

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21340114

研究課題名(和文) 連続波レーザー励起による超高繰り返し超短パルス光列の発生

研究課題名(英文)

Generation of ultrahigh-repetition-rate ultrashort laser pulses  
in the continuous regime

研究代表者

桂川 眞幸 (KATSURAGAWA MASAYUKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：10251711

研究成果の概要(和文)：ナノ秒パルスレーザーを用いて確立した“超高繰り返し超短パルス光列の発生技術”を連続波領域に拡張することを目指した。必要とされる要素技術、「二周波数共振注入同期連続波レーザー」、「共振器内ラマン発生システムと、中空コアファイバー内ラマン発生システム」、及び、「連続波領域におけるラマンサイドバンド発生の理論」を構築した。さらに、それらの要素技術を組み合わせて、連続波領域におけるラマンサイドバンド発生実験をおこない、広帯域サイドバンド発生に必要とされる励起強度、及び、閉じ込め条件を実験的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research project is to extend the new technique of ultrahigh-rep.-rate ultrashort-pulse generation to the continuous regime, the basis of which was established in the nanosecond pulsed regime. We have build up all the required elements for this purpose; “Dual-freq.-oscillation injection-locked Ti:Sapphire cw laser”, “Intracavity Raman generation system”, and “Theory of Raman sideband generation in the cw regime”. Furthermore, we combined all of these elements established here and carried out the Raman sideband generation in the cw regime. We have clarified the excitation power and the confinement condition necessary for realizing a broad Raman generation in the cw regime based on the experiment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：物理学一般

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：レーザー 連続波 超短パルス 共振器 ラマン

## 1. 研究開始当初の背景

光科学は、レーザーの極限化技術とともに、互いに表裏一体をなし発展してきた。「単一

周波数化」の極限化技術と相補的に高精度レーザー分光学が発展し、レーザー冷却、BECの実現に至った経緯は周知の通りである。さ

らに、2000年には光周波数コムが誕生し、互いに逆の極限と思われていた「単一周波数化」と「短パルス化」の双方の極限が融合した。この光周波数コムの技術は、「単一周波数化」の軸においては“光周波数標準”を実現し、「短パルス化」の軸においては“単一アト秒パルスの発生”を可能にした。いずれの成果も超短パルスチタンサファイアレーザーの成熟した技術を基礎として成されたものである。

一方、レーザ技術の極限化を追求する軸としては、これらとは独立に「パルス列の高精度高繰り返し化」という極限化の軸を考えることもでき、そのような極限化レーザーと互いに相補的に発展する光科学の新しい研究分野が創出される可能性を追求することは大変興味深い。これまで、このような視点からの研究がなされていなかったのは、それを行うに十分なポテンシャルをもった光源が無かったことが、その主たる要因と考えられる。一方、現在では、GHzを含めTHzを超える領域の繰り返し周波数をもった新しい極限化レーザー光源が開発されつつある。実際、我々はパラ水素の純回転遷移( $J=2 \leftarrow 0$ ; 10.632 THz)を断熱励起することで、940 nmの近赤外から370 nmの紫外近傍の超広帯域に渡って、10.6 THz間隔の高品質コヒーレント光が生成してきた。

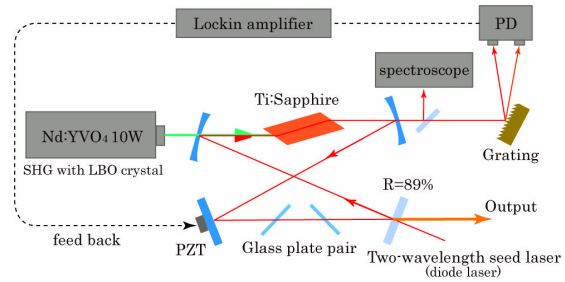
## 2. 研究の目的

本研究計画は、ナノ秒パルスレーザーを用いて確立した“超高繰り返し超短パルス光列の発生技術”を連続波領域に拡張することを目的とした。単一周波数連続波レーザー光を出発点として、THzを超える超高繰り返しをもち、かつ、絶対位相が制御された超短パルス列や任意波形光列の生成を目指した。

