

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 29 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360393

研究課題名（和文） 2 波長テラヘルツレーザーを用いた核融合プラズマ計測法の開発研究

研究課題名（英文） Development of Two Color Terahertz Laser Diagnostics for the Fusion Plasmas

研究代表者

森下（川端）一男（MORISHITA Kazuo）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：60109353

研究成果の概要（和文）：

2 波長テラヘルツレーザーを用いた計測システムを大型ヘリカル装置の高瀬能プラズマや、将来の核融合装置のために開発してきた。これまで、我々は CH₃OD レーザーの光励起を用いて波長 57.2 ミクロンと 47.7 ミクロンの 2 波長レーザーを開発してきた。ここでは、2 波長レーザーを用いた計測システムの開発や、その原理実証としての 2 波長レーザーシステムの開発そして同装置を用いた機械的振動の補正について記述する。

研究成果の概要（英文）：

Two color laser diagnostics using terahertz laser sources is under development for a high performance operation of the Large Helical Device and for future fusion devices. So far, we have achieved high power laser oscillation lines simultaneously oscillating at 57.2 and 47.7 μm by using a twin optically pumped CH₃OD laser, and confirmed the original function, compensation of mechanical vibration

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2012 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	10,600,000	3,180,000	13,780,000

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：核融合プラズマ、レーザー計測、テラヘルツ、干渉計測、偏光計測

1. 研究開始当初の背景

核融合研究は、1980 年代に始まったトカマク型大型核融合実験装置（JT-60: 日本, JET:EU, TFTR:USA）の研究の進展によって、研究の最終目標である核燃焼プラズマ（プラズマの自己加熱によって核反応を持続させる）を実証する計画（ITER 計画）が国際協力によって進められている。この計画を成功さ

せるためには、核燃焼によって生成されるアルファ粒子を制御し、反応を持続させることが不可欠である。そのためには、閉じ込められたアルファ粒子の振る舞いを調べることは重要な研究課題であるが、その生成、閉じ込めに関係したプラズマパラメータの詳細な計測も核燃焼プラズマの自立性を確保するために重要である。他方、トカマク型

と異なる磁場配位のヘリカル型磁場閉じ込め装置である大型ヘリカル装置は、1998年に実験を開始し、大型トカマク装置に比肩するプラズマパラメータを達成するとともに、ヘリカル型装置の特長を生かして、1時間を越える定常プラズマの維持に成功している。また、粒子制御法の最適化によって当初計画の目標(20乗)を大幅に超える中心電子密度21乗の超高密度プラズマの生成に成功し、新しい炉心プラズマ領域を切り開いてきている。本研究計画では、超高密度プラズマに対応できる新たな密度計測手法の確立を目指すとともに、核燃焼プラズマ実験において、核反応率に密接に関係する密度分布と、プラズマの閉じ込め特性及びアルファ粒子の閉じ込めに密接に関係する内部磁場分布の同時計測法を新たに確立しようとするものである。

ITER計画では、電子密度/内部磁場分布の計測器として、ポロイダル偏光計の設計が進んでいる。波長119 μm の遠赤外レーザー光のファラデー回転とコットン・ムートン効果を用いて、電子密度と内部磁場分布を求める設計になっている。コットン・ムートン効果によるレーザー光の回転角の計測から、信頼性の高い電子密度計測を目指すものになっている。しかしながら、この計測手法は、回転角度が強い磁場依存性を有していること、これまでに適用された例がすくないことから、定常的な密度分布計測には至っていないことから精度の高い計測法として確立するにはまだ開発を要する段階にあった。

本研究で開発しようとする2波長同時発振型テラヘルツレーザーを用いた干渉・偏光計測法は、レーザーの波長がITERクラスのプラズマ計測に最適な波長($\sim 50\mu\text{m}$)であること、2波長同時発振型レーザーを用いるというこれまでに無い新しい計測手法によって、高精度で信頼性の高い計測を可能にしようとするものである。しかしながら、この波長領域は、光と電波の谷間と呼ばれている10-100 μm の波長領域にあり、これまで最も研究開発の遅れた領域にある。レーザー光を始めとして、検出器、光学材料まで確立されたものが少なく、研究開発が急がれる分野である。

