

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709072

研究課題名(和文) 高速トムソン散乱計測による過渡的プラズマ物理現象の解明

研究課題名(英文) Evaluation of transient plasma phenomenon by the fast Thomson scattering measurement

研究代表者

安原 亮 (Yasuhara, Ryo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：30394290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,100,000円

研究成果の概要(和文)：ミリ秒オーダーで過渡的に変化するプラズマの電子温度及び電子密度の空間分布変化をトムソン散乱計測システムによって計測可能にするため、マルチレーザーシステム及びバーストレザーの検討を行った。マルチレーザーシステムを用いることにより、1ミリ秒以下の水素ペレット溶発現象の観測に成功した。これにより、トムソン散乱計測の時間分解能を現在の10msオーダーから1ms以下への向上を実証した。さらに時間分解能を向上させるためにバーストモードで動作するレーザーの基本的検討を行い、ジュール級のレーザー出力を確認した。今後、国際共同研究などを行いながら、高速トムソンシステムのさらなる高性能化を行っていく。

研究成果の概要(英文)：We investigated the fast laser Thomson scattering system to measure the the electron temperature and electron density profiles of the transient plasma less than milliseconds by the multi-laser system and the burst laser. We succeeded in observing the transient plasma phenomenon at the hydrogen pellet ablation which have less than 1 millisecond by the multi laser system. The time resolution of Thomson scattering measurement was improved from the current 10 ms order to less than 1 ms. For the further improvement of the temporal resolution, a fundamental study of the laser operating in the burst mode was carried out, and laser output of Joule class energy was confirmed. In the future, we will improve the fast-Thomson scattering system higher performance by the conducting international collaborative research, .

研究分野：レーザー工学、プラズマ計測

キーワード：高出力レーザー バーストレザー 過渡的プラズマ現象 トムソン散乱計測 高時間分解能

1. 研究開始当初の背景

レーザートムソン散乱装置 (以下、トムソン散乱装置) はプラズマ局所電子温度・密度分布を、非接触・不干涉かつ幅広い温度密度領域で計測可能であることから、核融合プラズマ研究に欠かせない装置となっている。しかしながらトムソン散乱装置のプロープ光として必要な、大パルスエネルギーレーザー装置は、レーザー媒質の発熱による制限から、数 10Hz~100Hz 程度の繰り返し率に留まっている。従って、ミリ秒オーダーで過渡的に変化するプラズマの電子温度及び電子密度の空間分布変化、例えば水素ペレットの溶発、プラズマ崩壊、加熱装置による急速なプラズマ加熱といった現象を追従することができない。これらはプラズマ電子温度・電子密度分布が急激に変化するため、他の計測装置の測定が難しく、局所計測が可能なトムソン散乱装置の高速化が強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、ミリ秒オーダーで過渡的に変化するプラズマの電子温度及び電子密度の空間分布変化をトムソン散乱計測システムによって計測可能にするための手段を開発する。トムソン散乱計測の時間分解能を現在の 10ms オーダーから 1ms 以下に向上させる。新たな時間領域を計測することでプラズマ研究の対象領域が大きく開拓される。将来の核融合炉実現に向けて、未解決物理の解明に寄与することを目的とした。

3. 研究の方法

今回、トムソン散乱計測システムの時間分解能を向上させるため、「マルチレーザーシステム」と「バーストレザーシステム」の開発を行った。

マルチレーザーシステムについては、複数台のレーザーをトムソン散乱計測システムに用いることで、実効的なトムソン散乱計測の繰り返しを向上させるものである。図 1 は、3 台のレーザーを用いた場合、それぞれのレーザーを等間隔にレーザー出射タイミングを制御した場合と、時間分解能向上のために

