

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760813

研究課題名(和文)リング共振器型レーザー散乱装置の開発

研究課題名(英文)Development of the resonator type laser scattering system

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) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：大出力レーザー技術を応用した、共振器型マルチパスレーザー散乱装置を実証することを目的とする。像転送光学系と偏光光学系によってプラズマを介した共振器構造を構築して、レーザー光をプラズマ中に複数回往復させることにより時間分解能や散乱光量の向上を実現した。筑波大学のGAMMA10装置にマルチパス光学系を設置し、4パス以上のトムソン散乱光の発生を確認した。またLHDでも2パス散乱計測が可能となった。これらによりレーザートムソン散乱計測装置の時間分解能をサブミリ秒へ短縮し、測定可能温度領域の拡大や散乱信号強度増加による測定精度を向上が期待できる。本システムを用いたプラズマ物理研究の進展が期待される。

研究成果の概要(英文)：A novel configuration of the multi-pass Thomson scattering (TS) system is proposed to improve the time resolution and accuracy of electron temperature measurements by use of a polarization control technique and the image relay optics. This configuration can realize a perfect coaxial multi-passing at each pass, and the number of round trips is not limited by the optical configuration. To confirm the feasibility of the new method, we installed this system in the GAMMA 10 and Large Helical Device. We have confirmed the multi-pass scattering signal from the plasma. These results are in good agreement with the design.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ計測 トムソン散乱計測 高出力レーザー

1. 研究開始当初の背景

レーザートムソン散乱によるプラズマの局所電子温度・密度計測装置（以下、レーザー散乱装置）は、核融合プラズマの電子温度・密度の信頼性の高い測定手法の一つとして用いられている。現在では対象となるプラズマの高性能化や測定対象となる物理現象の多様化を受け、レーザー散乱装置の高性能化が求められている。しかしながら、レーザー散乱装置に用いるためのレーザーには、ナノ秒パルス出力で、ジュール級のエネルギーが必要とされるため、レーザー光の繰り返し率や出力エネルギーの向上に制限がある。したがって、プラズマ物理研究からの要請に答えるための高時間分解能でのトムソン散乱計測や低密度プラズマでのトムソン散乱計測では光源の高性能化が欠かせない。

2. 研究の目的

本研究では、レーザー散乱装置のレーザー光路に共振器を構築した共振器型マルチパスレーザー散乱装置を開発する。本研究では像転送光学系と偏光光学素子によって共振器を構成することで共振器構造を構築する。これによりレーザー散乱装置に用いるプローブレーザー光源の高性能化が図られ、レーザー散乱装置の時間分解能向上、20keV以上の高温領域への測定可能温度領域の拡大、散乱信号強度増加による測定精度の向上を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

一般的なレーザー散乱装置はレーザー光を単純に一方からプラズマ中に打ち込む。レーザー光はプラズマを1回横切り、その際にドップラーシフトを受けスペクトルが広がった散乱光を発生する。電子温度は発生した散乱光のスペクトルを計測することで得られる。

それに対して本研究では、光路中にプラズマを組み込んだ共振器を設置することで、レーザー光はプラズマ中を複数回横切るマルチパス光学系を構築する。これにより散乱光は共振器長で決まる間隔（究極的には数十ナノ秒レベル）で複数回発生し大幅な時間分解能の向上が見込める。また複数回発生する散乱光を積算することによってノイズに対する信号量が増加し測定精度が向上する。

レーザー光をプラズマ中で往復させる手法としては誘導ブリリユアン散乱（SBS）ミラーを用いた例、凹面鏡対を用いた例が報告されているが、往復回数が幾何学的、光学的に制限される等の問題点が存在する。本研究では、プラズマ計測に周回数制限のない像転送光学系と偏光光学素子による共振器を用いることによって従来の計測方法の欠点を補い、安定な光学システムが構築可能である。

当初はリング型共振器の構築を考えていたが、本研究では、より単純な直線型の共振器構造を採用して研究を進めた。

4. 研究成果

(1) GAMMA10 におけるマルチパスレーザー散乱システムの実証

本共振器型マルチパスレーザー散乱システムを筑波大学プラズマ研究センターのプラズマ実験装置、GAMMA10 を用いて実証実験を行った。

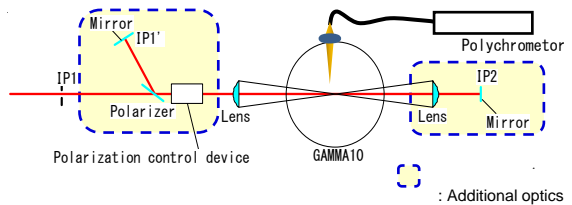


図1 共振器型マルチパスレーザー散乱システムの概略図

図1に、GAMMA10 において構築した偏光マルチパスシステムの概略を示す。レーザー光は、図1、IP1 側から入射され、ポラライザ（Polarizer）、偏光制御装置（Polarization control device）、レンズを通してプラズマ中心部で集光する。その後、レーザー光は広がり、レンズで平行光に戻され、IP2 のミラーで反射される。折り返されたレーザー光は、再びレンズで集光されプラズマと相互作用した後、真空容器外へと出射され、レンズで平行光に戻される。この際、戻ってきたレーザー光の偏光は、偏光制御装置で入射ビームと直交する方向へと旋回し、ポラライザで IP1' 方向へと反射する。その後 IP1' におかれたミラーで再び折り返される。以上によって IP1 と IP1' 間をレーザー光が閉じ込められてマルチパス光学系が構築される。

