

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 5 年 5 月 1 6 日現在

機関番号：8 2 5 0 2

研究種目：若手研究

研究期間：2019 ~ 2022

課題番号：1 9 K 1 4 6 9 4

研究課題名（和文）高精度電子密度計測実現のための3波長干渉計の開発

研究課題名（英文）Development of three-color laser interferometer for high accuracy electron density measurement

研究代表者

大谷 芳明（Ohtani, Yoshiaki）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂研究所 先進プラズマ研究部・主任研究員

研究者番号：1 0 8 0 5 8 2 3

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：干渉計測におけるノイズを低減しプラズマの電子密度を高精度で計測するため、従来の2波長干渉計を発展させた3波長干渉計を開発した。本干渉計は3つの波長の異なるレーザーを同軸に伝搬させ、3組の2波長干渉計を構築したものである。2組の2波長干渉計から評価したノイズ成分を残りの1組の2波長干渉計から差し引くことで高精度化を狙う。実験的に、15%のノイズ低減と、53%の支配的なノイズ（100Hz）の低減を実証し、100Hzのノイズは3つのビームの非同軸性により残る振動ノイズであることが分かった。本成果は、Review of Scientific Instruments誌に掲載されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、3波長干渉計は磁場閉じ込め核融合プラズマの密度計測を高精度化することができることを示した。これまで2波長干渉計によって振動ノイズは除去されているものとして評価されてきたが、わずかな光軸のずれが密度計測の精度を悪化させることを明らかにした。また、本干渉計は振動ノイズ成分だけでなく、それ以外の周波数帯のノイズも低減しており、2波長干渉計よりも高精度に計測することが可能である。本成果は、詳細な物理研究のための計測器のみならず、将来的にプラズマの密度制御のための高精度モニタとして、核融合エネルギー研究に貢献できるものと思われる。

研究成果の概要（英文）：In order to reduce a noise floor in the interferometer and measure the plasma in high accuracy, the three-color laser interferometer which is the improved one of the two-color laser interferometer has been developed. This interferometer consists of three one-color laser interferometers with coaxial laser beams, and be considered as three sets of a two-color laser interferometer. From the two sets of the two-color laser interferometer, the value consisting only of the noise floor can be assessed. The noise floor can be reduced by subtracting the value consisting only of the noise floor from the measurement value obtained with the other two-color laser interferometer.

In the demonstration, a noise floor reduction by 15%, and a 100-Hz noise reduction by 53% were achieved. The 100-Hz noise floor is caused by the vibration noise, which remains because of the non-coaxiality of the three beams.

This result is published in Review of Scientific Instruments.

研究分野：プラズマ計測

キーワード：干渉計測 レーザー計測 プラズマ計測 磁場閉じ込め核融合

1．研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合プラズマの電子密度計測法として、レーザー干渉計はプラズマパラメータに対する影響や計測時の仮定が少なくかつ高時間分解能でモニターすることができる手法の一つとして知られており、将来の磁場閉じ込め方式による核融合炉や磁場閉じ込めプラズマ実験装置には必須の計測装置である。レーザー干渉計を用いた計測における問題点として、ミラーの振動などに起因する光学的距離の変化による位相ノイズがあることが知られている。これまでに、2つの波長を持つレーザーを同軸化して計測する2波長干渉計[1]や、1つのレーザー光源を非線形結晶により一部のパワーを2倍波に変換しレーザーから検出器まで一貫して同軸で伝送させるディスパージョン干渉計[2]という手法を用いることによって、振動に起因する位相ノイズを除去することに成功してきた。しかしながら、2波長干渉計やディスパージョン干渉計においてもビームの長距離伝送(100 m 以上)を行った場合、位相ノイズが生じることが知られている。この原因として、温度、湿度及び圧力による大気屈折率変化に起因する光学的距離の変化が位相ノイズとなる可能性が考えられている。屈折率変化による位相ノイズは波長依存性を持ち、プラズマの電子密度と同じ屈折率に起因する項に含まれるため2波長干渉計・ディスパージョン干渉計を用いても取り除くことができない。また、これらの影響は大気中を伝送させる距離が延びるにしたがって影響が大きくなる。

[1] Y. Kawano et al., Review of Scientific Instruments **67**, 1520 (1996)

