

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20104003

研究課題名（和文）半導体発光素子による光子数量子状態発生と量子光学

研究課題名（英文）Quantum optics and non classical state generation using semiconductors

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

研究成果（和文）波長変換の実験は成功し、通信波長とデバイス波長間の変換のラインナップが完成した。これは報道発表が多数なされるに至った。マイクロトロイド共振器を念頭に光 Kerr 効果を使った量子非破壊測定をどこまで改良できるかについては海外との共同研究も成功し、Optics Express 誌で論文発表した。マイクロトロイドの光応答特性測定については、光速度の slowing down の観測までに至った。「単一光子」度の許容範囲については、実は許容範囲が相当大きいことが判明し、実験家に対する朗報となった。これは日経新聞で報道された。

研究成果（英文）We succeeded in developing wavelength conversion in quantum realm, which has been covered by many Japanese newspapers and Physics Today. We observed velocity slowing down in microtroid optical cavities. We have also investigated the tolerance, assuming our original quantum key distribution system, for practical "nearly single-photon source" and clarified that the tolerance is very practical, which is a very good news to the experimentalists. This research result was covered by Nihon Keizai Shinbun.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	16,200,000	4,860,000	21,060,000
2009年度	17,300,000	5,190,000	22,490,000
2010年度	13,900,000	4,170,000	18,070,000
2011年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2012年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
総計	66,100,000	19,830,000	85,930,000

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：動的相関光科学、非古典光、光と物質の相互作用、非線形光学、量子情報

1. 研究開始当初の背景

量子力学には「量子もつれ」という直感的に理解し難い遠隔相関がある。これは量子コンピューターや量子暗号に利用される。ここで必要となる単一光子や複数光子間量子もつれをオンデマンドで発生するには、光と物質の相互作用を究極的に制御する必要がある。それは光を微小な空間に閉じ込める技術と、その空間に強い非線形光学効果や光増幅機能をセットすることである。このようなシーズオリエンテッドな研究の一方で、完全無欠なものがない以上、それをどこまで達

成すべきかを明らかにするニーズオリエンテッドな研究が必要である。

2. 研究の目的

本研究は上記のシーズオリエンテッドな研究として、ナノ構造を利用した微小共振器、強相関を利用した量子もつれ発生および配布、微小共振器を利用した光 Kerr 効果増強の可能性を追求することを目的とする。一方シーズオリエンテッドな研究として、量子情報処理で要求される「理想的単一光子源からどれだけ不完全でもよいか」や「理想的量子もつれからどれだけ不完全でもよいか」を研

究し、自分のみならず新領域の他の研究者達へ目標設定のフィードバックを行うことを目的とする。そのため、理論および実験の両方を行う。

3. 研究の方法

上記「量子もつれ発生および配布」においては量子リピーターを先々の目標とし、その構成法の理論的研究に加えて波長変換実験を行う。「微小共振器を利用した光 Kerr 効果増強の可能性追求」に関してはマイクロトroid共振器を念頭に光 Kerr 効果を使った量子非破壊測定をどこまで改良できるか、理論的に設計する。実験としては実際にマイクロトroidを共同研究者から入手し、我々が得意とする光学測定を用いて作製者に設計の指針をフィードバックする。また「理想的単一光子源からどれだけ不完全でもよいか」や「理想的量子もつれからどれだけ不完全でもよいか」については、以前我々が提案した量子暗号方式において必要とされる要求条件を理論的に明らかにし、単一光資源などの開発研究グループに目標設定をフィードバックする。

4. 研究成果

波長変換の実験は成功し、通信波長とデバイス波長間の変換のラインナップが完成した。これは報道発表が多数なされるに至った。マイクロトroid共振器を念頭に光 Kerr 効果を使った量子非破壊測定をどこまで改良できるかについては海外との共同研究も成功し、Optics Express 誌で論文発表した。マイクロトroidの光応答特性測定については、光速度の slowing down の観測までに至った。「単一光子」度の許容範囲については、実は許容範囲が相当大きいことが判明し、実験家に対する朗報となった。これは日経新聞で報道された。

