

令和 元年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2015～2018

課題番号：15KK0164

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（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Universal quantum operation on optical frequency states(Fostering Joint International Research)

研究代表者

山本 俊 (YAMAMOTO, TAKASHI)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：10403130

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円

渡航期間： 7ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究課題は光周波数領域での量子操作を追求する元課題を発展させるために、微小光共振器による非線形光学効果の増強を目指した基礎研究およびイオントラップへの光周波数変換器の応用研究に関する国際共同研究を行った。微小光共振器に関しては、高いQ値を実現するボトル型微小光共振器の作成に成功し、非線形光学効果の増強による様々な非線形光学効果を実現した。これに加えて、光周波数変換を利用して、イオントラップから単一光子を光通信波長帯へ変換し長距離通信が可能なことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子コンピューターや量子インターネットを光で実現していくためには、多重化や長距離化に向けた今後の展開が非常に重要となってくる。このために量子領域で増強された非線形光学効果が利用できることが重要である。本研究では、その基礎となる微小光共振器による非線形光学効果の増強やイオントラップに利用できる光周波数変換を示すことができ、今後の展開に非常に期待ができる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, in order to strengthen our research on quantum operation in frequency domain, we have performed the fundamental research for enhancing the nonlinear optical effect by optical microcavities and the applied research for a quantum frequency conversion for a single photon emitted from a single trapped ion with foreign collaborators. We developed a bottle microresonator with a high Q factor and observed several phenomena given by the enhanced nonlinear optical effects. Furthermore, we showed the potential of a long-distance quantum communication with trapped ions.

研究分野：量子情報

キーワード：量子情報 量子光学 量子エレクトロニクス 微小光共振器 量子通信 量子コンピューター 光周波数変換 非線形光学

1. 研究開始当初の背景

本研究課題は光周波数領域の量子操作をより強化する国際共同研究を行うものである。すでに採択されている元課題「光周波数領域におけるユニバーサル量子操作」では、光周波数を基底状態とした多次元ヒルベルト空間上の量子状態を自在に操作するための基盤技術の実証を目指して研究を進めている。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、光周波数で張るヒルベルト空間上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。また、特定の光周波数の様々な自由度の量子情報を別の光周波数の量子情報へ変換する量子インターフェースの研究も重要である。しかし、他の自由度と異なり、光周波数の量子操作は未開拓であった。

中核をなす原理は、単一光子の光周波数をコヒーレントに変換する光周波数変換であり、このような方向性の研究は海外でもいくつかの試みがスタートしていた (Phys. Today 65(11), 32 (2012), Phys. Rev. Lett. 113, 053603 (2014))。また、理論的な枠組みは非常に一般的であるため、様々な物理系に応用が可能である。例えば、光共振器の機械振動 (フォノン) を光の輻射圧によって励起するオプトメカニクス (Rev. Mod. Phys. 86, 1391(2014)) では、コヒーレントフォノンによる単一光子のコヒーレントな光周波数変換を可能にする。このように、研究の対象物質は変わるが、同様の理論的枠組で議論することができる。そのため、元課題「光周波数領域におけるユニバーサル量子操作」の適用範囲は広く、広範な研究領域において利用することができる。例えば、2次の非線形光学効果を用いた光周波数変換は一般に2入力2出力の量子操作を可能にする。この相互作用の強さは励起光強度によって調整できる。元課題では、すでにこのような量子操作の基本となる量子干渉である Hong-Ou-Mandel 干渉を異なる光周波数間で実現する新しい量子干渉効果を提案し、その観測に成功している (Nature Photonics, 10, 441, (2016).)。

2. 研究の目的

元課題での光周波数領域の量子状態を自在に操ることが可能になれば、光周波数多重化と組み合わせることで、広範な量子操作を実現することが可能である。このためには、光周波数多重された光子源や多重化されたモード間の相互作用のための励起光が必要となる。現状の非線形光学媒体では必要となるレーザーパワーが大きく、このような多重化に対応することは難しく、元課題の発展を阻んでいる。一つの解決法として、励起光を光共振器により閉じ込め、実効的な非線形光学効果を増強することで、レーザーパワーの増大を防ぐことが考えられる。本研究では、元課題のさらなる発展のために光共振器により増強された非線形光学効果に関する国際共同研究を推進し、その実現可能性を探ることを目的としている。また、光周波数変換は単に光を使った量子情報処理の観点だけでなく、物質系に適した光周波数に変換することで、様々な物質系の量子情報処理をつなげる役割も持つ。その可能性を広げるために、これまで光量子情報通信で利用されてこなかったイオントラップとの連携を図るための国際共同研究を推進する。

3. 研究の方法

このような研究の発展を模索するために、超高Q値の光共振器を利用することを考えた。その当時から現在に至るまで、そのような光共振器として Whispering-Gallery Mode (WGM) 型のものが世界的に研究されており、 10^9 程度の超高Q値が実現されている。また、これを用いた μW から mW クラスの励起光を用いた非線形光学効果の研究が盛んに行われている。本国際共同研究ではこのような超高Q値微小共振器を作成することができる研究機関に滞在し、超高Q値微小共振器に関する研究交流を行い、申請者の機関で実験を立ち上げる。一方、イオントラップとの連携では、申請者の機関で作成した光周波数変換器を共同研究機関に持ち込み、イオントラップに組み込む実験を行う。

