

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24244065

研究課題名(和文) 周波数標準の精度をもつ真空紫外広帯域波長可変レーザー

研究課題名(英文) Frequency-tunable vacuum-ultraviolet laser with an optical frequency standard precision

研究代表者

桂川 眞幸 (KATSURAGAWA, MASAYUKI)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：10251711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：真空紫外域において広帯域に連続波長可変なレーザー光源を実現することを目指した。そのために必要とされる様々な二周波数の組合せで発振可能な連続発振注入同期チタンサファイアレーザーを完成させた。また、そのレーザー光に周波数標準の精度を転写することを狙いとして、周波数分割の手法を確立した。さらに、そのようなレーザー光を用いて高次誘導ラマン散乱光の発生を人工的に操作することで、200～120 nmの真空紫外域における高次ラマンモードに100%に近い量子変換効率をもって波長変換が可能なことを数値計算から示した。また、その原理実証実験をおこない、数値計算が信頼できるものであることを実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：We aimed to realize a novel coherent light source, namely, a broadly-tunable vacuum ultraviolet (vuv) laser with an optical-frequency-standard precision. First, we developed the injection-locked continuous wave Ti:s laser which can emit a variety combinations of two frequencies. Next, to transfer an optical-frequency-standard precision to these two frequencies, we also developed the new optical technology which accurately divide an optical frequency into three. Furthermore, we have numerically shown that by employing such laser radiations, high-order stimulated Raman scattering process can be artificially controlled and a frequency conversion to a specific high-order Raman mode in the vuv region can be realized with near unity quantum conversion efficiency.

研究分野：物理学一般

キーワード：レーザー 真空紫外 ラマン

1. 研究開始当初の背景

量子エレクトロニクスの研究分野は、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、Bose Einstein 凝縮へと到った経緯は周知の通りである。また、2000 年には光周波数コムが誕生し、それによって、互いに逆の極限とされていた「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。

ここでは、これまでに確立された誘導ラマン散乱過程の断熱操作技術をもとに、真空紫外域において光周波数標準の周波数精度をもつ高強度・広帯域連続波長可変レーザー光源を実現することを目指した。レーザー波長の短波長化を追求する極限化技術は、現在では、高次高調波発生研究やレーザープラズマ研究の発展により、線域にまで達している。一方で、それらは高強度超短パルスレーザー技術を基礎としたものであり、発生する短波長レーザー光は極めて広いスペクトル帯域から構成される。これと対極にある単一周波数レーザー光という意味では、真空紫外域においても、未だ、应用到耐えうる光源は皆無に近い。

2. 研究の目的

これまでに確立してきた誘導ラマン散乱過程の断熱操作技術をもとに、真空紫外域 (< 200 nm) において、光周波数標準の周波数精度をもつ、高強度・広帯域連続波長可変レーザー光源を実現する。

3. 研究の方法

誘導ラマン散乱過程の断熱操作技術をもとに、真空紫外域 (< 200 nm) において、光周波数標準の周波数精度をもつ、高強度・広帯域連続波長可変レーザー光源を実現することを目指した。計画の全体は、「光周波数標準の精度を転写した二波長の高強度連続波レーザー」、「高い振動コヒーレンスの生成による高次誘導ラマン散乱光系列の発生とその人工操作」の二つから構成される。計画の前半は、高次誘導ラマン散乱光系列の発生のためのレーザー技術を確立する作業を中心に進めた。また、この期間に並行して「高次誘導ラマン散乱光系列の発生とその人工操

作」の理論的枠組みを発展させた。計画の後半は、確立した理論に基づく高次誘導ラマン散乱光系列の発生・操作と真空紫外レーザー光のとしての評価に取り組んだ。

4. 研究成果

二波長連続発振注入同期 Ti:s レーザー

誘導ラマン散乱過程を断熱的に操作するためのレーザー光源として、様々な二周波数の組合せで発振可能な連続発振注入同期チタンサファイアレーザーを開発した。土台はプロジェクト開始時点で既にある程度構築されていたが、このプロジェクトの中で、出力光のビーム品質(縦横単一モード)、安定度、操作性(二波長の選択性、相対強度比の制御性)を向上させ、様々な応用において実践的に使用できるシステムに完成させた。図1は完成したシステムの全体図である。図2はこのレーザーの基本性能(周波数純度、横モードの単一性、出力安定度)の定量評価結果をまとめたものである。