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 28 件)

- 1 Kazuhiro Igeta, Nobuyuki Imoto, and Masato Koashi, "Fundamental limit to qubit control with coherent field", Phys. Rev. A 87, 022321-1-8 (2013)
- 2 K. Fujii, Y. Nakata, M. Ohzeki, and M. Mura, "Measurement-Based Quantum Computation on Symmetry Breaking Thermal States" ,(selected to Editors' suggestion) Phys. Rev. Lett. 110, 120502 (2013), 査読有, 謝辞有
- 3 Rikizo Ikuta, Hiroshi Kato, Yoshiaki

Kusaka, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hiroataka Terai, Mikio Fujiwara, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Masahide Sasaki, Zhen Wang, and 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

- 4 M. Ohzeki and K. Fujii "Duality analysis on random planar lattices, "Physical Review E 86, 051121 (2012)
- 5 Keisuke Fujii and Yuuki Tokunaga, "Error and loss tolerances of surface codes with general lattice structures" ,Phys. Rev. A 86, 020303(R) (2012), 査読有, 謝辞有
- 6 Tomoyuki Morimae and Keisuke Fujii, "Blind topological measurement-based quantum computation" ,Nature Communications 3, 1036 (2012), 査読有, 謝辞有
- 7 Kazuhiro Yokota and Nobuyuki Imoto, "A strange weak value in spontaneous pair productions via a supercritical step potential" New J. Phys. 14 083021 (2012)
- 8 Tomoyuki Morimae and Keisuke Fujii, "Not all physical errors can be linear CPTP maps in a correlationspace", Scientific Reports 2 508 (2012), 査読有, 謝辞有
- 9 Koji Azuma, Hitoshi Takeda, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, "Quantum repeaters and computation by a single module: Remote nondestructive parity measurement", Phys. Rev. A 85, 062309-1-7 (2012 June)
- 10 K. Fujii and T. Morimae, "Computational power and correlation in a quantum computational tensor

- network" ,Phys. Rev. A 85 032338 (2012). 査読有, 謝辞有
- 11 K. Fujii and T. Morimae, "Topologically protected measurement-based quantum computation on the thermal state of a nearest-neighbor two-body Hamiltonian with spin-3/2 particles" ,Phys. Rev. A 85, 010304(R) (2012). 査読有, 謝辞有
 - 12 Rikizo Ikuta, Yoshiaki Kusaka, Tsuyoshi Kitano, Hiroshi Kato, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, "Wide-band quantum interface for visible-to-telecommunication wavelength conversion", Nat. Commun. 2 537 (2011) doi: 10.1038/ncomms1544.
 - 13 S. K. Ozdemir, E. Matsunaga, T. Tashima, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, "An optical fusion gate for W-states", New J. Phys. 13 103003 (2011)
 - 14 Kaoru Shimizu, Hiroyuki Fukasaka, Kiyoshi Tamaki, and Nobuyuki Imoto, "Cheat-sensitive commitment of a classical bit coded in a block of $m \times n$ round-trip qubits" , Phys. Rev. A 84, 022308 (2011).
 - 15 Rikizo Ikuta, Yohei Ono, Toshiyuki Tashima, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, "Efficient decoherence-free entanglement distribution over lossy quantum channels", Phys. Rev. Lett. 106, 110503 (2011)
 - 16 Rikizo Ikuta, Toshiyuki Tashima, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, "Optimal local expansion of W states using linear optics and Fock states "Phys. Rev. A 83, 012314 (2011).
 - 17 Toshiyuki Tashima, Tsuyoshi Kitano, Sahin Kaya Ozdemir, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, "Demonstration of Local Expansion Toward Large-Scale Entangled Webs", Phys. Rev. Lett. 105, 210503 (2010)
 - 18 T. Seki, H. Shibata, H. Takesue, Y. Tokura, N. Imoto, "Comparison of timing jitter between NbN superconducting single-photon detector and avalanche photodiode", Physical C 470, 1534-1537 (2010)
 - 19 Koji Azuma, Naoya Sota, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, "Tight bound on coherent-state-based entanglement generation over lossy channels", Phys. Rev. A 81, 022325 (2010)
 - 20 Koji Azuma, Naoya Sota, Ryo Namiki, Sahin Kaya Ozdemir, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, "Optimal entanglement generation for efficient hybrid quantum repeaters", Phys. Rev. A 80, 060303(R) (2009).
 - 21 Yoritoshi Adachi, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, "Boosting up quantum key distribution by learning statistics of practical single-photon sources," New J. Phys. 11. 113033 (2009)
 - 22 Karol Bartkiewicz, Adam Miranowicz, and Sahin Kaya Özdemir,