4. 研究成果

本研究課題の一つは微小光共振器を用いた非線形光学効果の増強による光子源の多重化や量子操作の多様化である。高いQ値を実現する微小光共振器においてはこの非線形光学効果の増強が顕著であり、様々な非線形光学現象が観測されている。共同研究先はトロイド型 Whispering-Gallery Mode (WGM) 微小共振器の研究で先進的な研究成果をあげているワシントン大学セントルイスの Lan Yang 教授および Sahin Kaya Ozdemir 准教授の研究室である。非線形光学効果の増強実験の前段階として、ワシントン大学で作成されたトロイド型 WGM のサンプルが大阪大学の実験室で動作可能かどうかの確認実験を行った。基本的な動作確認の後に、強い光閉じ込めにより可能となる光パルスの群遅延制御の実験を行った。光パルスの遅延および進行は共振器に光を導入する導波路と共振器の結合強度によって制御することができる。最初の実験では、この結合強度は導波路と共振器の距離を制御することによって行った。典型的な値として、光パルス幅 17 ns に対して、15 ns 程度の遅延および進行を観測することができ、弱測定との関連性も整理することができた [論文(5)]。光共振器中に利得媒体を含む場合には、結合強度は利得媒体を励起することによって光学的に制御することができる。トロイド型 WGM 微小共振器はシリカでできているが、これに利得媒体であるエルビウムをドーブしたサンプルでもこのパルス伝搬実験を行い、光による光パルスの群速度制御に成功した [論文(4)]。

非線形光学効果の増強には、より作成が容易な WGM 微小光共振器であるボトル型光共振器を用いた。ボトル型微小光共振器は標準的なシリカ光ファイバー(直径 125 μ m)を伸長することで作成が可能であり、複雑な作成工程が不要である。光学 Q 値も 10^8 程度であり、非常に高いものが得られた。最初に、シリカのもつ 3 次の非線形光学効果による 3 次高調波発生を確認した。1557 nm の励起光に対して、3 次高調波に相当する 519 nm の発光が見られた。励起光は外部共振器型レーザー光(線幅 300 kHz)を EDFA により増幅し、130 mW 程度で実験を行った。この 3 次高調波の波長では CCD カメラによって発光を観察することができる。これにより、ボトル型微小光共振器に特徴的な、ファイバー長方向への共振器モードの広がりを確認することもできた。これに加えて、2 つの基本波(1557 nm)と 1 つのラマン散乱による高調波発生(SFG1)、1 つの基本波(1557 nm)と 2 つのラマン散乱による高調波発生(SFG2)、3 つのラマン散乱による高調波発生(RTHG)も観測することができた。さらに興味深いことに、バルクのシリカでは通常見られない基本波(1564 nm)の 2 次高調波(782 nm)発生を観測することができた。これにより、新しい光子対光源の可能性を見出すことができた[論文(6)]。

高調波発生とは別に増強したパラメトリック発振の実験も行った。シリカファイバーでは 11GHz 程度の音響フォノンによるブリルアン散乱が観測される。ボトル型微小光共振器は上の高調波発生でも見られるように、ファイバー長方向への共振器モードの広がりがあり、ボトルの長さを調整することで、この 11GHz の共鳴を得ることができた。この共鳴により、誘導ブリルアン散乱(SBS)を誘起し、ブリルアンレーザーを観測した。Q 値が 10^8 と非常に高いため、発振しきい値は低く、0.45 mW と見積もられた。更に、この誘導ブリルアン散乱による四光波混合の誘起により、コム状のパラメトリック発振が得られることがわかった[論文(8)]。これらは周波数多重化された光子対光源だけでなく、光周波数変換にも応用が可能であることを示している。これらの共同研究を元に、独自のアプローチの研究も進めた。従来から光周波数変換に用いてきた PPLN 導波路の端面に誘電体多層膜コーティングを施すことで、ファブリーペロー型光共振器を形成し、非線形光学効果を増強する方法も試みた。Q 値は 10^6 程度を実現でき、パラメトリック発振により、コム状のスペクトルが得られた[論文(1)]。現在、新しい光子対光源としての性能確認を行っている。

単一光子周波数変換では、Matthias Keller 教授との共同研究を行った。イオントラップは量子情報処理の有望な媒体の一つである。その中で、カルシウムイオンは 866 nm の遷移を利用した単一光子発生が可能であり、単一光子周波数変換によって、光通信波長帯に光子を変換することで、長距離ファイバー通信が期待できる。本研究では、PPLN 導波路を用いて、866 nm 光子を 1530 nm へ変換する。このとき、1995 nm の励起光は 866 nm の外部共振器半導体レーザーと EDFA により増幅された 1530 nm の DFB レーザーの差周波発生により生成し、ツリウムドープファイバー光増幅器によって増幅する光学系を構築することで実現した。この差周波発生にも PPLN 導波路を用いた。励起光システムおよび単一光子周波数変換システムと Matthias Keller 教授のグループのカルシウムイオントラップとを組み合わせることで、カルシウムイオンからの単一光子を通信波長に変換し、10 km ファイバー通信を行った後でも単一光子性を保持していることを確認した[論文(3)]。

