

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25247068

研究課題名(和文)異種多体系量子操作の基盤技術の開拓

研究課題名(英文)Quantum interfaces for hybrid quantum information processing

研究代表者

井元 信之 (Imoto, Nobuyuki)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：00313479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,600,000円

研究成果の概要(和文)：量子情報処理実現に欠かせない「異種多体系間のインターフェース技術」の基盤技術の開拓のため、光子の量子ビットと原子の量子ビットの間の転送、伝送路の光位相雑音とビットエラーの高効率除去、多体エンタングルメント構成法および新しい利用法の理論的提案を行った。概ね予定通りあるいは予定以上の結果が得られた。出版論文はNature Photonics、Scientific Reports、New Journal of Phys.、Phys. Rev. Aなど20件、国際会議は招待講演11件を含む43件、国内学会は招待講演6件を含む52件であり、新聞報道および多数のネットニュースによる報道があった。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to develop fundamental technologies for quantum information processing such as (1)quantum interface between photon-qubit carriers and atom-qubit memories, (2)efficient elimination of the destructive influence of the phase- and bit-errors in optical transmission lines, and (3)theoretical proposal of expansion/fusion gates for many-qubit entanglement. The results of our research turned out either as was expected or more than expected, depending on the research items. The resultant publications are 20 papers including Nature Photonics, Scientific Reports, New Journal of Phys., Phys. Rev. A, etc. We had 43 presentations at international conferences including 11 invited talks, 52 presentations at domestic conferences including 20 invited talks. Our research result was covered by a newspaper and many news sites on the Internet.

研究分野：量子情報

キーワード：量子情報 量子光学 量子通信 量子コンピューター 量子暗号 冷却原子 波長変換 非線形光学

1. 研究開始当初の背景

(A) 本課題提案執筆時(2012年)のノーベル賞は、量子情報処理を見据えた個別イオンや個別原子の量子状態の光制御を実証実験したワインランドとアロシュに与えられ、これにより2012年は量子情報処理の物理的実現への道を拓く端緒の年という認識が広まった。(B) 一方、強い制御光でなく量子ビットとしての光子と個別イオン・原子間の演算や、多数の量子ビットを用いた演算、それに異種量子ビット(それぞれ別の波長の光子と反応)間の量子情報転送の実現が当時の研究課題の壁として立ちちはだかった。それを突破することが急務と認識されるも、個々の物質系の縦割り垣根を越える研究はなかった。(C) そんな中、我々は量子状態保存型単一光子波長変換の未完の穴を埋めて塞ぐ研究(2011年 Nature Comm.)を完成させていた。(D) さらに我々は、光伝送路の位相雑音の影響を効率よく除去する技術(2003年の Nature 誌に始まり2011年 Phys.Rev.Lett.誌まで数本の論文)を完成させていた。ただしそれは可視および極近赤外光子に対してであり、光通信で用いられる波長 $1.5\mu\text{m}$ では技術的困難が立ち塞がっていた。また、位相雑音除去ができたとしてもビットエラー(偏波雑音)は除去できていなかった。

(E) 実際の量子情報処理のためには多くの量子ビットが関与するエンタングルメントを準備することが重要であるが、きちんと個別アクセスする形で自在にエンタングルさせるのはごく少数の量子ビットに限られていた。そこで少数量子ビットエンタングルメントを拡大・融合する方法が検討されたが、世界的にはそれまでGHZ状態とクラスター状態の研究のみであった。W状態は我々の独壇場であったが、それも一段落し、残るはディッケ状態のみであった。

(F) エンタングルメントを使った量子情報処理の新しい方向として「ブラインド型」すなわちサーバーを信用せず、こちらの情報処理意図を明かさず量子情報処理を量子サーバーに委託する方法の研究が産声を上げた。

2. 研究の目的

上記異種量子ビット間の「量子インターフェース」実現に向け、我々は次の目標を置いた。

(1) 量子ビットとしてルビジウム原子(量子メモリの有力候補だが、他の候補と同様、通信の $1.5\mu\text{m}$ の波長の光子と反応しない)を選び、その原子の冷却・トラップ技術を立ち上げ、背景(C)の波長変換技術を用いて通信波長光子との反応実験を行う。