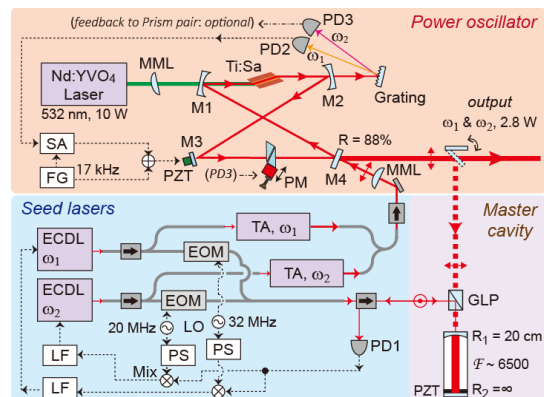


図1. 二波長連続発振注入同期 Ti:s レーザー

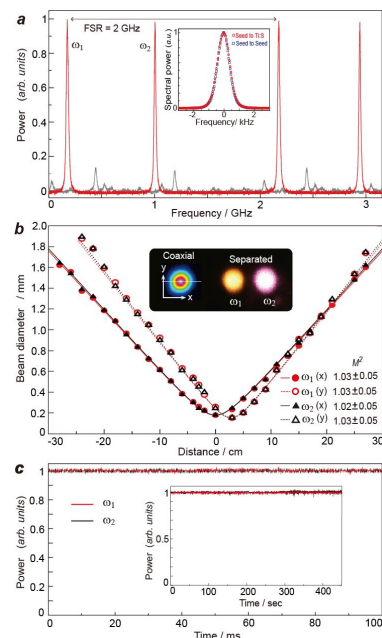


図2. 二波長連続発振注入同期Ti:sレーザーの基本性能

周波数精度の自己安定化と位相同期高調波光の発生

この二波長発振注入同期レーザーシステムに周波数標準の精度をのせるため、エレクトロニクスにおける周波数分割の手法を光領域に拡張する技術開発をおこなった。図3は光周波数を正確に三分割し、かつ、その和周波を取ることで、 $1f \sim 5f$ の高調波を発生させた実験の概略図である。実際、このシステムを用いて、互いに完全に位相同期された5周波数のレーザー光(図4)を発生することができた。

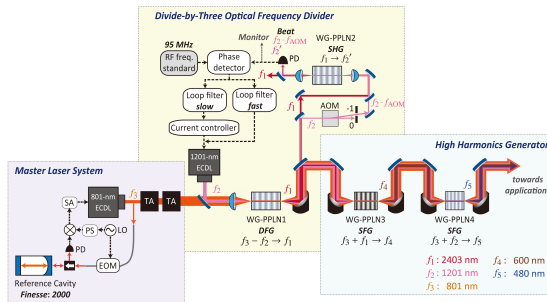


図3. 光周波数三分割システム、および高調波発生システム



図4. 互いに位相同期した5周波数のハーモニクス

高次誘導ラマン散乱光発生過程における人工的な操作と真空紫外波長可変レーザー

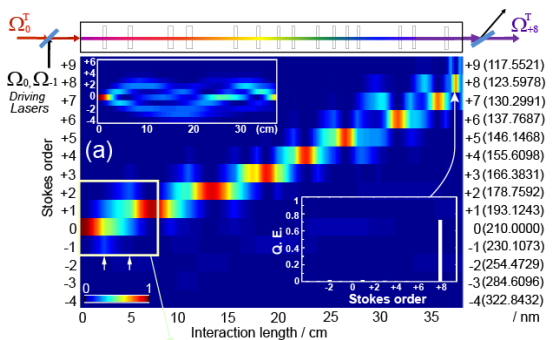


図5. 高次誘導ラマン散乱光発生過程における人工的な操作

これらの高品質のレーザー光をもとに、高次誘導ラマン散乱光系列を発生させ、真空紫外域に良質の単一周波数波長可変レーザーを実現する研究を進めた。図5は、高次誘導ラマン散乱光発生過程に関する複数の光の間の相対位相を操作することで、特定の散乱光モードにエネルギーを集中させることが可能なことを示した数値計算結果である。200 nm ~ 120 nm の間のどの高次モードにも 100%に近い量子変換効率をもって、波長変換されることが示されている。たとえば、

