

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012 ～ 2012

課題番号：24656519

研究課題名（和文）

電離を伴う非定常密度場計測のための単一結像2波長マッハツェンダー干渉計の開発

研究課題名（英文） Development of single-plate, two-wavelength Mach Zehnder interferometer for the measurement of unsteady density field with ionization

研究代表者

佐宗 章弘 (SASOH AKIHIRO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40215752

研究成果の概要（和文）：2つの波長の光に対するマッハツェンダー干渉計画像を同一のカラーCCD面上に結像し、非定常2次元（あるいは軸対称）の電離気体流れ場における重粒子密度、電子密度分布を同時計測できるシステムを開発した。これは、屈折率変化に対する密度・波長依存性が電子と重粒子で異なることを利用するもので、光源にはデバイス感度が高い波長473nm（B成分）と593nm（R成分）の2台のCW半導体レーザーを、ビームスプリッターを介して用いた。撮影は、カラーCCD高速度カメラ（画素数；360×410pixel、撮影条件；200,000コマ/秒、露光時間；3μs）を用いた。電離気体からの自発光を除去するために、当該2波長帯域のみを透過するデュアルバンドパスフィルター（半値幅10nm）を用いることによって、S/N比の飛躍的向上が実現した。得られた干渉計画像に対して波長感度補正を行った後、それぞれ2次元フーリエ変換し、2次元周波数空間にてノイズ除去を行ったのち、逆フーリエ変換、再構成を施すことによって位相変化の2次元分布が得られる。このようにして得られた2つの2次元分布から適切な演算を施すことによって、重粒子、電子の密度分布が得られる。このシステムを、直径350mm、長さ400mmのテストチャンバー内で、TEA炭酸ガスパルスレーザーを用いて生成したアルゴンプラズマの計測に適用し、重粒子密度 $5 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$ 、電離度約10%のプラズマの軸対称密度場測定に成功した。

研究成果の概要（英文）：A new Mach-Zehnder interferometer, in which two interferograms with different wavelengths are imaged onto a single plate, has been developed. As light sources, semi-conductor lasers with the respective wavelengths of 473 nm and 593 nm are used. A dual-band-path filter is used to eliminate the effect of emission from ionized gas. The two-dimensional density distributions of heavy particles and electrons are obtained through digital data processing. Demonstration measurement was conducted with laser-pulse-generated plasma in a chamber of 350 mm in diameter and 400 mm in length, thereby obtaining a heavy particle density of $5 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$ and a degree of ionization of 10 % in the axi-symmetric field.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学

キーワード：レーザー、マッハツェンダー干渉計、光学可視化、密度場計測、プラズマ

1. 研究開始当初の背景

航空宇宙工学で現れる高速流体では、高い淀み点エンタルピーあるいは放電やレーザーによるエネルギー付加のために、電離領域（以下、プラズマと呼ぶ）を伴うことが少なくない。このような流れでは、電離度が未知であるため重粒子（中性粒子およびイオン）密度とは独立に電子密度を計測する必要がある。これに対する従来技術として、2つの異なる波長を用いて干渉縞計測を行い、屈折率の電子密度および重粒子密度に対する感度の違いを利用して、干渉縞解析から両者の分布を同時に求める2波長干渉計がある。しかし従来では、ホログラフィーを用いると単一現象しか記録できず、マッハツェンダーを用いた場合の撮像デバイス（CCD）の撮像面を2分割するため十分な空間解像が得られないなどの問題があった。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、2波長マッハツェンダー干渉計（屈折率の電子密度および重粒子密度に対する感度の違いを利用して、両者の2次元空間分布を同時計測することが可能な干渉計）において当該2波長のみを透過するバンドフィルタを通したのち干渉縞画像を単一のカラー撮像面に結像することによって、プラズマの自発光の影響が排除され、なおかつ共通のレファレンス空間を用いることで空間分解能が格段に高められた2次元密度分布計測法を確立することである。これが実現すれば、電離を伴う非定常流れの電子・重粒子密度場を、高時空間解像度で動画可視化診断計測することが可能になる。