(2) 現実の光ファイバーが持つ雑音のうち、位相雑音の影響除去実験(背景(D)に記述)を通信波長($1.5\mu\text{m}$)帯で行う。さらに、位相雑音に加え偏波雑音も同時に除去する方法を新たに理論的に検討し、それが可能であることがわかれば実験を立ち上げる。

(3) 将来の量子情報処理を視野に入れ、背景

(E)で述べた多体エンタングルメント状態の発生・拡大の懸案事項を理論的に解明する。また背景(F)に関連して、ブラインド型などの新しい方向の量子情報応用を検討する。

3. 研究の方法

(1) 冷却ルビジウム原子集団の準備は磁気光学トラップにより行う。原子集団の単一励起は、書き込み光を当てて出て来る単一のストークス光子の検出により確認し、その励起の読み出し/消去はアンチストークス光子の検出により確認する。

(2) 通信波長帯で位相雑音除去を行うため、可視光で我々が成功していた2003年 Nature 論文の「エンタングルメント蒸留法」を適用する。ただし通信波長帯での困難を克服するため、詳細な雑音分析および新たに超伝導光子検出器を導入する。また、位相雑音と偏波雑音を同時に除去する方法として、参照光の逆方向打ち込み方法の改変を検討する。

(3) 多体エンタングルメント状態としてこれまで拡大・融合法が検討されていなかった「Dicke状態」を扱う。新しい量子情報応用としては「サーバーにも秘匿したまま」の通信やコンピューティングの方向を探る。

4. 研究成果

(1) ルビジウム原子の冷却・トラッピング技術をゼロから立ち上げた。さらに書き込み読み出し光の照射およびストークス/アンチストークス光子による確認を行い、ようやく成功を示す実験データの収集に(本研究計画期間内に)こぎつけた。現在論文執筆を行っており、1年以内の論文掲載を目指す。

上記実験の鍵となる光子の波長変換については、それが精密に制御された場合に初めて観測可能となる「周波数モードの世界での2光子干渉」現象を世界で初めて観測した。(通常の2光子干渉は「空間モード」の世界)これは Nature Photonics 誌(2016年)に掲載され、新聞で紹介され、多数のウェブニュースによる紹介もあった。

(2) 非常に困難と思われた通信波長帯での位相雑音除去実験については、超伝導光子検出器の導入が功を奏し、Optics Express 誌(2015年)に論文掲載に至った。

次に位相雑音と偏波雑音の同時除去については、参照光の逆方向打ち込みの改変アイデアが成功し、理論の論文を Phys.Rev.A (2013年)に出版した。理論が成功すれば検討に移る予定であった本アイデアの実験的検証については、本研究計画期間内に実験の立ち上げが完了し、本報告執筆時点で実験が成功した。今後1年以内に論文出版を目指す。

(3) 多体エンタングルメントの拡大・融合については、ディッケ状態の「一般的変換を実現するゲート」の理論の構築という、より一般化した方向の成果を得た(2014年 New J. of Phys.)。またサーバーを信用しないブラインド型量子情報処理として、ブラインド量子計

算 (2016 年 Phys.Rev.A) や測定装置無依存型量子暗号 (送信者と受信者は光子を出すだけで、盗聴者がつけ入る危険を伴う「量子測定」を行わない量子暗号) の新しい提案 (2014 年 Sci.Rep.) を行った。

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 20 件) 以下 12 篇抜粋
Toshiki Kobayashi, Rikizo Ikuta, Shuto Yasui, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto
"Frequency-domain Hong-Ou-Mandel interference"
Nature Photonics (2016) doi: 10.1038/nphoton.2016.74.

Motoki Asano, Muriel Bechu, Mark Tame, Sahin Kaya Ozdemir, Rikizo Ikuta, Durdu O. Guney, Takashi Yamamoto, Lan Yang, Martin Wegener and Nobuyuki Imoto
"Distillation of photon entanglement using a plasmonic metamaterial"
Sci. Rep. 5, 18313 (2015).

Y. Tsujimoto, Y. Sugiura, M. Ando, D. Katsuse, R. Ikuta, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto
"Extracting an entangled photon pair from collectively decohered pairs at a telecommunication wavelength"
Opt. Express 23, 13545-13553 (2015).

Yuki Takeuchi, Keisuke Fujii, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto, and Nobuyuki Imoto
"Blind quantum computation over a collective-noise channel"
Phys. Rev. A 93, 052307 (2016).

Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Shuto Yasui, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Mikio Fujiwara, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Masahide Sasaki, Zhen Wang, and Nobuyuki Imoto
"Frequency down-conversion of 637 nm light to the telecommunication band for non-classical light emitted from NV centers in diamond"
Opt. Express 22, 11205 (2014).

Akihiro Mizutani, Kiyoshi Tamaki, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto, and Nobuyuki Imoto
"Measurement-device-independent quantum key distribution

for Scarani-Acin-Ribordy-Gisin 04 protocol"
Sci. Rep. 4, 5236 (2014).

Kazuhiro Yokota, and Nobuyuki Imoto
"A weak-value model for virtual particles supplying the electric current in graphene: the minimal conductivity and the Schwinger mechanism"
New J. Phys. 16 073003 (2014).

Akira Matsuo, Keisuke Fujii, and Nobuyuki Imoto
"Quantum algorithm for an additive approximation of Ising partition functions"
Phys. Rev. A 90, 022304 (2014).

Hidetoshi Kumagai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto
"Robustness of quantum communication based on a decoherence-free subspace using a counter-propagating weak coherent light pulse"
Phys Rev. A 87, 052325 (2013).

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

Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Hiroshi Kato, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hirotaka Terai, Mikio Fujiwara, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Masahide Sasaki, Zhen Wang, and 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).

Toshiki Kobayashi, Rikizo Ikuta, Sahin Kaya Ozdemir, Mark Tame, Takashi Yamamoto, Masato Koashi and Nobuyuki Imoto
"Universal gates for transforming multipartite entangled Dicke states"
New J. Phys. 16 023005 (2014).

[学会発表](計 95 件) 以下 25 件抜粋

N. Imoto

"Frequency-domain quantum manipulation of photons using PPLN"
(Invited talk, 3 July), The 7th International Workshop on Solid State Quantum Computing (IWSSQC 7),
02 - 04 July 2015,
Nanjing University, China.

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.

N. Imoto

"Two-state formalism"
(Invited talk, 22 May), The V Jubilee KCIK Symposium,
22 - 24 May, 2014,
National Quantum Information Centre in Gdansk, Sopot, Poland.

N. Imoto

"Frequency conversion - towards hybrid quantum information processing"
(Invited talk, 29 May), Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons (Quantum 2014),
26 - 30 May, 2014,
INRIM, Turin, Italy.

N. Imoto

"Frequency conversion of single photons with high-fidelity quantum information preservation"
(Invited talk, 17 July), 23rd annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'14),
14 - 18 July 2014,
Sofia, Bulgaria.

N. Imoto

"Entanglement Web Expansion"
(Invited talk, 13 December), The 8th Asia Pacific Conference & Workshop on Quantum Information Science (APCWQIS 2014),
12 - 15 December 2014,
National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.

T. Yamamoto

"Visible-to-Telecommunication wavelength conversion of single photons and its

applications" (invited 9 Apr.)

The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy "Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications"
2013/4/4-12
Nara Prefectural New Public Hall, Japan

R. Ikuta

" Non-classical two-photon interference between telecom light pulses converted by difference-frequency generation" (poster 6 and 9 Apr.)

The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy "Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications"
2013/4/4-12
Nara Prefectural New Public Hall, Japan

N. Imoto

" Two-state formalism and photonic quantum information processing" (invited 4 Apr.)
The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy "Ultimate Quantum Systems of Light and Matter- Control and Applications"
2013/4/4-12
Nara Prefectural New Public Hall, Japan

T. 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 " (oral 17 June)
20th Central European Workshop on Quantum Optics
2013/6/16-20
KTH, Stockholm, Sweden

R. Ikuta, T. Kobayashi, H. Kato, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, N. Imoto

"Observation of converted and unconverted lights preserving phase information via difference frequency generation by using coherent light pulse at a single photon level" (poster 8 July) The International Workshop on New Science and Technologies using Entangled Photons (NSTEP)
2013/7/8-9 Osaka University, Japan

N. Imoto

"Quantum communication with lossy and

noisy photonic channels"
(Invited talk, 8 July) The International Workshop on New Science and Technologies using Entangled Photons (NSTEP) 2013/7/8-9 Osaka University, Japan

N. Imoto

"Towards long-distance photonics quantum communication" (Invited talk, 21 August) Workshop on Photonics Foundations and Applications Institute for Molecular Science (IMS), Okazaki, Aichi, 21 August 2013

R. Ikuta, T. Kobayashi, H. Kato, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, N. Imoto,
"The HOM interference between independent telecom light pulses frequency-down-converted by difference-frequency generation" (oral, 29 August), 13th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2013), 25 - 30 August 2013, The Institute of Mathematical Sciences Taramani, Chennai.