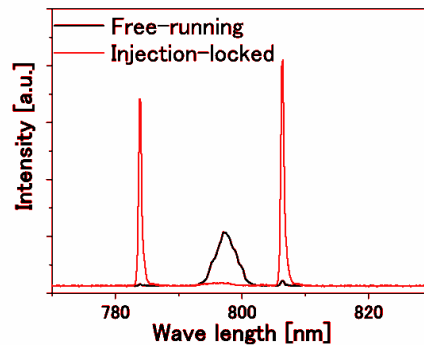
## 3. 研究の方法

この研究で構築を試みるシステムの全体は、大きく「二周波数発振注入同期連続波レーザー」、「二周波数の注入同期出力の位相同期」、「共振器内ラマン発生システムと、中空コアファイバー内ラマン発生システム」の三つから構成される。研究計画の前半は、これらの要素技術を確立する作業が中心になる。また、この期間に、同時に、「ラマンコヒーレンスの連続波領域での断熱生成の理論」を構築する作業を進める。研究計画の後半では、前半において構築した要素技術を統合して、主目的である、連続波領域における超高繰り返し超短パルス光列の生成に取り組む。ナノ秒パルスを用いたこれまでの研究と本質的に異なるのは、その発生過程を全て高フィネスの共振器内、または、中空コアファイバー内で行うことにある。

## 4. 研究成果



任意の二周波数で同時“連続発振”する注入同期チタンサファイアレーザーの開発をおこない、新レーザー技術として確立した。図1は開発したレーザーシステムの概略である。共振器内には、レーザー結晶、及び、波長選択の自由度を与えるガラスプレートペアのみが配置されている。外部より、周波数を安定化した二周波数の種光を注入することで、任意の二周波数の組み合わせでの発振が可能である。図2は、二周波数発振スペクトルの典型例を示す。フリーランニング発振（黒



線)が抑制され、種光として注入した二周波数成分に引き込まれて発振していることが分かる。励起パワー10 Wのときに、二周波数の合計で3 W以上の高出力が得られた。

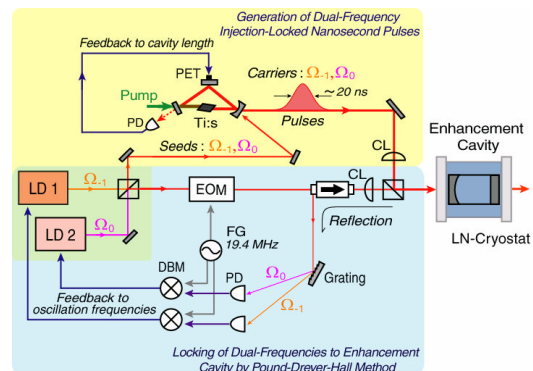
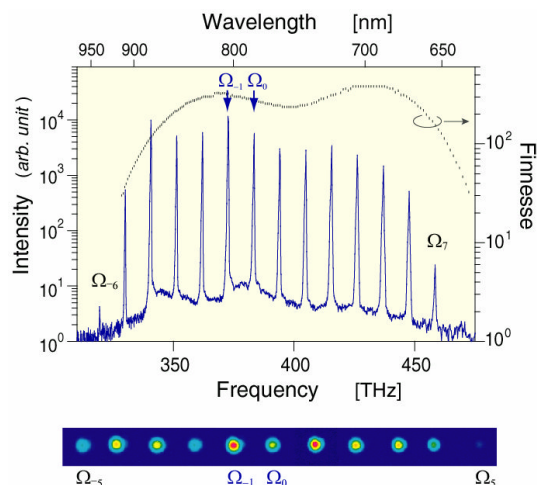


図3は共振器内ラマン発生システムの概略である。ラマンサイドバンド発生用のエンハンスメント共振器に、種光の二周波数をあらかじめPound-Drever-Hall法を用いて共振させ、それを、同時に二周波数発振注入同期チタンサファイアレーザーに種光として注入した。発振した二周波数がエンハンスメント共振器内に、完全かつ安定に閉じ込められること

が確認された。

予備実験として、二波長のナノ秒パルスを用いた、共振器内ラマンサイドバンド発生の実験をおこなった。図4がその典型例である。650~950nmの広帯域に渡って、フラットなサイドバンドスペクトルを発生できていることがわかる。エンハンスメント共振器を用いることで、自由空間中に比べ、およそ3000分の1に励起強度を低減化することができた。中空コアファイバー内に閉じ込めた系でも実験をおこない、ほぼ同程度の励起強度の低減化を達成できることが確認された。



連続発生領域におけるラマンコヒーレンスの振る舞いについて、様々な側面から、解析的、数値的に検討をおこなった。要点は、位相緩和係数と励起強度の間に最適な関係が存在することが明らかになったことである。