2. 研究の目的

2波長同時発振型テラヘルツレーザーのシングルモード発振を確立し、2波長レーザーに有効な制御システムを開発することにより、ビート周波数及びレーザー出力の制御手法を確立し、長時間、安定な計測システム

を構築する。テラヘルツ領域では初めての適用となる光弾性変調器を用いた偏光計と2波長レーザー干渉計との同時計測手法を確立する。計測システムの構築に必要な各種光学部品の開発と光学定数のデータベース化を進め、計測システムの構築を可能にする。真空窓材のファラデー効果の評価を行い、偏光角への影響を2波長計測により除去する。誘電体伝送路のレーザー伝送特性を明らかにし、大型の計測装置構築に必要な計測基盤を整備する。以上により、50ミクロンの2波長2波長同時発振型テラヘルツレーザーを用いた干渉・偏光計測の2波長同時計測法を確立する。

3. 研究の方法

2波長干渉計の実験装置のブロック図を図1に示す。現在、計測開発に使用しているテラヘルツレーザー発振装置は、レーザーの高出力化と幅広い波長領域(40-1000 μm)における発振線のデータベースの蓄積を目的として設計、製作したものである

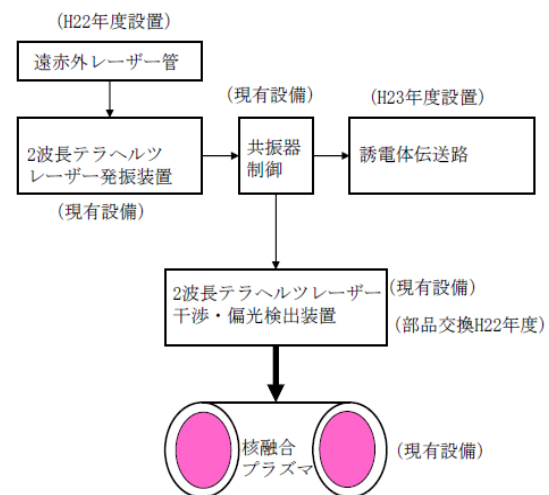


図1 2波長THzレーザー計測装置の概念図

レーザー管のパラメータを50 μm 帯のレーザー発振に最適化することで、2波長レーザーの同時発振のシングルモード化を図る。制御機能付きレーザー共振器の動作モードの最適化、及びレーザーガス圧の最適化によって、レーザー出力及び周波数の長時間の安定性を図り、計測用レーザー光源としての有用性を実証する。その後、これまで独立して開発を進めてきた2波長レーザー干渉計と偏光計を組み合わせ、最終的に、2波長テラヘルツレーザーを用いた干渉、偏光の同時計測システムを構築する(図2)。

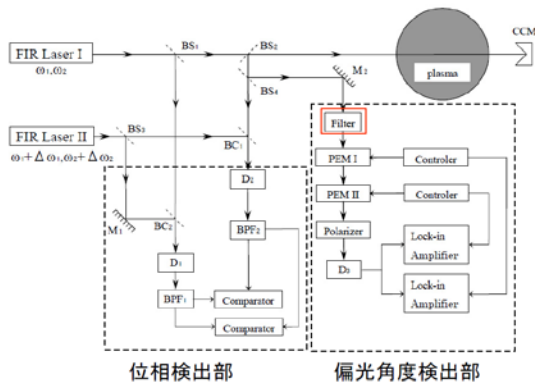


図2 2波長レーザーを用いた干渉・偏光計測

本レーザー装置システムを用いて、核融合実験装置へ適用するに当たって生じる課題（誘電体導波管伝送路の伝送効率、偏波面の回転、プラズマの屈折効果が伝送特性に及ぼす影響、真空窓のファラデー効果による偏波面の回転効果など）の解決を図り、最終的に既存実験装置に適用することにより、本計測手法の有用性を実証する。

4. 研究成果

短波長の遠赤外レーザー光源を用いた計測手法を開発した。特に、この時間問題となる振動補正のために、2波長の同時発振化を確立し、干渉計・偏光計の一体化をすすめた。これにより、57 ミクロンで 1.6 ワット、48 ミクロンで 0.8 ワットの高出力同時発振を実現し、干渉位相と回転角の同時計測法を確立した。2波長干渉計を用いた測定例を図3に示す。