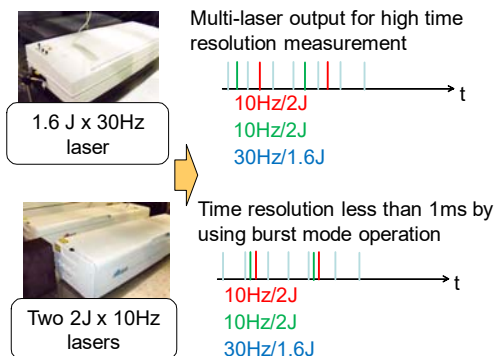


図 1 マルチレーザーによる時間分解能の向上

3 台の出射間隔を短くした場合の模式図である。時間間隔を短くすることでレーザー光を 3 時刻でバースト状にプラズマに入射することが可能となり、時間分解能の向上が可能となる。

もう一つのアプローチが「バーストレザー」の開発である。具体的には、固体レーザーで問題となる発熱による熱レンズ等の熱光学効果を、レーザー媒質の熱拡散時間よりも早くバーストレザー動作を終えることで克服し、1ms 以下の時間間隔に複数パルスのレーザー光を発生するバーストレザーを開発する。マルチパスシステムとバーストレザーを組み合わせることで、1ms 以下の時間領域で、過渡的プラズマ現象の計測が可能となる。本研究では、レーザーの構成として、主発振器に半導体レーザー励起 Nd:YAG マイクロチップレーザー、増幅器にフラッシュランプレーザーを用いてバーストレザーの基本となるレーザー構成の確認を行った。

4. 研究成果

(1) マルチレーザーシステムを用いた高時間分解計測

LHD のトムソン散乱システムにマルチレーザーシステムを構築して、高時間分解測定を試みた。1ms 秒以下の過渡的なプラズマの変化が観測されている水素ペレット入射を対象に計測を行った。図 2 は、マルチレーザーを用いた水素ペレット入射時のレーザータイミングである。赤線はペレットからの H α 発光の時間波形、緑及び青線はトムソン散乱計測用レーザーの入射タイミングである。図より、200 マイクロ秒間隔で、H α 信号の存在している領域でレーザー入射が行えていることが分かる。すなわち、水素ペレット溶発中に、2 時刻点のトムソン散乱計測が行えていることを示している。

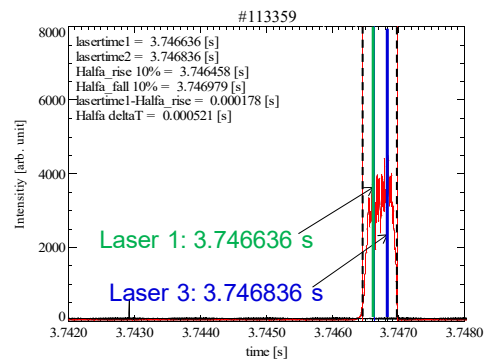


図 2 マルチレーザーを用いた水素ペレット入射時のレーザータイミング

図 3 は、ペレット入射時に 3 台のレーザーを用いた LHD におけるトムソン散乱計測結果を示している。ペレット入射前後の電子温度プロファイルの変化が最短 200 マイクロ秒の時間分解能で計測されている。ペレット入射

によって周辺から電子温度が下がり、時間の経過とともに中心部の温度も低下し、さらに時間の経過とともに回復していく様子が確認される。このようにトムソン散乱計測の時間分解能を上げることによって、プラズマの時系列的な構造変化を詳細に追うことが可能となった。

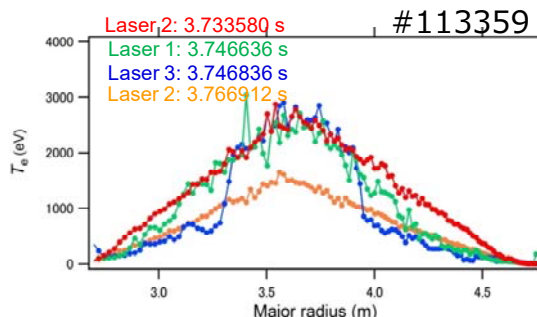


図3 マルチレーザーを用いた水素ペレット入射時の電子温度プロファイル変化

(2) バーストレザー装置の開発

固体レーザーで問題となる発熱による熱レンズ等の熱光学効果を、レーザー媒質の熱拡散時間よりも早くバーストレザー動作を終えることで克服し、1ms 以下の時間間隔に複数パルスのレーザー光を発生するバーストレザーについて本研究では、半導体レーザーを種光とした主発振器増幅レーザーシステムを用いてその装置構成、特に出力エネルギーについて実現可能性があるかについて検討を行った。