N. Imoto

"Quantum Communication and Computation with Interface between Memories and Propagating Signals" (Invited talk, 20 October), The 6th International Workshop on Solid State Quantum Computing (IWSSQC6), October 19-21, 2013, Beijing.

井元信之「Weak value -その意味と様々な素顔-」応用物理学会 量子エレクトロニクス研究会「極限計測の科学と技術」, 2015年12月18~20日(発表は18日)於: 東京大学山中寮内藤セミナーハウス.

井元信之「光を用いた量子情報処理」(招待講演)日本物理学会大阪支部2015年度公開シンポジウム「光と物理の過去・現在・未来:国際光年」2015年12月20日(日)大阪大学中之島センター佐治敬三メモリアルホール

井元信之「光ファイバーから量子情報まで」(招待講義)2015年度日本物理学会科学セミナー「物理学と光 ~光の基礎と最先端研究~」2015年8月21日(土), 東大駒場数理科学研究科棟大教室.

生田力三, 野崎正太, 山本俊, 小芦雅斗, 井元信之

“雑音のある reciprocal 通信路を介したエンタングルメント配送実験”(口頭, 発表日 3/20)
2016 年第 63 回応用物理学会春季学術講演会 20p-W541-4
2016/3/19-22 東京工業大学 大岡山キャンパス

山本俊

「コヒーレントな単一光子波長変換による量子インターフェイス」
第 11 回 AMO 討論会 招待講演
2014 年 6 月 6 日~7 日大阪大学豊中キャンパス

②生田力三, 小林俊輝, 加藤大織, 三木茂人, 山下太郎, 寺井弘高, 藤原幹生, 山本俊, 小芦雅斗, 佐々木雅英, 王鎮, 井元信之
“微弱コヒーレント光を用いた入力光の位相を保持する部分波長変換器の実証実験”(口頭, 発表日 9/9)
日本物理学会第 68 回年次大会 9aAZ-2
2014/9/7-10 中部大学 春日井キャンパス

②井元信之

“Frequency conversion of single photons preserving quantum information”(招待講演, 発表日 10/17)
理研-東大-阪大ジョイントセミナー
2014/10/16-17 大阪大学中之島センター・佐治敬三メモリアルホール

③生田力三, Sahin K. Ozdemir, Mark Tame, 田島俊之, 山本俊, 小芦雅斗, 井元信之
"A ferro-spin filter for photonic polarization qubits"(ポスター, 発表日 5/28)
第 28 回量子情報技術研究会 (QIT28)
2013/5/27-28
北海道大学 札幌キャンパス

④生田力三, 山本俊, 小芦雅斗, 井元信之
"単一光子の波長変換を利用した量子操作"(招待講演, 発表日 9/17)
電子通信学会 2013 年ソサイエティ大会
2013/9/17 - 20 福岡工業大学

⑤生田力三, 山本俊, 小芦雅斗, 井元信之
“分極反転デバイスの量子中継への応用”(招待講演, 発表日 3/18)
2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会 18p-F8-6
2014/3/17 - 20 青山学院大学 相模原キャンパス

〔図書〕(計3件)

井元信之 「光を用いた量子測定研究の進展と今後の展望」
光学 第42巻第10号(2013年10月号)
pp.484-493.

山本俊 「量子状態を乱さない波長変換」
光アライアンス Vol.25 No.10 10月号 pp.4-8 (2014).

井元信之 「量子もつれの基礎および量子情報や物理との関係」
日本物理学会誌 第69巻第12号(2014年12月号) pp.845-851.

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等:

<http://www.qi.mp.es.osaka-u.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者: なし

(3)連携研究者

小芦 雅斗 (KOASHI, Masato)
東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号: 90322299

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

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

(4)研究協力者: なし