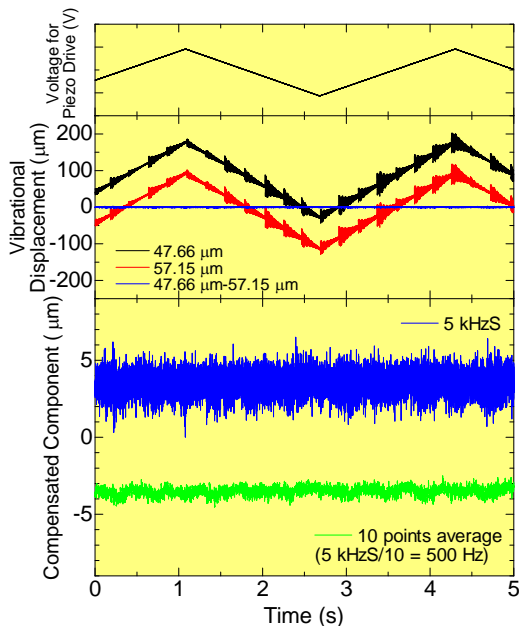


図3 2波長干渉計を用いた測定例

このような短波長のレーザー干渉計では、レーザーの制御が問題となる。このためにレーザーの制御装置を新たに開発し、その制御性能を調べた（図4-1は制御装置、図4-2はその結果を示す）。制御序数、特に制御時の動きの大きさを最適化することによって、ほぼ仕様を満足する結果をえることが出来た。

その結果、定常状態では、計算どおりの動きを示すが、動き始め、特に初期の状態では、これは、バックラッシュと呼ばれる現象と思われるが、その動きは約1/10程度となる事が分る。これは、一般には好ましくない現象であるが、制御性能を約1桁あげる点において、制御装置として、好ましい結果となった。この測定結果をもとにシステムのくみ上げを行った。制御結果の1例を図5に示す。FIRレーザーの出力及び周波数は長時間に渡ってほぼ一定に制御出来ているが、48 ミクロンの光はほぼ一定に、57 ミクロンの光は中心周波数（今の場合は、約 1.5 MHz）に対して約の制御性能を示していることが分る。



図4-1 レーザー発振装置

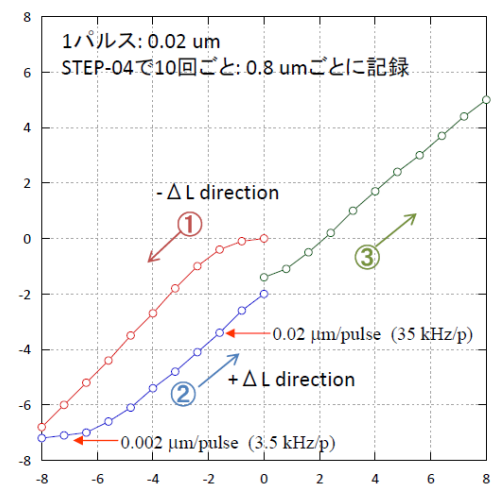


図4-2 制御装置と制御性能の図面

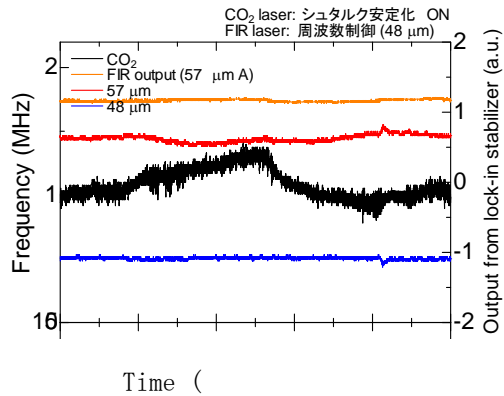


図5 制御結果の1例

次に、問題となるのは検出器であるが、新しく開発されたVDI社のダイオード (VDI WR-04) を導入した。この検出器は、2 cm程度の大きさで、非常にコンパクトな作りとなっている。購入したダイオードの検出ピーク値は2.3テラヘルツ付近にあるが、検出感度が1 Wあたり約1000 Vと高いのが特徴である (図6)。