3. 研究の方法

応募者の研究室には青山学院大学から譲渡を受けたミラー直径150mmのマッハツェンダー干渉計があり、それをベースに不足部分のパーツを補い、装置を完成させる。2次元フーリエ変換を用いた有限縞解析プログラム（現状は、単一波長に対応）は大学院生長谷川によって完成済みであり、これをさらに2波長の干渉縞データから電子密度、重粒子密度の2次元分布を求めるものに発展させる。実証実験としては、まず①原理実証および定常現象への応用：デジタル（静止画）カメラを用いたプラズマを伴う定常流れ（プラズマジェット）の電子・重粒子密度場計測により原理実証を行う。次に、②非定常現象への応用：高速度カラーフレーミングカメラを用いたレーザーパルス誘起プラズマの非定常電子・重粒子密度場計測を行い、短時間非定常現象への応用を実証する。

4. 研究成果

装置の概略図を図1に示す。光源には・ $\lambda=593\text{ nm}$ の橙色レーザー（SDL-593-030T、Shanghai Dream Lasers Technology社製）と・ $\lambda=473\text{ nm}$ の青色レーザー（SDL-473-020T、Shanghai Dream Lasers Technology社製）を用いた。光源の選定には、カメラCCDの波長に対する感度が重要であり、今回用いた2波長は波長593nmがR値において、波長473nmがB値において高い相対感度を有している。これら2つのレーザーをハーフミラーを用いてパスを揃え、マッハツェンダー干渉計に入射している。マッハツェンダー干渉計を通過後、2帯域のバンドパスフィルタを配置している。透過帯域は波長473nmと593nmで半値幅10nmである。これは計測対象の自発光を除去するためである。バンドパスフィルタ透過後、ピンホールを配置することで、自発光と余分な光を除去している。カメラは高速度カメラを用いている。また、光源レーザーのコリメートレンズ、撮像用のレンズには色収差の少ないアクロマティックレンズを用いた。

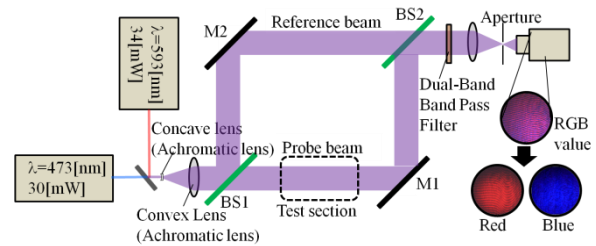


図1 開発した干渉計

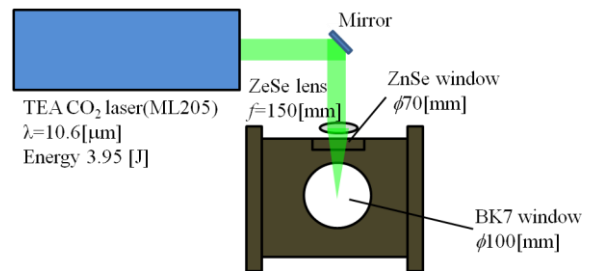


図2 計測対象生成部

2波長単一結像マッハツェンダー干渉法を用いて行ったレーザー誘起プラズマの計測結果を示す。実験系を図2に示す。プラズマ生成のためのレーザーにはTEA:CO₂パルスレーザー（ML-205、SLCR社製）を用いた。波長は10.6μm、パルス幅は2μsである。出力直後のビーム形状は直径40mmの円形であり、1パ