5 . 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文](計 9 件)

- (1) Rikizo Ikuta, Motoki Asano, Ryoya Tani, Takashi Yamamoto, Nobuyuki Imoto, Frequency comb generation in a quadratic nonlinear waveguide resonator, *Optics Express*, 26, 15551-15551, 2018, 査読有, DOI: 10.1364/OE.26.015551
- (2) S. A. Uriri, T. Tashima, X. Zhang, M. Asano, M. Bechu, D. Ö. Güney, T. Yamamoto, Ş. K. Özdemir, M. Wegener, M. S. Tame, Active control of a plasmonic metamaterial for quantum state engineering, *Phys. Rev. A*, 97, 053810, 2018, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.97.053810
- (3) Thomas Walker, Koichiro Miyaniishi, Rikizo Ikuta, Hiroki Takahashi, Samir Vartabi Kashanian, Yoshiaki Tsujimoto, Kazuhiro Hayasaka, Takashi Yamamoto, Nobuyuki Imoto, Matthias Keller, Long-Distance Single Photon Transmission from a Trapped Ion via Quantum Frequency Conversion, *Phys. Rev. Lett.*, 120, pp. 203601, 2018, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevLett.120.203601
- (4) Motoki Asano, Sahin Kaya Ozdemir, Weijian Chen, Rikizo Ikuta, Lan Yang, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto, Controlling slow and fast light and dynamic pulse-splitting with tunable optical gain in a whispering-gallery-mode microcavity, *Applied Physics Letters*, 108, 181105-181105 (2016), 査読有, DOI: 10.1063/1.4948922
- (5) Motoki Asano, Konstantin Y. Bliokh, Yury P. Bliokh, Abraham G. Kofman, Rikizo Ikuta, Takashi Yamamoto, Yuri S. Kivshar, Lan Yang, Nobuyuki Imoto, Sahin Kaya Ozdemir, Franco Nori, Anomalous time delays and quantum weak measurements in optical micro-resonators, *Nature Communications*, 7, 13488-13488 (2016), 査読有, DOI:

10.1038/ncomms13488

- (6) Motoki Asano, Shoichi Komori, Rikizo Ikuta, Nobuyuki Imoto, Sahin Kaya Ozdemir, Takashi Yamamoto, Visible light emission from a silica microbottle resonator by second- and third-harmonic generation, Optics Letter, 41, 5793-5796 (2016), 査読有, DOI: 10.1364/ol.41.005793
- (7) Motoki Asano, Yuki Takeuchi, Weijian Chen, Sahin Kaya Ozdemir, Rikizo Ikuta, Nobuyuki Imoto, Lan Yang and Takashi Yamamoto, Observation of optomechanical coupling in a microbottle resonator, Laser & Photonics Reviews, 10, 603-611 (2016), 査読有, DOI: 10.1002/lpor.201500243
- (8) Motoki Asano, Yuki Takeuchi, Sahin Kaya Ozdemir, Rikizo Ikuta, Lan Yang, Nobuyuki Imoto, Takashi Yamamoto, Stimulated Brillouin scattering and Brillouin-coupled four-wave-mixing in a silica microbottle resonator, Optics Express, 24, 12082-12092 (2016), 査読有, DOI:10.1364/oe.24.012082

〔学会発表〕(計14件)

- (1) Thomas Walker, Koichiro Miyanishi, Rikizo Ikuta, Hiroki Takahashi, Samir Vartabi Kashanian, Yoshiaki Tsujimoto, Kazuhiro Hayasaka, Takashi Yamamoto, Nobuyuki Imoto, Matthias Keller, Long-distance single photon transmission from a trapped ion via quantum frequency conversion, QTech2018 (Quantum Technology International Conference 2018), 2018.
- (2) 宮西 孝一郎, T. Walker, 生田力三, S. Kashani, 高橋優樹, 達本吉朗, 早坂和弘, 山本俊, 井元信之, Matthias Keller, 40Ca+から通信波長帯への単一光子波長変換, 第73回日本物理学会春季大会, 2018.
- (3) Takashi Yamamoto, Motoki Asano, Sahin Kaya Ozdemir, Controlling group delay with passive and active microresonators, SPIE Photonic West 2017.

6. 研究組織

研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名: Matthias Keller

ローマ字氏名: Matthias Keller

所属研究機関名: サセックス大学

部局名: 電子分子光物理グループ

職名: グループリーダー

研究協力者氏名: Lan Yang

ローマ字氏名: Lan Yang

所属研究機関名: ワシントン大学セントルイス

部局名: 電気電子システム工学

職名: 教授

研究協力者氏名: Sahin Ozdemir

ローマ字氏名: Sahin Ozdemir

所属研究機関名: ペンシルベニア州立大学

部局名: Engineering Science

職名: 准教授

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。