以上の要素技術と理論研究の結果を組み合わせ、連続波領域におけるラマンサイドバンド発生実験をおこなった。まず、理論から予想される最適な密度、温度にパラ水素を設定し、得られた結果と理論との比較をおこないながら、精密に現実の系における最適温度密度条件を詰める作業をおこなった。次に励起強度を変えながら、発生する誘導ラマン散乱光系列のスペクトルを系統的に調べた。実験的な観点から、様々な条件下の測定データを蓄積した。サイドバンドを十分広帯域に発生するコヒーレンスの生成には及ばなかったが、一連の実験から、励起強度、または、閉じ込めを、あと一桁高くすることで、狙いとした結果を得られるだろうということが明らかになった。

##### 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7件)

1) M. Katsuragawa, R. Tanaka, H. Yokota, and T.

Matsuzawa, Raman-type optical frequency comb adiabatically generated in an enhancement cavity, arXiv1001.0238v (2010). 査読なし

2) K. R. Pandiri and M. Katsuragawa, A 10 THz Function Generator- generation of rectangular- and triangular- shaped pulse trains -, New Journal of Physics, Vol. 13, 023030 (2011). 査読有

3) Tsuguhito Nakano, Kenta Koizumi, Takashi Onose, Kohji Abe, and Masayuki Katsuragawa, Dual-frequency injection-locked nanosecond pulsed laser with arbitrary combination of two oscillation frequencies, Optics Express. Vol. 18, No. 25, 26409 – 26416 (2010). 査読有

4) T. Suzuki, and M. Katsuragawa, Femtosecond ultrashort pulse generation by addition of positive material dispersion, Optics Express Vol. 18, No. 22, 23088 – 23094 (2010). 査読有

5) K. R. Pandiri, T. Suzuki, A. Suda, K. Midorikawa, and M. Katsuragawa, Line-by-line control of 10-THz-frequency-spacing Raman sidebands, Optics Express. Vol. 18, No. 2, 732 – 739 (2010). 査読有

[学会発表] (計35件)

1) M. Katsuragawa: Toward broad Raman generation in the continuous wave regime, 42-th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, PQE-2012, Snowbird, Salt Lake City, Utah, USA, 2 – 6, January (2012). **Invited** 査読なし

2) M. Katsuragawa, T. Suzuki, and K. R. Pandiri: “Generation, manipulation, and characterization of highly-discrete coherent spectrum”, Nonlinear Optics (NLO), Marriott Kauai Beach Resort, Kauai, Hawaii, United States, 17 – 22, July (2011). 査読有

3) M. Katsuragawa, T. Suzuki, J. K. Anthony and K. R. Pandiri: “Novel approach for generation of a train of ultrashort pulses by counterintuitively adding a positive dispersion”, 20th International Laser Physics Workshop (LPHYS’11), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, July 11–15, (2011). **Invited** 査読有

4) M. Katsuragawa: A Raman approach for ultrafast optical technology, 41-th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, PQE-2011, Snowbird, Salt Lake City, Utah, USA, 2 – 5, January (2011). **Pleenary Talk** 査読なし

5) M. Katsuragawa and K. R. Pandiri: Optical wave synthesizer realized with an adiabatic Raman process, International Conference on Recent Frontiers in Applied Spectroscopy (ICORFAS-2010), Department of Physics (DST-FIST SPONSORED) Annamalai University, Annamalinagar, India, 22 - 24, September (2010). **Invited** 査読なし

6) K. R. Pandiri and M. Katsuragawa: Manipulation of Quantum coherence and its application to Arbitrary Optical Waveform generation, The fifth Workshop of the Stimulated Brillouin Scattering and Phase Conjugation, Keyaki-Kaikan building, Chiba University, Japan, 25 - 27, August (2010). **Invited** 査読なし

7) Kanaka Raju P., T. Suzuki, A. Suda, K. Midorikawa, and M. Katsuragawa: Line-by-line control towards 10-THz repetition rate arbitrary optical waveform generation, CLEO/QELS 2010, CLEO, CMEE2, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA, May. 18 - 20 (2010). 査読有

8) M. Katsuragawa, R. Tanaka, H. Yokota, and T. Matsuzawa: A Raman-type optical frequency comb adiabatically generated in an enhancement cavity, CLEO/QELS 2010, QELS, QTuA4, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA, May. 18 - 20 (2010). 査読有

