ikuta, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hiroataka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, “High-fidelity entanglement swapping and generation of three-qubit GHZ state using asynchronous telecom photon pair sources,” Scientific reports 8(1), 1446 (2018). 査読有, Doi:10.1038/s41598-018-19738-8

Toshiki Kobayashi, Daisuke Yamazaki, Kenichiro Matsuki, Rikizo Ikuta, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hiroataka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, “Mach-Zehnder interferometer using frequency-domain beamsplitter,” Opt. Express 25(10), 12052-12060 (2017). 査読有, Doi:10.1364/OE.25.012052

Yoshiaki Tsujimoto, Yukihiro Sugiura, Motoki Tanaka, Rikizo Ikuta, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hiroataka Terai, Mikio Fujiwara, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Masahide Sasaki, Nobuyuki Imoto, “High visibility Hong-Ou-Mandel interference via a time-resolved coincidence measurement,” Opt. Express 25(11), 12069-12080 (2017). 査読有, Doi:10.1364/OE.25.012069

Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Kenichiro Matsuki, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hiroataka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Tetsuya Mukai, Nobuyuki Imoto, “Heralded single excitation of atomic ensemble via solid-state-based telecom photon detection,” Optica 3(11), 1279-1284 (2016). 査読有, Doi:10.1364/OPTICA.3.001279

Toshiki Kobayashi, Rikizo Ikuta, Shuto Yasui, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirota Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, “ Frequency-domain Hong-Ou-Mandel interference,” Nature Photonics 10(7), 441 (2016). 査読有, Doi:10.1038/nphoton.2016.74
Motoki Asano, Muriel Bechu, Mark Tame, Şahin K Özdemir, Rikizo Ikuta, Durdu Ö Güney, Takashi Yamamoto, Lan Yang, Martin Wegener, Nobuyuki Imoto, “ Distillation of photon entanglement using a plasmonic metamaterial,” Scientific reports 5, 18313 (2015). 査読有, Doi:10.1038/srep18313

〔学会発表〕(計 16 件)

山本俊 “超伝導検出器を用いた量子情報処理” (招待・依頼講演, 発表日 3/21) 電子情報通信学会総合大会チュートリアルセッション「超伝導エレクトロニクスが切り開く量子情報工学の最新動向」2018/3/20-23 東京電機大学 東京千住キャンパス
山崎大輔, 小林俊輝, 松木賢一郎, 生田力三, 山本俊, 小芦雅斗, 井元信之 “周波数領域マッハツエンダー干渉計を用いた光干渉実験” (口頭, 発表日 9/13) 2016 年第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 13p-B2-8, 2016/9/13-16 朱鷺メッセ
T. Kobayashi, R. Ikuta, S. Yasui, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, “ Observation of frequency-domain Hong-Ou-Mandel interference ” (oral, 29 August), 16th Asian Quantum Information Science Conference(AQIS '16), 28 August - 2 September 2016, Academia Sinica, Taipei, Taiwan.
T. Kobayashi, R. Ikuta, S. Yasui, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto “ Experimental demonstration of frequency-domain Hong-Ou-Mandel interference ” (poster, 4 July), 13th International Conference on Quantum Communication, Measurement, and Computing (QCMC 2016), 4-8 July, 2016 National University of Singapore, Singapore
T. Yamamoto “ Quantum Operations Based on Waveguide Nonlinear Optical Materials ” (Invited talk, 8 July), Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2015 in Prague, 06 - 09 July 2015, The Top Hotel, Prague, Czech Republic.
T. Kobayashi, R. Ikuta, S. Yasui, S.

Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Sasaki, Z. Wang, M. Koashi, N. Imoto “ Observation of Hong-Ou-Mandel interference by using a frequency-domain beamsplitter ” (poster, 25 June), CLEO/Europe-EQEC 2015, 21-25 June 2015, International Congress Centre (ICM), Munich, Germany.
M. Bechu, M. Asano, M. Tame, S. K. Ozdemir, R. Ikuta, T. Yamamoto, D. O. Güney, L. Yang, M. Wegener, N. Imoto “ Quantum Entanglement Distillation Using an Optical Metamaterial ” (oral, 12 May), CLEO:2015, 10 - 15 May 2015 San Jose Convention Center, San Jose, CA, USA

〔図書〕(計 1 件)

Shigehito Miki, Mikio Fujiwara, Rui-Bo Jin, Takashi Yamamoto, Masahide Sasaki “ Quantum Information Networks with Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors ” Superconducting Devices in Quantum Optics edited by Robert H. Hadfield, Goran Johansson, Springer, ISBN: 978-3-319-24089-3, page 107-135, 2016.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称 : 量子演算方法
発明者 : 東浩司、向井哲哉、山本俊、生田力三、井元信之
権利者 : 同上
種類 : 特許
番号 : 特願 2015-134149
出願年月日 : 2015 年 07 月 03 日
国内外の別 : 国内

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

生田 力三 (IKUTA Rikizo)
大阪大学大学院・基礎工学研究科・助教
研究者番号 : 90626475

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