図4に本研究で、開発したジュール級レーザーの概要を示す。ジュール級の出力エネルギーを実現するために、マイクロチップレーザーを種光に、フラッシュランプNd:YAGレーザー増幅器で構成されたレーザーシステムを開発した。マイクロチップレーザーを用いることで半導体レーザー励起の低熱入力かつ高効率なレーザー発振器を利用することが可能となり、高繰り返し動作に適した構成となる。マイクロチップレーザーからの1 mJ レベルの種光は、前置増幅器で 100mJ、主増幅器で 1 J レベルへと段階的に増幅される。



図4 バーストレザー構成

図5にマイクロチップレーザーの出力パルスの時間波形を示す。測定は高速ディテクター（立ち上がり時間 70ps、SIR5-FC、ソーラボ）と帯域 1.5GHz のオシロスコープを用いて行った。図5に示されているように測定されたパルス幅は半値全幅で 893 ps で

あった。このときのレーザーエネルギーは、励起時間 500 マイクロ秒、繰り返し率 10Hz、LD 電流 39A のとき 0.46 mJ であった。

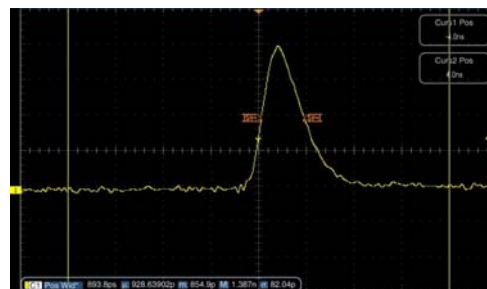


図5 レーザー発振器からの出力パルス波形

次にレーザーの最終出力特性について報告する。前置増幅器モジュール列を 2pass 増幅させたレーザー増幅実験結果と前置増幅器の出力を主増幅器によってさらに増幅した結果を示す。各レーザー増幅器モジュールのフラッシュランプへの印加電圧を 1.3kV から 1.8kV まで変化させたときのレーザー増幅器モジュール列後の光エネルギーを、前置増幅器のみの場合、前置増幅器の出力を主増幅器で出力した場合について測定した。

図6に結果を示す。前置増幅器のみの場合レーザー増幅器モジュールへの印加電圧を 1.8kV に設定したとき前置増幅器の出力は 200 mJ であった。さらに前置増幅器を 1.5 kV、主増幅器を 1.8kV に設定すると 500mJ の出力となり、前置増幅器を 1.8 kV、主増幅器を 1.8kV と設定すると 800mJ のパルスエネルギーが得られた。本結果より、このレーザー構成によってトムソン散乱計測に必要なジュール級のレーザーエネルギーが取り出せることが実証された。

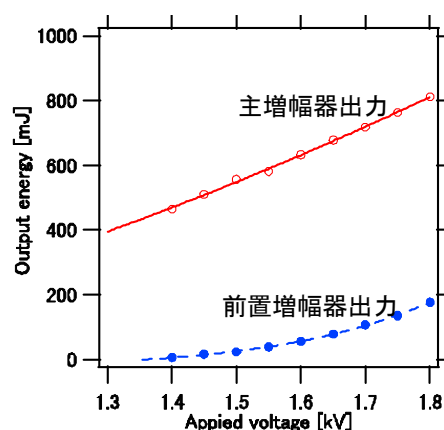


図6 バーストレザー構成

今回の結果より、トムソン散乱計測に使用可能なレーザーエネルギーを得ることができた。バースト動作は、励起光を駆動する電源装置を導入することで可能となる。現在、並行して進めている「科学研究費補助金、国際