9) M. Katsuragawa, Kanaka Raju P., K. Shiraga, H. Aoki, F. Benabid, F. Couny, and Y. Y. Wang: Efficient generation of broad Raman sidebands in a kagome-lattice-type photonic crystal fiber, CLEO/QELS 2010, CLEO, CTuT6, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA, May. 18 - 20 (2010). 査読有

10) M. Katsuragawa, R. Tanaka, H. Yokota, and T. Matsuzawa: Efficient generation of Raman-type optical frequency comb in an enhancement cavity, 40-th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, PQE-2010, Snowbird, Salt Lake City, Utah, USA, 3-7 January (2010). **Invited** 査読なし

11) M. Katsuragawa, Octave-spanning Optical Frequency Comb Produced via Adiabatic Raman process, The international conference on laser spectroscopy: ICOLS 2009, the Kussharo Prince Hotel, Teshikaga, Hokkaido, Japan, June 7-12, (2009). **Invited** 査読有

12) M. Katsuragawa, Adiabatic manipulation of quantum coherence and its application to extreme optical technologies, The 3rd Asian Workshop on Generation and Applications of Coherent XUV and X-ray Radiation (Under the aegis of the Asian Intense Laser Network), HUST, Wuhan, China, June 10-12, (2009). **Invited** 査読なし

13) M. Katsuragawa, F. L. Hong, T. Suzuki, and M. Arakawa: Octave-spanning Raman comb stabilized to an optical frequency standard, CLEO/IQEC2009, 10 Years of Frequency Combs CLEO Symposium II, CMN6, Baltimore MD, USA, 31, May - 5, June (2009). 査読有

14) 桂川真幸: 量子コヒーレンスの断熱操作と極限光技術への展開、「東北大学光科学技術フォーラム」、通研ナノ・スピン総合研究棟、東北大学、2010年6月16日。 **招待講演** 査読なし

15) 桂川真幸: テラビット域における新しい超高速光技術: 発生・計測・制御、電子情報通信学会 超高速光エレクトロニクス研究会、第6回超高速光エレクトロニクス研究会、「超高速光技術の将来展望」、2010年12月3-4日、筑波山 江戸屋。 **招待講演** 査読なし

16) 桂川真幸: 量子コヒーレンスの断熱操作とその非線形光学過程への応用、応用物理学会 量子エレクトロニクス研究会: 「非線形光学50年 その基礎と材料・デバイスおよび応用」、上智大学軽井沢セミナーハウス、2011年12月9~11日。 **招待講演** 査読なし

[図書] (計3件)

1) M. Katsuragawa, T. Suzuki, K. Shiraga, M. Arakawa, T. Onose, K. Yokoyama, F. L. Hong, and K. Misawa: Ultrahigh-repetition-rate pulse train with absolute-phase control produced by an adiabatic Raman process, Laser Spectroscopy, Proceedings of the XIX International Conference, ICOLS 2009, The Kussharo, Hokkaido, Japan, 7-12, June, 2009. H. Katori, H. Yoneda, K. Nakagawa, F. Shimizu (Eds.). ISBN-13 978-981-4282-33-8, Publisher: World Scientific, 1 edition (2010). pp. 181 - 188.

2) M. Katsuragawa, F. L. Hong, M. Arakawa, and T. Suzuki: Generation of octave-spanning Raman comb stabilized to an optical frequency standard, Ultrafast Phenomena XVI, Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference, Palazzo dei Congressi Stresa, Italy, June 9 - 13, 2008. Springer Series in Chemical Physics, Vol. 92, P. Corkum, S. De Silvestri, K. A. Nelson, E. Riedle, R. W.

Schoenlein (Eds.). ISBN: 978-3-540-95945-8, Publisher: Springer; 1 edition (Sep 1 2009). pp. 855 - 857.

3) T. Suzuki, M. Hirai, R. Tanaka, and M. Katsuragawa: Carrier envelope offset control of broad Raman sidebands by locking two pump laser frequencies to a single optical cavity, Ultrafast Phenomena XVI, Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference, Palazzo dei Congressi Stresa, Italy, June 9 – 13, 2008. Springer Series in Chemical Physics, Vol. 92, P. Corkum, S. De Silvestri, K. A. Nelson, E. Riedle, R. W. Schoenlein (Eds.). ISBN: 978-3-540-95945-8, Publisher: Springer; 1 edition (Sep 1 2009). pp. 873 - 875.

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

桂川 眞幸 (KATSURAGAWA MASAYUKI)  
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・  
教授  
研究者番号：10251711

### (2)研究分担者

無し

### (3)連携研究者

無し