図2にマルチパス光学系を用いた際に得られる散乱光量の増加について計算結果を示す。

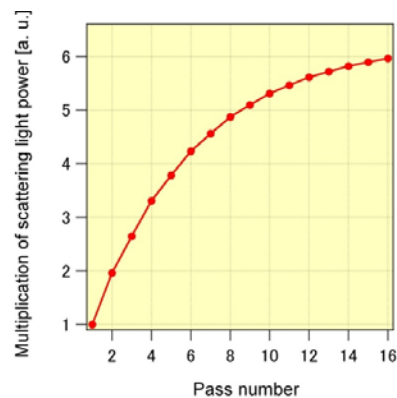


図2 マルチパスによる散乱光量の増加

横軸はマルチパス回数（レーザー光がプラズマと相互作用する回数）、縦軸がレーザー1回入射に対する散乱光量の増加量を示す。計算

より2パス（1往復）で約2倍の散乱量が得られ、16パス（8往復）で約6倍の散乱光量が得られることがわかる。2パスでは、レーザー光の減衰要因となる光学素子がミラーとレンズ及び真空容器のウィンドウのみとなっているため、レーザー光のアライメントが十分であれば2倍の散乱光量増加が期待できる。また2パス目以降は、偏光光学素子を透過するため減衰量が増え、散乱光量の増加率は減少するがパス数を増やすことで散乱光量は16パスまで増加する。16パス以上はレーザー光が光学素子のロスで減衰してしまうため散乱光の増加は見込めない。16パス以上に増加させるためには光学系にレーザー増幅器を追加し、減衰分を補う必要がある。

図3に、GAMMA10で行った、2パストムソン散乱計測の実験結果を示す。破線が1パス時のトムソン散乱信号、実線が2パスを行ったときのトムソン散乱信号となっている。2パス構成にすることでトムソン散乱信号が増加し、積分値で約2倍の増加となった。これは、図2の計算結果とよく一致している。また、この2パスのトムソン散乱計測によって得られた信号を基に電子温度を算出すると1パス計測と比較して、信号量の増大に見合う測定誤差の低減が見られた。（参考文献：主な発表論文等⑧）以上のことより2パスで提案した偏光と像転送光学系を用いた共振器型マルチパスレーザー散乱システムの原理が実証された。

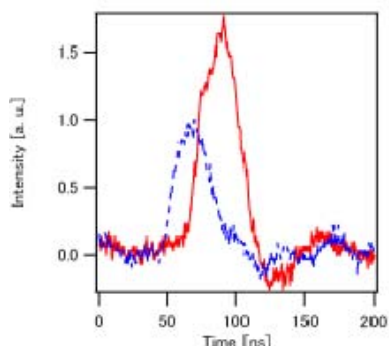


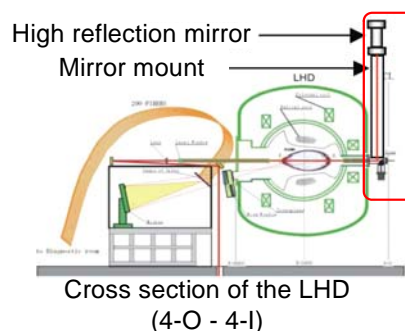
図3 GAMMA10における2パストムソン散乱計測結果（実線：2パス信号、破線：1パス信号）

2パスでの実証結果を基に、光学系に偏光制御素子：ポッケルスセルを導入し、2パス以上のマルチパス散乱実験を行った。結果として、ラマン散乱実験で6パス、トムソン散乱実験で4パスの信号検出に成功している。当初の目的の一つである共振器型マルチパスレーザー散乱装置が実現した。

(2) 大型ヘリカル装置（LHD）におけるマルチパスレーザー散乱システムの実証

GAMMA10での実証実験結果を受けて、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）のレーザー散乱装置にマルチパスシステムを導

入した。図4(a)にドーナツ状のLHDとトムソン散乱システムの断面を示す。LHDのトムソン散乱システムはLHDトーラス形状の小半径中心部を大半径外側（4-Oポート）から内側（4-Iポート）へとレーザー光が進むように設置されている。マルチパスシステムでは4-Iポートからレーザー光が真空中から大気中へと出力される光学窓を設置し、出射された光をレンズに平行光にした後にミラーで折り返した（図4(b)）。これによって復路のレーザー光は再び真空容器中で集光され、散乱光を発生させる。



(a) LHD及びトムソン散乱装置断面



(b) マルチパス用折り返しミラー

図4 LHDマルチパストムソン散乱概略

図5にLHDで行った、2パスのトムソン散乱計測結果を示す。往路の後方散乱（Backward）と復路の前方散乱（Forward pass）が分離して計測されていることがわかる。今後、本システムを用いて、高電子温度プラズマ計測や、非等方電子温度計測などを行い、プラズマ物理の進展に貢献する予定である。