[2] T. Akiyama et al., 2015 Journal of Instrumentation **10** P09022

2．研究の目的

磁場閉じ込め装置の大型化や核融合反応により生じる中性子による被ばくリスクを低減するという観点から、次期装置ではレーザーと計測対象のプラズマとの距離が遠くなることが想定され、大気の影響は無視できない状況になってくると考えられる。そこで、3つの異なる波長のレーザーを用いた3波長干渉計を開発し、プラズマの電子密度計測における位相ノイズを低減できることを実証する。3波長干渉計は、2波長干渉計を発展させたものであり、3つの波長のレーザーを用いることで3組の2波長干渉計を構築し、そのうち2組の2波長干渉計の計測値を差し引くことによりノイズのみで構成される計測量を得る。このノイズのみで構成される計測量を残りの1組の2波長干渉計から差し引くことで2波長干渉計では除ききれなかったノイズを低減しようというものである。

本研究では、以下の2点を実験的に明らかにすることを目的とする。

- (1) 3波長干渉計のプラズマ計測への適用可能性を示し、計測誤差が低減できること。
- (2) 3波長干渉計により、低減することが困難と考えられていた温度・湿度・圧力変化等によって生じる大気屈折率変化に起因する位相ノイズによる影響と、その低減可能性。

3．研究の方法

本計測器は、JT-60SA で開発が進められている2波長CO₂レーザー干渉計(波長9.25 μm、10.59 μm)のプローブビーム及びリファレンスビームを分岐し、これに532 nmのグリーンレーザーを重ねることにより実現した。この概略図を図1に示す。異なる二つの波長をもつCO₂レーザーはAOM(Acousto-Optic Modulator: 音響光学素子)から2 mの位置で同軸化されている。その後、CO₂レーザーはグリーンレーザーと同軸化される。同軸化されたレーザーをおよそ17 m大気中を伝搬させた後、再度波長ごとに分岐する。波長ごとに分岐した後、同じ波長をもつプローブビームとリファレンスビームを同軸化し、ディテクタで干渉信号を得る。この干渉信号

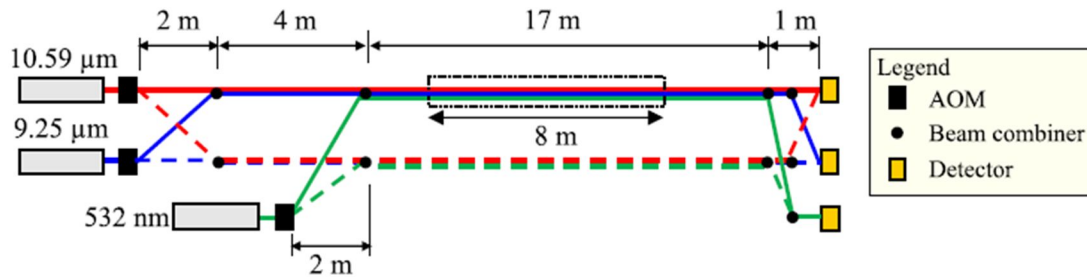


図 1：開発した 3 波長干渉計の概略図

[引用: Y. Ohtani et al., Rev. Sci. Instrum. 94, 013502 (2023)]

と AOM を駆動させる信号の位相差の時間発展を評価し、光路の光学的距離の変化を計測する。プローブビームはアクリルで仕切られたエンクロージャの中を伝搬させる。エンクロージャにはスピーカーが取り付けられており、主にこの領域に振動を与えるようにしている。プローブビームの光路に各波長のビームが透過するウインドウ(NaCl を選定)を挿入できるようにし、ウインドウを回転させることで光学的距離を変化させる。開発した計測器の動作試験では、これを用いて 3 波長干渉計が光学的距離の変化が正しいか評価した。

(1)の目的を達成するために、外部から人為的なノイズ(空気屈折率を変化させる、振動を与える等)を与えないようにし、3 波長干渉計測と 2 波長干渉計測のノイズの大きさを比較した。3 波長干渉計では、同時に 2 波長干渉計としても計測できるため、同時刻における 3 波長干渉計として評価した位相ノイズの量と 2 波長干渉計として評価した位相ノイズ量を比較することが可能である。