波長 120 nm の 8 次のアンチストークス光に到っても 70%を超える変換効率を得られた。さらに、この数値計算結果をもとに原理実証実験をおこない、 ± 1 次の変換過程においては、ほぼ数値計算結果通りの操作が可能なることを実験的に確認することができた。

図6は、もともになるチタンサファイアレーザー光の波長を操作することで、120 nm ~ 200 nm の全ての波長にアクセスが可能なること、さらに、 ± 20 GHz の周波数域では、相対位相の操作を固定することができ、つまり、連続波長操縦が可能なることを示している。これは、精密レーザー分光をおこなうのに十分な周波数掃引幅である。以上、120 nm ~ 200 nm の真空紫外全域をカバーする単一周波数波長可変レーザーが実際に実現可能なことを、詳細な数値計算と原理実証実験から明らかにした。

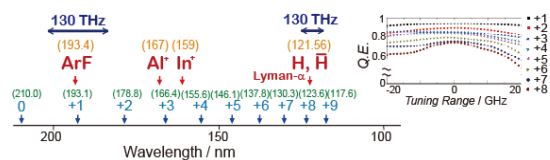


図6. 真空紫外域における波長可変範囲

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) Kazumichi Yoshii, John Kiran Anthony, and Masayuki Katsuragawa, The simplest route to generating a train of attosecond pulses, **Light: Science & Applications**, (2013) 2, e58; DOI:10.1038/lsa.2013.14. 査読有

2) Muneaki Hase, Masayuki Katsuragawa, Anca Monia Constantinescu, and Hrvoje Petek, Coherent phonon induced optical modulation in semiconductors at terahertz frequencies, **New Journal of Physics**, Focus issue on "Nonlinear Terahertz studies", NJP / 466098 / SPE/270577 (2013). **Invited Paper** 査読有

3) Jian Zheng and Masayuki Katsuragawa, Freely designable optical frequency conversion in Raman-resonant four-wave-mixing process, **Scientific Reports** 5: 8874 (2015). DOI: 10.1038/srep08874 査読有

4) Nurul Sheeda Suhaimi, Chiaki Ohae, Trivikramarao Gavara, Ken'ichi Nakagawa, Feng Lei Hong and Masayuki Katsuragawa, Generation of five phase-locked harmonics by implementing a divide-by-three optical frequency divider, **Optics Letters**. Vol. 40, No. 24, 5802 - 5805 (2015). 査読有

5) Trivikramarao Gavara, Takeru Ohashi, Yusuke Sasaki, Takuya Kawashima, Hiroaki Hamano, Ryo Yoshizaki, Yuki Fujimura, Kazumichi Yoshii, Chiaki Ohae, and Masayuki Katsuragawa, Dual-frequency injection-locked continuous-wave near-infrared laser, **Optics Letters**. Vol. **41**, No. 13, 2994 – 2997 (2016). 査読有

[学会発表](計 73 件 (海外: 26, 国内: 47))

1) Masayuki Katsuragawa, Takayuki Suzuki, and Kanaka Raju Pandiri: Generation of trains of arbitrary waveforms and their repeated revivals, Ultrafast Phenomena XVIII, the 18th International Conference on Ultrafast Phenomena, Lausanne, Switzerland, June 8 – 13, (2012). 査読有

2) Kazumichi Yoshii, John Kiran Anthony, and Masayuki Katsuragawa: The Simplest Method for Generation of an Attosecond Pulse Train, Ultrafast Phenomena XVIII, the 18th International Conference on Ultrafast Phenomena, Lausanne, Switzerland, June 8 – 13, (2012). 査読有

3) M. Katsuragawa: The simplest route to generating an attosecond pulse train, 43-th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, PQE-2013, Snowbird, Salt Lake City, Utah, USA, 6 – 10, January (2013). Invited Paper 査読無

4) Kazumichi Yoshii, John Kiran Anthony, and Masayuki Katsuragawa: The novel route to generating of a train of attosecond pulses, Ultrafast Optics Conference 2013 (UFO 2013), TuP. 10, *Poster presentation*, the Congress Centre Davos, Davos Platz, Switzerland, March 2 – 8, (2013). 査読有