- "Optimal mirror phase-covariant cloning," ,Phys. Rev. A 80, 032306 (2009).
- 23 K. Tamaki, N. Lütkenhaus, M. Koashi, and J. Batuwantudawe, "Unconditional security of the Bennett1992quantum-key-distribution scheme with a strong reference pulse," Phys. Rev. A 80, 032302:1--9 (2009)
- 24 Masato Koashi, "Simple security proof of quantum key distribution based on complementarity", New J. Phys. 11 045018 (2009)
- 25 Toshiyuki Tashima, Tetsuroh Wakatsuki, Sahin Kaya Ozdemir, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, "Local Transformation of Two Einstein-Podolsky-Rosen Photon Pairs into a Three-Photon W State", Phys. Rev. Lett. 102, 130502 (2009)
- 26 Kazuhiro Yokota, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, "Direct observation of Hardy's paradox by joint weak measurement with an entangled photon pair, "New J. Phys. 11, 033011(2009), IOP press release - Quantum paradox directly observed - a milestone in quantum mechanics, New Journal of Physics - Best of 2009
- 27 M. S. Tame, S. K. Ozdemir, M. Koashi, N. Imoto, M. S. Kim, "Compact Toffoli gate using weighted graph states",Phys. Rev. A 79, 020302 (2009)
- 28 Toshiyuki Tashima, Sahin Kaya Ozdemir, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto, "Local expansion of photonic W state using a polarization dependent beamsplitter", New J. Phys. 11, 023024 (2009)
- [学会発表] (計 161 件)
国際 74 件
1. N. Imoto, " Two-state formalism and photonic quantum information processing", 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, Nara Prefectural New Public Hall, Japan, (invited)
 2. R. Ikuta, " Non-classical two-photon interference between telecom light pulses converted by difference-frequency generation" , 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, Nara Prefectural New Public Hall, Japan
 3. T. 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, (invited)
 4. T. Yamamoto, R. Ikuta, M. Koashi, N. Imoto, "A Photonic Quantum Interface for Visible-to-Telecommunication"

- n Wavelength Conversion"
IEEE PHOTONICS CONFERENCE
2012, 2012/9/26, Hyatt Regency San
Francisco Airport, USA,(invited)
5. Hidetoshi Kumagai, Takashi Yamamoto,
Masato Koashi and Nobuyuki Imoto,
"On the robustness of quantum
communication based on
decoherence-free subspace using
counter propagating weak coherent
laser light" ,
International Conference on Quantum
Foundation and Technology (ICQFT
2012)
2012/8/25, Dunhuang Hotel, Dunhuang,
China
 6. Keisuke Fujii, Takashi Yamamoto,
Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto,
"A distributed architecture for scalable
quantum computation with realistically
noisy devices", DYCE International
Workshop, 2012/8/19, Kussharo Prince
Hotel, Hokkaido, Japan
 7. R. Ikuta, H. Kato, Y. Kusaka, S. Miki, T.
Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T.
Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z.
Wang, N. Imoto, "High-fidelity
frequency down-conversion of visible
entangled photon pairs with
superconducting single-photon
detectors", 11th International
Conference on Quantum
Communication, Measurement, and
Computing (QCMC 2012),
2012/7/30, Vienna University of
Technology, Vienna, Austria
 8. Keisuke Fujii and Yuuki Tokunaga,
"Thresholds of surface codes on the