(2)の目的を達成するため、大気屈折率変化に影響を及ぼす湿度を変化させた条件下において、3 波長干渉計を用いて計測値を行い、大気屈折率変化が計測に与える影響を評価した。

4．研究成果

(1) 3 波長干渉計の開発

3 節で述べた 3 波長干渉計を開発した。まず、3 波長干渉計により計測される光学的距離の変化を評価した。図 2 に回転する NaCl 窓によって生じる光学的距離変化の計測値を示している。計測値が光学的距離の変化と対応しているかどうか評価するために、幾何的な距離の変化及び各波長に対する NaCl の屈折率を考慮して CO₂ レーザーによる 2 波長干渉計及び 3 波長干渉計の計測値を見積もった。計測値である実線と見積もった値である破線とは概ね一致していることから、3 波長干渉計は適切に光路中の光学的距離の変化を捉えていることを確認した。

(2) 3 波長干渉計の実証試験

(1) において、計測器が正しく光学的距離の変化をとらえていることが確認できたので、プローブビーム及びリファレンスビームの光路中に可能な限り変動を与えないようにして計測を行った。この結果を図 3 に示す。なお、解析手法については、Y. Ohtani et al., Rev. Sci. Instrum. 94,

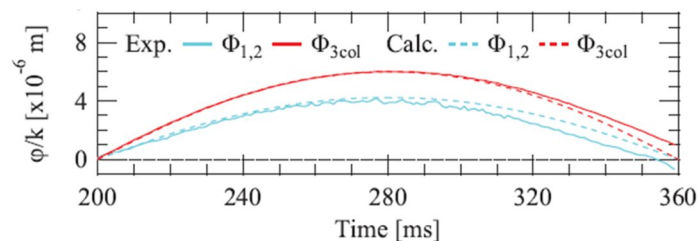


図 2：NaCl 窓による光学的距離変化。Φ_{1,2} 及び Φ_{3col} はそれぞれ CO₂ レーザーによる 2 波長干渉計（青）と 3 波長干渉計（赤）の光学的距離の変化を表している。実線は計測値であり、破線は幾何的に評価した値を示している。

の次元に揃えている。図 3(b)では $\delta_{2,3}$, $\delta_{1,3}$, δ_{3col} の間に大きな差は見えないが、拡大すると $\delta_{2,3}$ と $\delta_{1,3}$ にある 100 Hz 程度の振動成分が除かれていることが分かる。

図 3 の結果を周波数分解したものを図 4 に示す。図 4(a) からわかるように、100 Hz 付近のノイズは大幅に減少している。また図 4(b)は、図 4(a)に示している 3 波長干渉計のスペクトラムを 2 波長干渉計のスペクトラムで割ったものである。ほぼすべての周波数領域において、 δ_{3col} の値は $\delta_{2,3}$, $\delta_{1,3}$ の値と同等かそれを下回る値となっている。例えば、130 - 220 Hz 付近に着目すると、 $\delta_{1,3}$ の方が位相ノイズは小さく δ_{3col} の値はそれに従うように減少してい

る。一方、220 - 320 Hz では、わずかに δ_{3col} の方が $\delta_{2,3}$ の値よりも大きくなる領域はあるものの、概ねノイズの小さい $\delta_{2,3}$ の値に近づいている。以上の結果から、3 波長干渉計は 2 波長干渉計よりもノイズを低減できることが明らかになった。

また、図 1 の黒破線で示したエンクロージャ部に 50Hz、100Hz、200Hz の音を印加し、そのノイズの変化を計測したところ、100Hz の場合のみ大幅にノイズが増加した。これは、エンクロージャ内のミラー等が共振したことによりノイズが増長された可能性を示唆している。2 波長干渉計は完全に 2 つの波長のレーザーが同軸であれば、原理的には振動ノイズは除去できる。しかしながら、人の手によって光軸調整がなされる関係上、実際にはわずかな軸のずれがあり、ミラーの振動による幾何的光路長の変化は 2 つの波長間で同一ではない。そのため、100Hz の音を印加した場合にのみミラー等の共振により 100Hz のノイズが増大されたと考えられる。したがって、3 波長干渉計は、2 波長干渉計におけるレーザーの非同軸性によるノイズを低減できるということが明らかになった。