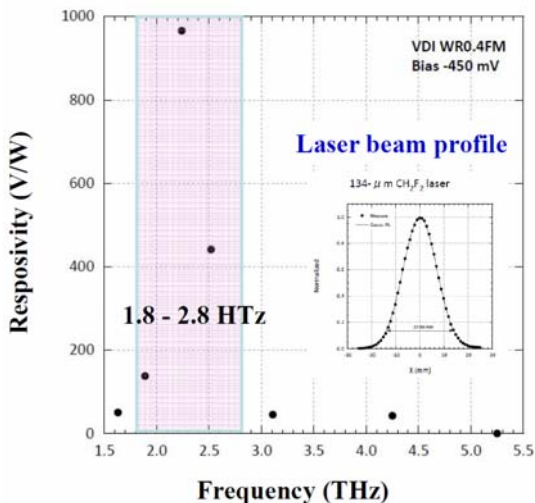


図6 新しく導入した検出器の周波数感度特性

これを用いて測定した2波長ビートの例を図7に示す。検出器は50ミクロン帯においても高い検出感度を示すことが分ると同時に、2波長の同時検出に成功した。この検出器を実際のシステムに適用した例を図8に示す。ビート周波数は、約100 kHzから4 MHzまでS/N良く計測可能である。又、ビームサイズの大きさもITER装置において、ビームウエストを反射板の位置に設定することにより、反射光学系の最適化が可能である。あとは、S/Nの問題となるが、現在ITERの運転を想定して最適化をすすめている。このレーザー計測装置を次期核融合実験

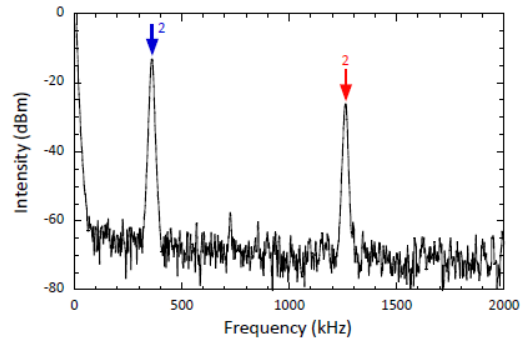


図7 新しく導入した検出器の周波数感度特性

装置 (ITER) に適用した例を図8に示す。ここではITERの設計に従いポロイダル偏光計による電流分布の導出を目指している。

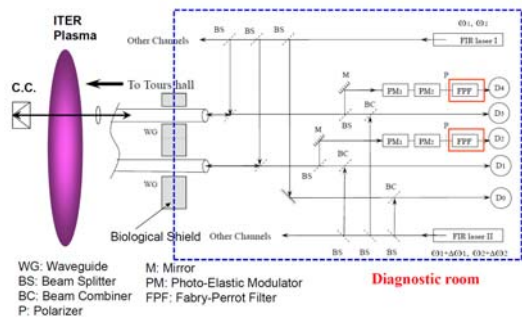


図8 ITER装置のために設計した2波長ポロイダル干渉/偏光計の概念図

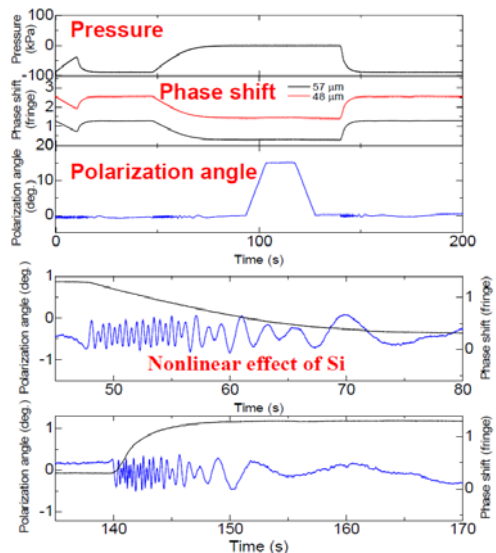


図9 ITER装置のために開発した2波長ポロイダル干渉/偏光計の測定例

これを模擬した実験では、偏光測定の立ち上がり、立ち下げにおいて、微小なノイズが見られるが、これは計測窓材の歪みによるものと考えられる。実際の実験においては、真空状態から立ち上げるためこの影響はすく

ないと考えられる。現在、ITERでの計測を模擬した試験を実施中であり、その結果が待たれるところである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

1) ショットキーバリアーダイオードの短波長遠赤外領域での特性とその応用
中山和也、岡島茂樹、川端一男、田中謙治、秋山毅志

電気学会論文誌A、Vol. 132, (2012) pp. 722-726. (査読有)

2) Progress in development of two color laser diagnostics for the ITER poloidal polarimeter

K. Kawahata, T. Akiyama, K. Tanaka, S. Okajima and K. Nakayama

JINST, Vol. 7, (2012) pp. C02002-1-4. (査読有)

3) Dispersion interferometer for LHD

T. Akiyama, K. Kawahata, R. Yasuhara, S. Okajima and K. Nakayama

JINST, Vol. 7, (2012) pp. C01055. (査読有)

4) 遠赤外レーザーの開発とその応用

中山和也、岡島茂樹、川端一男

プラズマ・核融合学会誌、Vol. 87, (2011) pp. 801-815. (査読無)

5) Particle Transport of LHD

K. Tanaka, K. Kawahata, T. Tokuzawa, T. Akiyama et al.

Fusion Science and Technology, Vol. 58, No. 1,2 (2010) pp. 70-90. (査読有)

6) Interferometer System on LHD

T. Akiyama, K. Kawahata, K. Tanaka, T. Tokuzawa, Y. Ito, Okajima, K. Nakayama,

C.A. Michael, L.N. Vyacheslavov, A. Sanin, S. Tsuji-Iio and LHD Experimental Group,

Fusion Science and Technology, Vol. 58 (2010) pp. 352-363. (査読有)

7) Conceptual Design of a Dispersion Interferometer Using a Ratio of Modulation Amplitudes

T. Akiyama, K. Kawahata, S. Okajima, and K. Nakayama

Plasma and Fusion Research, Vol. 5, (2010) pp. S1041-1-5. (査読有)

8) Overview of LHD Plasma Diagnostics

K. Kawahata, B.J. Peterson, T. Akiyama, et. al.

Fusion Science and Technology, Vol. 58 (2010) pp.331-344. (査読有)

9) Development of two color laser diagnostics for the ITER poloidal polarimeter

K. Kawahata, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Nakayama, and S. Okajima

Review of Scientific Instruments, Vol. 81,

No. 10 (2010) pp.10D537-1-4. (査読有)

10) Recent Progress in Two-Color Laser Diagnostics

K. Kawahata, T. Akiyama, K. Tanaka, S. Okajima and K. Nakayama

Journal of Physics: Conference Series, Vol. 227, (2010) pp. 012022-1-4. (査読有)

〔学会発表〕(計3件)

1) 2波長レーザー干渉・偏光計測の開発

川端一男、秋山毅志、岡島茂樹、中山和也

Plasma Conference 2011、2011年11月22-25日、金沢

2) Development of Two Color Laser Diagnostics for the ITER Poloidal Polarimeter

K. Kawahata, T. Akiyama, K. Tanaka, K. Nakayama and S. Okajima,

15th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, October 9 - 13, 2011,

Jeju, KOREA.

3) Development of two color laser diagnostics for the ITER poloidal polarimeter

K. Kawahata, T. Akiyama, K. Tanaka et al.,

High Temperature Plasma Diagnostics, May 16 - 20, 2010, Wildwood, USA.

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森下 (川端) 一男 (Morishita Kazuo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号：60109353

(2) 研究分担者

秋山 毅志 (Akiyama Tsuyoshi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：80370138

田中 謙治 (Tanaka Kenji)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：50260047

岡島 茂樹 (Okajima Shigeki)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：90113084

中山 和也 (Nakayama Kazuya)

中部大学・工学部・講師

研究者番号：40434584

(3) 連携研究者

無し