- general lattice structures suffering
biased error and loss", 11th
International Conference on Quantum
Communication, Measurement, and
Computing (QCMC
2012), 2012/7/30, Vienna University of
Technology, Vienna, Austria
9. Keisuke Fujii, Takashi Yamamoto,
Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto,
"Fault-tolerant quantum computation
and communication on a distributed 2D
array of small local systems", 11th
International Conference on
Quantum Communication, Measurement
, and Computing (QCMC 2012), 2012/7/30,
Vienna University of Technology, Vienna,
Austria
 10. Nobuyuki Imoto, "Photonic quantum
communication with noisy and lossy
channels", Quantum 2012 (Advances in
Foundations of Quantum Mechanics
and Quantum Information with atoms
and photons), 2012/5/24, Turin, Italy
(Invited)

以下省略

国内 87 件

1. 松尾亮, 藤井啓祐, 井元信之, "イジング
分配関数の複雑性と量子計算" 日本物理
学会第 68 回年次大会, 2013/3/28, 広島大
学 東広島キャンパス
2. 藤井啓祐, 山本俊, 小芦雅斗, 井元信之, "4
量子ビット局所系を用いた分散型量子計
算" 日本物理学会第 68 回年次大会,
2013/3/28, 広島大学 東広島キャンパス
3. 井桁和浩, 井元信之, 小芦雅斗, "量子
Bang-Bang 制御によるデコヒーレンス
抑制の限界" 日本物理学会第 68 回年次
大会, 2013/3/28, 広島大学 東広島キャン

パス
以下省略

〔図書〕(計 13 件)

1.井元信之,「人物で学ぶ物理 10」～仮説クリエイターとしてのデイヴィッド・ボーム～数理科学, 2013 年 3 月号 No.597.

「Manipulating the color and shape of single photons」,Physics Today, Volume 65 Issue 11 page 32

2.井元信之,V.ヴェドゥラル/井元信之訳監修「シュレーディンガーの鳥」,日経サイエンス 2011 年 10 月号.

3.井元信之,「隠れた変数一ベル不等式など」,数理科学,2011 年 7 月号(特集:「隠れた」物理法則), pp.40-45,

4.横田一広、井元信之,「弱い量子測定によるハーディーのパラドックスの観測」,日本物理学会誌 Vol.65, No.8, 2010 年 8 月号, pp.606-613

5.山本俊,「広がる光量子情報技術」 パリティ Vol.25 No.01 2010 年 1 月号 pp.8-10

6.井元信之,現代数理科学事典,編集委員会代表:広中平祐、丸善(2009.12.30)、pp.137-145 「2.8 量子情報」

7.井元信之,光科学研究の最前線,同編集委員会編(2009.12.21)p.9「量子情報」 p.18「量子測定」

8.井元信之,基礎からの量子光学,松岡正浩・江馬一弘・平野琢也・岩本敏監修:オプトロニクス社(2009)、pp.275-288「量子情報処理と光子の利用」

9.井元信之、横田一広,「量子の“開かずの間”をのぞき見る」,日経サイエンス Vol.39 No.10(2009 年 10 月号), pp.29-35

10.ウィリアム・ウーターズ,ヴォイチェフ・ズーレック,山本俊 訳,

「量子の世界,複製不可能定理」 パリティ Vol.24 No.08 2009 年 8 月号 pp.44-47

11.井元信之,量子の新時代(朝日新書),著者:佐藤文隆、井元信之、尾関章,出版社:朝日新聞出版,出版年月:2009 年 7 月,

ISBN:978-4-02-273287-3

12.井元信之,「多体エンタングルメント情報処理」,数理科学第 47 巻第 2 号 p.42-47 (2009).

13.井元信之,「量子情報処理と光子の利用」月刊オプトロニクス第 27 巻 第 320 号, pp.165-173 (2008).

14.徳永裕己,「光量子もつれクラスター状態を用いた量子演算の実装実験」光学 第 37 巻 第 12 号 (2008 年 12 月) .

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