5) M. Katsuragawa, K. Shiraga, M. Arakawa, K. Yoshii, F. L. Hong: Attractive natures of a Raman frequency comb in the time and frequency domains, CLEO-PR & OECC/PS 2013: The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics, Pacific Rim and 18th Optoelectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013, WF3-1, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 30 June – 4 July (2013). Invited Paper 査読有

6) K. Yoshii, N. Sheeda Suhaimi, M. Katsuragawa: Attosecond Temporal Shape Manipulation by Arbitrarily Designing Spectral Phases, CLEO-PR & OECC/PS 2013: The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics, Pacific Rim and 18th Optoelectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013, Attosecond Physics II, TuB4-2, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 30 June – 4 July (2013). 査読有

7) M. Katsuragawa: A simple and attractive technique on manipulation of a highly-discrete coherent spectrum, Workshop on THE RAMAN ROUTE FOR ATTOSCIENCE AND PHOTONIC WAVEFORM SYNTHESIS, Limoges, France, 26 – 27, September (2013). Invited Paper 査読無

8) M. Katsuragawa: Attractive natures in a set of a highly-discrete coherent spectrum, 44-th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, PQE-2014, Snowbird, Salt Lake City, Utah, USA, 5 – 9, January (2014). Invited Paper 査読無

9) Kazumichi Yoshii, Yoshitaka Nakamura, Kohei Hagihara, and Masayuki Katsuragawa: Generation of a Train of Ultrashort Pulses by Simply Inserting Transparent Plates on the Optical Path, CLEO/QELS 2014, CLEO, FThD1.5, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA, June. 8 - 13 (2014). 査読有

10) M. Katsuragawa, Attractive natures in a set of a highly discrete coherent spectrum, The 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHOTONICS & APPLICATIONS (ICPA-8), 12-16 August 2014. Da Nang city, Vietnam. Plenary Talk 査読無

11) K. Yoshii, Y. Nakamura, K. Hagihara, and M. Katsuragawa: Generation of a 1.8 fs pulse train by simply controlling transparent plate thickness placed on the optical path, 44-th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, PQE-2015, Snowbird, Salt Lake City, Utah, USA, 4 – 8, January (2015). Invited Paper 査読無

12) C. Ohae, S. N. Suhaimi, K. Nakagawa, F. L. Hong and M. Katsuragawa: “Generation of broad phase-locked harmonics”, 24th International Laser Physics Workshop (LPHYS’15), Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China, August 21–25, (2015). Invited Paper 査読無

13) J. Zheng and M. Katsuragawa: “Arbitrary designable optical frequency conversion”, Frontiers in Optics/Laser Science Conference (FiO/LS), Session: General Optical Sciences III, Fairmont San Jose in San Jose, California, USA, October 18 – 22, (2015). 査読有

14) M. Katsuragawa, J. Zheng, C. Ohae, K. Itoh, K. Yoshii, and M. Suzuki, Attractive natures in linear and nonlinear optical processes composed of a discrete spectrum, 45-th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, PQE-2016, Snowbird, Salt Lake City, Utah, USA,

15) 桂川眞幸：光周波数標準の精度を転写したラマンコム光源、シンポジウム「周波数コム光源とその計測応用への進展」、第33回レーザー学会年次大会、姫路商工会議所（兵庫県姫路市）、2013年1月28日 - 30日。招待講演 査読無

16) 中野愉人、小泉健太郎、森田宇亮、佐藤智信、阿部浩二、桂川眞幸：二周波数可変ナノ秒注入同期レーザーとその利用、Bレーザー装置、第34回レーザー学会年次大会、北九州国際会議場（小倉市）、2014年1月20日 - 22日。招待講演 査読無

17) 桂川眞幸、吉井一倫、Jian Zheng: 離散性の高いコヒーレントスペクトル群に現れる興味深い光学特性、強光子場科学研究懇談会、平成26年度第3回懇談会、電気通信大学、東3号館301号室、2014年7月19日。招待講演 査読無

18) 桂川眞幸、Jian Zheng、吉井一倫、伊藤公人: 任意にデザイン可能なコヒーレント光源、電子情報通信学会、シンポジウム“光通信・光情報処理における光波計測・制御技術の進展”、徳島大学、2014年9月23 - 26日。招待講演 査読無

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔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