(3) 大気の屈折率が干渉計測に与える影響の評価

図 5 に相対湿度の時間変化、相対湿度の変化から評価される位相変化及び位相変動の実測値を線積分電子密度換算で示している。エンクロージャは干渉計システム全体を覆うものであり、図 1 の黒破線で囲

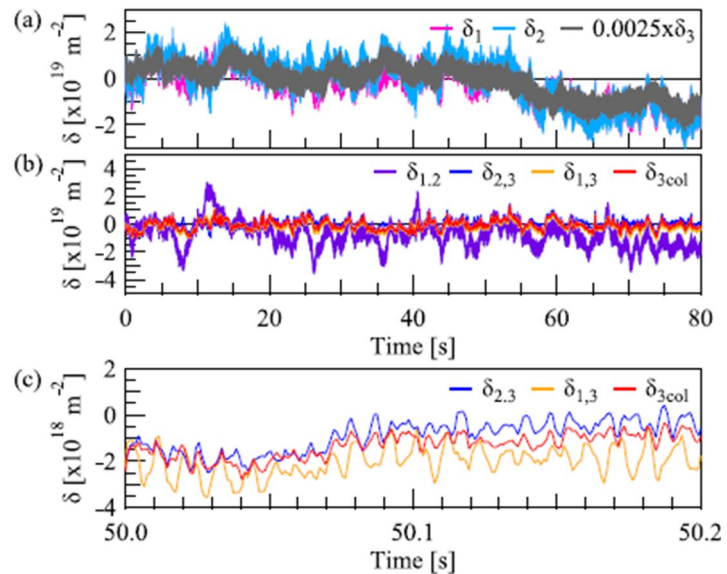


図 3：位相ノイズの時間発展。(a) δ_1 , δ_2 , δ_3 はそれぞれ 9.25 μm , 10.59 μm , 532 nm の位相ノイズ、(b) $\delta_{1,2}$, $\delta_{2,3}$, $\delta_{1,3}$, δ_{3col} はそれぞれ 9.25 μm と 10.59 μm の 2 波長干渉計、10.59 μm と 532 nm の 2 波長干渉計、9.25 μm と 532 nm の 2 波長干渉計及び 3 波長干渉計の位相ノイズである。(c)は(b)の波形を 50.0 - 50.2 s の間で拡大したもの。

[引用: Y. Ohtani et al., Rev. Sci. Instrum. 94, 013502 (2023)]

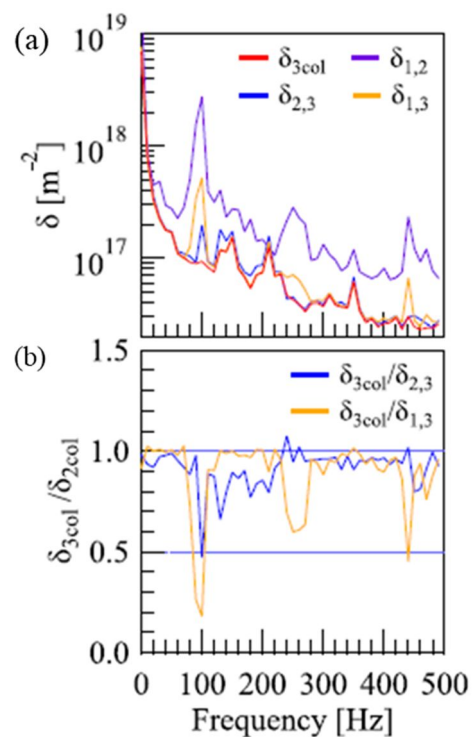


図 4：位相ノイズの(a)スペクトラムと(b)ノイズの大きさの比。 $\delta_{1,2}$, $\delta_{2,3}$, $\delta_{1,3}$, δ_{3col} の表記は図 3 と同様である。 $\delta_{1,2}$ の値は大きいため(b)では省略している。
[引用: Y. Ohtani et al., Rev. Sci. Instrum. 94, 013502 (2023)]