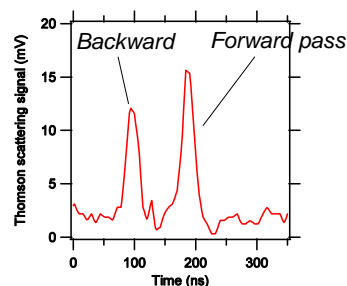


図5 LHDにおける2パス散乱実験結果

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 R. Yasuhara, H. Nozawa, T. Yanagitani, S. Motokoshi, and J. Kawanaka, "Temperature dependence of thermo-optic effects of single-crystal and ceramic TGG," Optics express, Vol. 21, pp. 31443-31452 (2013). (査読あり)
- ② R. Yasuhara and H. Furuse, "Thermally induced depolarization in TGG ceramics," Optics letters, Vol. 38, pp. 1751-1753 (2013). (査読あり)
- ③ R. Yasuhara, M. Yoshikawa, I. Yamada, K. Kawahata, H. Funaba, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Imai, "Design of the photon recycling probe laser for the divertor Thomson scattering system in GAMMA10", Fusion Science and Technology, Vol.63, pp. 408-410 (2013). (査読あり)
- ④ Masashi Yoshikawa, Ryo Yasuhara, Seito Sakamoto, Ryo Sekiguchi, Yoriko Shima, Junko Kohagura, Mizuki Sakamoto, Yousuke Nakashima, Tsuyoshi Imai, Makoto Ichimura, Ichihiro Yamada, Hisamichi Funaba, Kazuo Kawahata and Takashi Minami, "Polarization-Controlled Multi-Pass Thomson Scattering System in the Tandem Mirror GAMMA 10," Plasma and Fusion Research Volume 8, 1205169 (2013). (査読あり)
- ⑤ R. Yasuhara, T. Akiyama, I. Yamada, K. Kawahata and S. Tokita, "Fiber interferometer for calibration of electron density profile measured by Thomson scattering in LHD", Journal of Instrumentation, Vol.7, C01090 (2012). (査読あり)
- ⑥ R. Yasuhara, I. Yamada, K. Narihara, H. Funaba and H. Hayashi, "Coaxial Multiple Laser Beam Combiner for the LHD Thomson Scattering System", Plasma and Fusion Research, Vol. 7, 2402030 (2012). (査読あり)
- ⑦ R. Yasuhara, M. Yoshikawa, M. Morimoto, I. Yamada, K. Kawahata, H. Funaba, Y. Shima, J. Kohagura, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Imai, and T. Minami, "Design of the polarization multi-pass Thomson scattering system", Review of Scientific Instruments. Vol. 83, (2012) 10E326. (査読あり)
- ⑧ R. Yasuhara, H. Furuse, A. Iwamoto, J. Kawanaka, and T. Yanagitani, "Evaluation of thermo-optic characteristics of cryogenically cooled Yb:YAG ceramics", Optics Express, Vol. 20, Issue 28, pp. 29531-29539 (2012). (査読あり)

[学会発表] (計 5 件)

- ① R. Yasuhara, I. Yamada, E. Yatsuka, M. Yoshikawa, H. Funaba, H. Hayashi, H. Tojo, and T. Hatae, "Design and demonstration of the double pass Thomson scattering measurement in LHD", 16th International symposium Laser Aided Plasma Diagnostics(LAPD 16), Madison, Wisconsin USA, September 22-26 (2013).
- ② 吉川正志, 長洲和英, 島村侑希, 安原 亮, 嶋 頼子, 森下雅央, 北川 和, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔, 今井 剛, 山田一博, 舟場久芳, 南 貴司, 市村 真, "GAMMA10における Thomson 散乱計測システムの進展," 05aE28P プラズマ核融合学会第 30 回年会、東京工業大学、2013 年 12 月 3 日~6 日ポスター発表
- ③ M. Yoshikawa, R. Yasuhara, M. Morimoto, Y. Shima, J. Kohagura, M. Sakamoto, Y. Nakashima, T. Imai, I. Yamada, K. Kawahata, H. Funaba, and T. Minami, "Development of polarization-controlled multi-pass Thomson scattering system in the GAMMA 10 tandem mirror", High Temperature Plasma Diagnostics 2012.
- ④ 安原 亮, 山田一博, 吉川正志, 波多江仰紀, 谷塚英一, 林 浩, 舟場久芳「LHD 偏光マルチパストムソン散乱計測システムの開発」プラズマ・核融合学会, クローバープラザ (福岡), 2012 年 11 月 27 日-30 日. (30D32P).
- ⑤ 山田一博, 成原一途, 安原 亮, 舟場久芳, 林 浩, 河本俊和「LHD トムソン散乱装置の測定温度領域の拡大」プラズマ・核融合学会, クローバープラザ (福岡), 2012 年 11 月 27 日-30 日. (30D01P).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.nifs.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安原亮 (YASUHARA RYO)

研究者番号 : 30394290

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし