

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686104

研究課題名(和文) 定常・高密度核融合炉のための振動自己補正型干渉計の短波長化

研究課題名(英文) Vibration compensation interferometer with short-wavelength for steady state and high density fusion reactor

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：将来の核融合炉において、核融合出力は電子密度を測定して制御する。そのため、電子密度の測定には高い信頼性と計測精度が要求される。研究代表者らは、機械振動の影響を受けにくく、フリッジジャンプを抑制可能なDispersion干渉計を開発してきた。本研究では、将来の核融合炉の条件に適した短波長のNd:YAGレーザーDispersion干渉計の光学設計、及びベンチ試験を行った。その結果、ITERやヘリカル核融合炉の条件で、 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-3}$ の電子密度分解能を達成した。更なる分解能向上のためには、2倍高調波を発生させる非線形素子の温度安定化が有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The fusion output will be controlled by measuring the electron density in the future fusion reactors. Therefore, high reliability and density resolution are required to the electron density measurement. We have been developed a dispersion interferometer, which is insensitive to the mechanical vibrations and can suppress fringe jump errors. In this research, we designed the optical system of short wavelength laser Nd:YAG laser dispersion interferometer, which is suitable to conditions of future fusion reactors. A bench-testing is conducted and an electron density resolution of  $2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-3}$  is obtained in the reactor conditions such as ITER and helical reactor FFHR-d1. It is demonstrated that the temperature control of nonlinear crystals, which is used to generate the second harmonic component, will be effective to improve the density resolution.

研究分野：核融合工学

キーワード：干渉計 非線形光学素子 2倍高調波 核融合炉 電子密度計測

### 1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの電子密度計測には、高い計測精度に加えて、計測ミスのない高い信頼性が要求される。現在、干渉計が広く使用されているが、光学系の機械振動による計測誤差や、高密度領域で「フリンジジャンプ」による計測ミスの問題がある。フリンジジャンプは、プラズマによって探査光が屈折( $\propto$ 波長の2乗)し、受光信号が途切れる( $2\pi$ の不確定性のため位相変化の絶対値が失われる)ことが原因である。ITERでは $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 程度の高密度運転が予定され、また大型ヘリカル装置LHDでは中心密度 $4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ に及ぶ超高密度プラズマが実現しており、フリンジジャンプはより深刻になっている。また、大型装置では、装置の制約等から干渉計架台の振動除去が十分に出来ないのが現状である。

その解決手法には、屈折変位が小さい短波長レーザー干渉計、電磁波と磁場の相互作用であるFaraday効果やCotton-Mouton効果を用いた密度計測用偏光計があり、90年代後半より世界中でその開発が進められている。それらと別のアプローチとして、申請者はシンプルな光学系でありながら、機械振動の影響を受けず、適切な波長を選択することでフリンジジャンプを無くせる「Dispersion干渉計」への位相変調・高調波成分比を利用した位相抽出方式を提案した。Dispersion干渉計は、基本的に干渉計でありながら、機械振動の影響を受けにくいため、除振設備を必要としない。また、振動の影響を受けないために、通常は振動による計測誤差が顕著になる短波長レーザーが利用でき、位相変化を抑えることで、フリンジジャンプを抑制できる。それらの利点から、大型の磁場閉じ込め核融合プラズマ装置での密度計測手法として注目され、当初は申請者を始め、波長 $10.6 \mu\text{m}$ のDispersion干渉計の開発が中心となっていた。

### 2. 研究の目的

将来の核融合炉は、現在の装置より大型化し、電子密度もより高いことが予想されており、機械振動による計測誤差が多くなったり、フリンジジャンプが多発したりする可能性がある。そのため、本研究では光源をこれまでの $10.6 \mu\text{m}$ から $1.064 \mu\text{m}$ に短波長し、将来の核融合炉で利用可能な短波長Dispersion干渉計を確立させることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、波長 $1.064 \mu\text{m}$ のNd:YAGレーザーを光源としたDispersion干渉計を設計する。そして、光学系を構築しベンチ試験を実施して分解能や長時間安定性の評価、及び分解能向上のための改善を行う。それらの成果を基に、現在国際協力で建設が進められている国際熱核融合実験炉ITERや、将来の核融合炉の例として、ヘリカル核融合炉FFHR-d1をプラットフォームとし、短波長Dispersion干渉計の概念設計を行う。また、短波長光源を核融合炉で使う上での問題点を洗い出し、炉工学の観点も含め、総合的な設計を行う。

### 4. 研究成果

短波長Dispersion干渉計の概念設計を行う上で、光源の波長、出力、及び二倍高調波発生効率が重要な検討事項となる。

干渉計の信頼性を低下させるフリンジジャンプは、位相変化が $2\pi$ (1フリンジ)を超えることが原因である。位相変化を1フリンジ以下に抑えることができれば、原理的にフリンジジャンプを無くすことができる。表1にITERを例として位相変化量の波長、光路長依存性を示す。

表1:位相変化の波長、光路長依存性

Laser	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$n_e L$ which corresponds to 1 fringe ( $10^{20} \text{ m}^{-2}$ )	$n_e$ ( $10^{20} \text{ m}^{-3}$ )	L (m) Double path	Change of Fringe
CO <sub>2</sub>	10.6	1.41	1.0	20	14.18
				8	5.67
Nd:YAG	1.064	14.01	1.0	20	1.43
				8	<b>0.57</b>

ITERでは、接線視線、垂直視線の光路長は、それぞれ往復で20, 8 mである。これまで、Dispersion干渉計に用いられていた波長 $10.6 \mu\text{m}$ のCO<sub>2</sub>レーザーでは、標準的な密度である $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ で光路長の短い垂直視線でも位相変化量は5フリンジを超える。それに対し、波長 $1.064 \mu\text{m}$ のNd:YAGレーザーであれば、垂直視線で位相変化を1フリンジ以下に抑えることができる。これより、光源波長は $1.064 \mu\text{m}$ とした。

Dispersion干渉計は、プラズマ入射前に非線形素子でレーザー光の一部を2倍高調波に変換し、基本波と2倍高調波の混合波をプローブ光とする。その後、再び非線形素子で2倍高調波を発生させ、基本波をカットした後に、2倍高調波同士の干渉を計測する。従って、2倍高調波の発生効率がDispersion干渉計のSN比を決める要素の一つとなる。Dispersion干渉計で重要な2倍高調波発生を発生させる非線形光学素子と、レーザー出力を決めるため、2倍高調波発生効率の入射パワー、素子依存性を図1に示す。

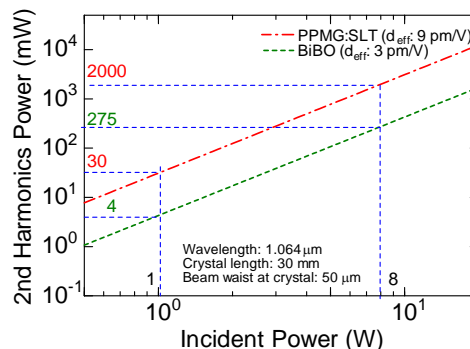


図1:非線形光学結晶(PPMgSLT, BiBO)の入射パワー依存性

現在、連続発振で干渉計に適したコヒーレンスを持つ Nd:YAG レーザーとして、0.5 ~ 55 W の製品 (Coherent, Mephisto) が市販されている。近赤外領域では、非線形素子が多種あるが、ここでは分極反転構造を持つ擬位相整合素子 PPMgSLT、及び位相整合素子 BiBO を用いた。測定される干渉信号  $I$  は、

$$I = D \sqrt{(\alpha P_1)(P_2)}$$

( $D$ : 検出器の感度、 $P_1$ : プラズマ入射前に発生した 2 倍高調波パワー、 $P_2$ : プラズマ入射後に発生した 2 倍高調波パワー、 $\alpha$ : 減衰率) で表される。検出器として、 $10^2 - 10^4$  V/W の変換効率を持つフォトレシーバーを想定した。真空容器内に設置するミラーは、表面への不純物堆積、及びプラズマによる損耗で反射率が低下してくることが指摘されている。例えば、LHD の約 4 か月間の実験サイクルにおいて、波長 1.064  $\mu\text{m}$  では設置前の反射率の 1% 程度まで低下することが報告されている。ここではより長期の使用を念頭にし、 $\alpha = 0.001$  と仮定する。2 倍高調波の発生効率は入射パワーの 2 乗に比例するため、プラズマ入射後に発生するパワーは  $P_2 = \alpha^2 P_1$  と表せる。信号処理に用いるロックインアンプの入力信号は 1 V 以下であり、信号強度は 0.1-1 V 程度が望ましい。入射パワーが 8 W、非線形素子が PPMgSLT の場合、反射率が低下した場合でも変換効率  $10^4$  V/W で 0.6 V 程度の干渉信号が得られることが分かった。また、BiBO を用いた場合では、 $10^4$  V/W で 0.09 V が得られる。これらに対し、入射パワーが 1 W の場合は、PPMgSLT、BiBO での信号強度 0.1 V が得られるのは減衰率が、 $\alpha = 0.005, 0.02$  までとなり、減衰率が小さい場合には使用できる。

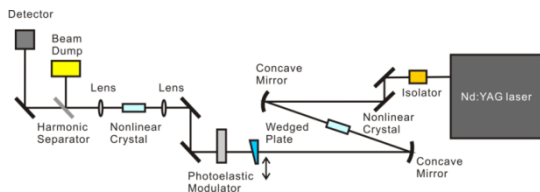
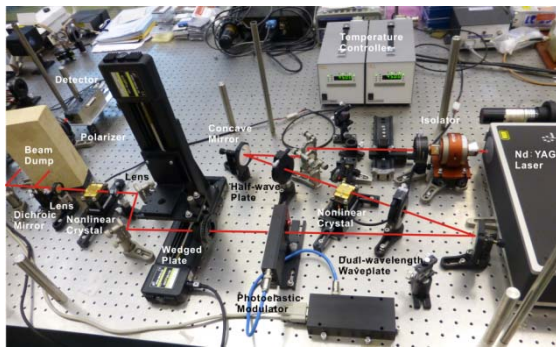


図 2: Nd:YAG レーザー Dispersion 干渉計のベンチテスト

以上の検討より、光源に出力 8 W の Nd:YAG

レーザーを用い、非線形光学結晶に PPMgSLT、及び BiBO を用いて光学系を構成し、ベンチ試験を行った。図 2 にベンチ試験の光学系を示す。レーザー光は非線形素子位置にて光束半径 50  $\mu\text{m}$  に集光する。2 倍高調波発生後、ウェッジ角付基板を光軸と垂直方向にスキャンし、プラズマによる位相変化を模擬する。その後、位相変調を与える光弾性変調器を透過させ、2 倍高調波成分にのみ変調周波数 50 kHz の位相変調を与える。再び非線形素子で 2 倍高調波を発生させた後、基本波を分離して 2 倍高調波同士の干渉信号を測定する。

ウェッジ角  $\theta$  の基板を光軸に対して  $d$  だけスキャンさせた場合の位相変化  $\Phi$  は

$$\Phi = \frac{4\pi d \tan \theta}{\lambda} (n_{2\omega} - n_{\omega})$$

であたえられる。 $n_{\omega}$ 、 $n_{2\omega}$  は基本波、2 倍高調波の屈折率である。図 3 にウェッジ基板をスキャンした場合の位相変化を測定した結果を示す。

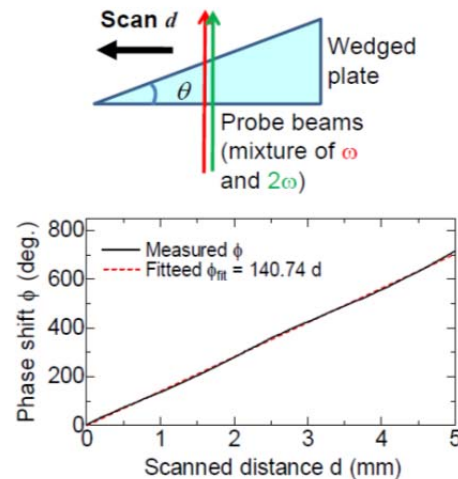


図 3: ウェッジ基板を用いたプラズマ模擬実験と得られた位相変化

使用したウェッジ角は  $1.0 \pm 0.08$  度であり、この場合  $\Phi = (142 \pm 11) d$  が予測される。これに対し、得られた位相変化は  $\Phi = 140.74 d$  となり、ウェッジ角の製作精度の範囲内で予想値と合致することを確認した。これにより、Nd:YAG レーザー Dispersion 干渉計で、正しく位相計測 (電子密度計測) が可能であることを実証した。

ベンチテストにて、位相分解能の評価を行った。図 4 に 3000 秒間の位相安定性を示す。ITER での標準運転での放電時間は 400 秒程度、非誘導運転の場合は 3000 秒程度が計画されている。400 秒程度での測定時間で、ゼロ点変動は  $\pm 1$  度程度、3000 秒程度の場合では  $\pm 2$  度程度であり、これらは光路長が 8 m の場合それぞれ  $1.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、 $2.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  の電子密度分解能に相当する。将来の核融合炉では  $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  程度の密度での運転が想定されているため、得られた密度分解能は運転密度の 1-2% に相当する。

ゼロ点の変動には、気流、若しくは温度変動が大きく影響を与えることが分かった。光学系の中

でも非線形素子周辺の気流により、ゼロ点が大きく変動した。そのため、光学系をシートで被い、気流を抑えることで大幅にゼロ点変動を抑えられることが分かった。また、非線形素子に対する依存性も見られ、現時点ではBiBOの方がよりゼロ点変動が小さい結果となった。これは、PPMgSLTは温度制御をすることで位相整合を図っており、屈折率の温度依存性がBiBOよりも大きいと考えられる。非線形結晶内では、基本波、2倍高調波間で屈折率が異なり、両者の間で位相差がある。温度が一定の場合は、その位相差は計測される位相ではオフセット分として含まれる。温度変化が生じた場合、その差が温度によって異なり、温度変化によってオフセット分が変動するものと考えられる。

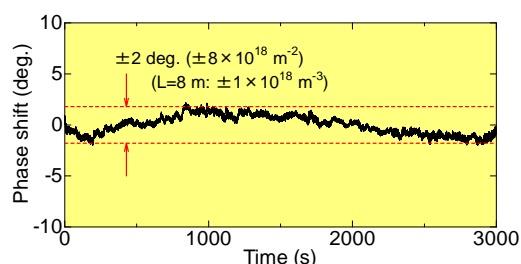


図4: BiBOを用いた場合の位相安定度

本実験も含め、BiBOは通常温度制御無しで使用されるが、更なる密度分解能を目指すために、BiBOの温度制御が有効と考えられる。また、上記の検討より、真空容器内ミラーの反射率低下に備えるためには、PPMgSLTが用いられることが望ましい。PPMgSLTは45度程度に温度制御して使用しているが、外気の温度変動の影響を抑制するため、より熱容量の大きいオープンの使用や、気流を抑える容器内でPPMgSLTを使用することなどが対策として挙げられる。

核融合炉にてNd:YAGレーザー干渉計を使用する場合の概念設計を行った。波長1.064 μmの短波長レーザーを使用する場合、真空容器内ミラーの反射率低下が問題となる。そのため、上記の検討のように高出力レーザー等が必要となる。ミラーの交換作業は、装置を大気開放して行う必要があるため、核融合炉の稼働率を下げる要因となる。そのため、ミラーの反射率低下を抑制する光学設計が不可欠である。

図5にヘリカル核融合炉FFHR-d1でのNd:YAGレーザー干渉計の概念図を示す。真空容器内では、核融合反応で発生する中性子の装置外への漏洩を抑えるため、レーザー光を通す計測ダクトは経路を折り曲げることが必要である。そのため、真空容器内には複数のミラーを設置する必要があるが、ミラーはプラズマから極力遠ざけた位置に設置する。ダクト内に設置するミラーは、プラズマによる表面損耗よりも、不純物の飛来若しくはダクト内での不純物輸送による堆積物によって反射率の低下が生じることが、LHDでの分析結果を元に研究代表者

らにより報告されている。最もプラズマに近いミラー(第一ミラー)には、図5に示すように、計測ダクトの内壁にフィン構造を取り付けることで、ダクト内壁を反射して輸送される不純物を減衰させる。また、合成石英、若しくはサファイア窓が候補となる真空窓は、中性子及びガンマ線照射により透過率が低下し、短波長ほどその影響が大きくなる。中性子漏洩量の数値計算を実施し、計測ダクトの屈曲構造により、真空窓位置での中性子束の積算量を抑制し、短波長レーザーでもFFHR-d1の運転期間内で交換の必要がないことを確認した。

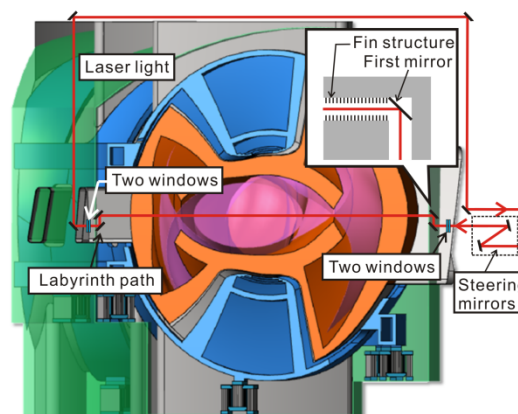


図5: ヘリカル核融合炉FFHR-d1におけるDispersion干渉計の概念図

以上、本研究により、将来の核融合炉にて信頼性の高い密度計測器として、Nd:YAGレーザー干渉計が有効である事を示した。

#### 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3件)

- ① T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, and K. Nakayama, Dispersion interferometer using modulation amplitudes on LHD, Review of Scientific Instruments, 査読有, 85, 2014年, 11D301  
DOI: 10.1063/1.4886777
- ② Tsuyoshi AKIYAMA, Naoaki YOSHIDA, Masayuki TOKITANI, Suguru MASUZAKI, Kazuo KAWAHATA, Shigeki OKAJIMA and Kazuya NAKAYAMA, Impurity Deposition on a First Mirror Surface during Hydrogen Discharges in LHD, Plasma and Fusion Research, 査読有, 8, 2013年, 1402092  
DOI: 10.1585/pfr.8.1402092
- ③ T. Akiyama, N. Yoshida, K. Kawahata, M. Tokitani, H. Iwakiri, S. Okajima and K. Nakayama, Studies of reflectivity degradation of retroreflectors in LHD and mitigation of impurity deposition by using shaped diagnostics ducts and protective

[学会発表] (計 12 件)

- ① T. Akiyama, Development of dispersion interferometer at NIFS, NIFS 共同研究研究会「磁場閉じ込め及び慣性閉じ込め核融合実験における核燃焼実証のためのプラズマ診断」及び平成 26 年度核融合エネルギーフォーラム及びプラズマ物理クラスター計測サブクラスター, 第一回会合, NIFS, January, 14-15th, 2015. (岐阜県, 土岐市)
- ② T. Akiyama, K. Urabe, N. Shirai, R. Yasuhara, K. Kawahata, K. Nakayama, S. Okajima, T. Murakami, K. Tomita, and K. Terashima, Electron density measurement of magnetic confinement plasma and high-pressure plasmas with a phase-modulated dispersion interferometer, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ、新潟、November, 18-21st, 2014. (新潟県, 新潟市)
- ③ T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Preliminary results of a Nd:YAG laser, dispersion interferometer (1  $\mu\text{m}$  DI), 27th Diagnostics TG Meeting, ITER Organization, November 3rd - 7th, 2014. (St Paul Lez Durance, France)
- ④ T. Akiyama, R. Yasuhara, M. Isobe, R. Sakamoto, T. Goto, T. Tanaka, K. Kawahata, K. Nakayama, S. Okajima, and A. Sagara, Conceptual design of high resolution and reliable density measurement system on helical reactor FFHR-d1 and demonstration on LHD, October 13th -18th, 2014. (Saint Petersburg, Russia)
- ⑤ T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Dispersion interferometer using modulation amplitudes on LHD, The 20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, June 1st - 5th, 2014. (Atlanta, USA)
- ⑥ T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Development of Dispersion interferometer on LHD, 磁場閉じ込め及び慣性閉じ込め核融合実験における核燃焼実証のためのプラズマ診断, 核融合科学研究所, 2014 年 1 月 9-10 日, (岐阜県, 土岐市)
- ⑦ 秋山毅志、安原亮、川端一男、岡島茂樹、中山和也, LHD におけるディスパージョン干渉計の開発, 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(東京都, 目黒区)
- ⑧ T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Application of a dispersion interferometer using a ratio of modulation amplitudes to LHD and future prospects, 25th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics, ITER Organization, October 15th-18th, 2013. (St Paul Lez Durance, France)
- ⑨ T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, Application of a dispersion interferometer using a ratio of modulation amplitudes to LHD and future prospects, 16th International Symposium Laser Aided Plasma Diagnostics, September 22rd-26th, 2013. (Madison, USA)
- ⑩ T. Akiyama, K. Kawahata, R. Yasuhara, S. Okajima, K. Nakayama, CO2 laser dispersion interferometer on LHD, 9th Australia-Japan workshop on plasma diagnostics, December 3-6, 2012 (茨城県, 水戸市)
- ⑪ T. Akiyama, N. Yoshida, M. Tokitani, S. Masuzaki, S. Okajima, K. Nakayama, Impurity deposition on first mirror surface during hydrogen discharges in LHD, 22nd International Toki Conference, Japan, November 19-22, 2012 (岐阜県, 土岐市)
- ⑫ T. Akiyama, R. Yasuhara, K. Kawahata, S. Okajima, and K. Nakayama, Dispersion interferometer with 1 micron light source, Japan-Korea Seminar 2012 for Plasma Diagnostics, August 23-25, 2012 (Jeju, Korea)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

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