っている部分ではない。また、この実験中大気圧、温度はほぼ一定であり、エンクロージャで囲ったときは 1.002×10^5 Pa、 21.9 ± 0.2 °C、エンクロージャを開放したときは 1.002×10^5 Pa、 22.3 ± 0.1 °C であった。エンクロージャを開放すると、空調の影響により湿度が 20% 程度の幅で増減した。この変動により生じる屈折率の変化を、赤外領域は Mathar の式[3]、可視領域は Ciddor の式[4]を用いて評価した。位相変化は、この屈折率の変化にプローブビームとリファレンスビームの幾何的光路差を乗じて評価した。

先行研究 [2] では、ホモダイン検波方式であったため伝搬経路の屈折率の影響が伝搬距離に比例して位相変動に影響していた。しかしながら、本研究で構築した 3 波長干渉計はヘテロダイン検波を採用しており、プローブビームとリファレンスビームの伝搬している空間も近い。湿度の変化の空間的スケールがプローブビームとリファレンスビームの各位置における最短距離 (10 数 cm ~ 1m 程度) よりも大きいと仮定すれば、屈折率の変化による位相変化は、主としてプローブビームとリファレンスビームの幾何的光路差 (数 10cm 程度) によって影響を受けると考えられる。図 5(b) に湿度変化に伴う屈折率変化が計測値に与える位相変化の計算値、図 5(c) にエンクロージャを閉じたときと開放したときの位相変化を示している。図 5(b) に示すように、その影響は 10^{18} m^{-2} のオーダーであり、図 5(c) のエンクロージャを開放した場合に見られるような変動を説明することができない。また、湿度の増加しているタイミングにおいて、計測値は増加しているタイミングがある。さらに、エンクロージャを閉じて湿度変化がほとんど起こらないようにした場合においても、エンクロージャを開放したときと同等の位相変動が見られており、プローブビームとリファレンスビームが比較的近い空間を伝搬している干渉計では、湿度変化が位相変動の直接的原因ではないことが分かった。

[3] R. J. Mathar, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 9(5), 470–476 (2007).

[4] P. E. Ciddor, Appl. Opt. 35(9), 1566–1573 (1996).

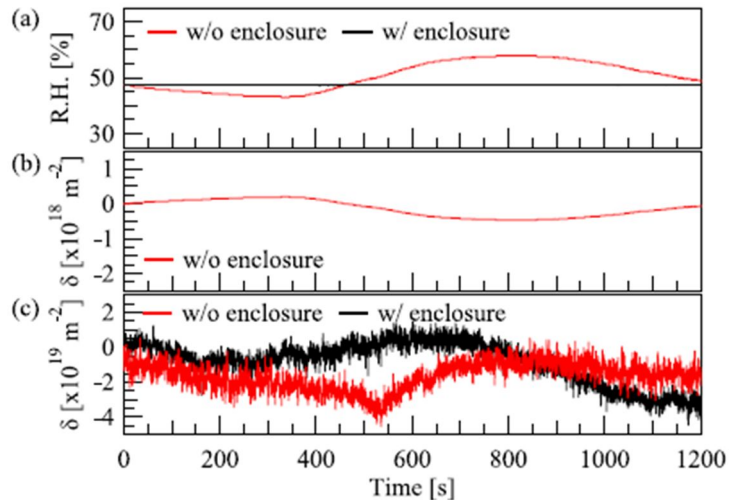


図 5 : (a) 相対湿度の時間変化、(b)相対湿度の変化から評価される位相変動、(c)位相変動の実測値。赤線はエンクロージャを開放した場合であり、黒線はエンクロージャを閉じた場合である。

[引用: Y. Ohtani et al., Rev. Sci. Instrum. 94, 013502 (2023)]

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1 . 著者名 Ohtani Y., Imazawa R.	4 . 巻 94
2 . 論文標題 Conceptual design and demonstration of a three-color laser interferometer for noise reduction in fusion plasma measurements	5 . 発行年 2023年
3 . 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6 . 最初と最後の頁 013502 ~ 013502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0128536	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1 . 発表者名 大谷芳明、今澤良太
2 . 発表標題 高精度電子密度計測のための3波長レーザー干渉計の開発
3 . 学会等名 第39回 プラズマ・核融合学会年会
4 . 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6 . 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究協力者	今澤 良太 (Imazawa Ryota) (50587053)		

7 . 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------