共同研究加速基金」の支援を受け、ウイスコンシン大学マディソン校との共同研究で電源装置の導入を進めている。2018年のパーストレーザー装置が実現に向けて研究を進めており、当初の目標である、過渡的プラズマ現象の計測に適用していく予定である。

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 8 件)

- ① Hiroaki Furuse and Ryo Yasuhara, "Magneto-optical characteristics of holmium oxide (Ho₂O₃) ceramics," *Opt. Mater. Express* 7, 827-833 (2017).
- ② Aleksey Starobor, Evgeniy Mironov, Ilya Snetkov, Oleg Palashov, Hiroaki Furuse, Shigeki Tokita, and Ryo Yasuhara, "Cryogenically cooled CeF₃ crystal as media for high-power magneto-optical devices," *Opt. Lett.* 42, 1864-1866 (2017).
- ③ Ondřej Slezák, Ryo Yasuhara, Antonio Evgeniy A. Mironov, Aleksey V. Starobor, Ilya L. Snetkov, Oleg V. Palashov, Hiroaki Furuse, Shigeki Tokita, Ryo Yasuhara, Thermo-optical and magneto-optical characteristics of CeF₃ crystal *Optical Materials*, 69,196–201 (2017).
- ④ Lucianetti, and Tomáš Mocek, "Temperature-wavelength dependence of terbium gallium garnet ceramics Verdet constant," *Opt. Mater. Express* 6, 3683-3691 (2016).
- ⑤ Ryo Yasuhara, Ilya Snetkov, Aleksey Starobor, Evgeniy Mironov, and Oleg Palashov, "Faraday rotator based on TSAG crystal with <001> orientation," *Opt. Express* 24, 15486-15493 (2016)
- ⑥ Hiroaki Furuse, Ryo Yasuhara, Keijiro Hiraga, and Shengming Zhou, "High Verdet constant of Ti-doped terbium aluminum garnet (TAG) ceramics," *Opt. Mater. Express* 6, 191-196 (2016).
- ⑦ Ryo Yasuhara, Ilya Snetkov, Alexey Starobor, and Oleg Palashov, "Terbium gallium garnet ceramic-based Faraday isolator with compensation of thermally induced depolarization for high-energy pulsed lasers with kilowatt average power," *Appl. Phys. Lett.* 105, 241104 (2014).
- ⑧ R. Yasuhara, R. Sakamoto, I. Yamada, G. Motojima, and H. Hayashi, "Short-interval multi-laser Thomson scattering measurements of hydrogen pellet ablation in LHD", *Review of Scientific Instruments* 85, 11D822 (2014).

[学会発表] (計 3 件)

- ① R. Yasuhara, Magneto-Optic Transparent Ceramics for High Power NIR-MIR Laser Applications' Th-8-I-02, 12th Laser Ceramics Symposium, 28th November - 2nd December 2016 in Saint-Louis, France (2016) (Invited)
- ② R. Yasuhara, I. Yamada, E. Yatsuka, M. Yoshikawa, H. Funaba, H. Tojo, H. Hayashi, and T. Hatae, 'Progress of the multi-pass Thomson scattering system in LHD' 17th International Symposium Laser Aided Plasma Diagnostics, Sapporo, Hokkaido, JAPAN Sep.27- Oct. 1 (2015) (Invited)
- ③ R. Yasuhara, "Magneto-optic transparent bulk ceramics for high power lasers", 11th Laser Ceramics Symposium: International Symposium on Transparent Ceramics for Photonic Applications Yunquan Hotel, Xuzhou, China 30 Nov.-04 Dec. 2015 (Invited)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安原 亮 (YASUHARA, Ryo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号 : 30394290