パルスあたりのエネルギーは 3.95 J である。パルスエネルギーの測定には、エネルギーメータ (QE50LP-H-MB-D0、Gentec-EO 社製) を用いており、ミラーでの損失後の値である。レーザーの集光には $f=150$ mm の ZnSe レンズを用いて、小型の円筒形チャンバ ($\phi 350$ mm x 400 mm) 内部に集光させている。チャンバ内部はアルゴンで満たされおり、圧力は 40 kPa に設定した。また干渉計用の可視化窓の材質は BK-7 を用いている。撮影条件はフレームレート 200,000fps、露光時間は 3.0 μ s である。

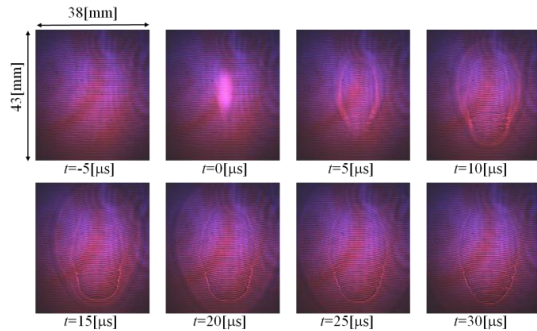


図 3 干渉縞画像 (波長による分離前)

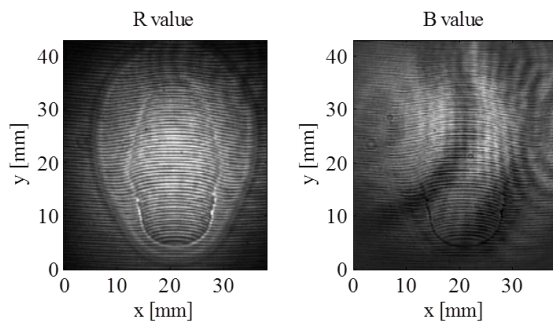


図 4 干渉縞画像 (波長による分離後)

高速度カメラにより得られた干渉縞画像を図 3 に示す。 $t=0\mu$ s においてブレイクダウン時の自発光が確認できる。ブレイクダウン時には、気体の急激な膨張によるブラスト波が発生している。 $t=5\mu$ s から 25μ s にかけてブラスト波の伝播の様子が確認できる。また、接触面はブラスト波に比べて遅い速度で一定の大きさまで伝播、低密度場として滞在していることがわかる。

図 4 に示すのは、この画像を R、B 値に分割したものである。1 波長ずつの測定結果から B 値の画像には橙色レーザー (波長 593 nm) の縞が青色レーザー (波長 473 nm) の干渉縞と比較し 3 割程度の強度で含まれている事がわ

かった。これを除くために、R 値の画像を 0.1 倍したものを B 値から引くという補正処理を行なっている。

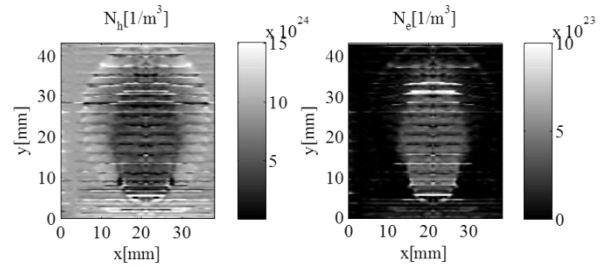


図 5 軸対称場における重粒子/電子密度分布

図 5 に $t=15\mu$ s における重粒子密度分布と電子数密度分布を示す。今回の実験では、プラズマは軸対称と仮定し、アーベル変換により断面分布を求めている。密度上昇と接触面背後での密度が低くなっており、定性的に妥当な分布をしている。また電子数密度場を見ると、接触面背後で電子の存在が確認できる。

図 6 に $y=22$ mm における断面プロットを示す。 $x=6$ mm 付近におけるブラスト波の背後で重粒子密度が大きく上昇していることがわかる。また $x=12$ mm 付近の接触面背後では、重粒子密度が減少しているとともに、電子数密度が増加しているのがわかる。重粒子密度は接触面背後で $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 、電子数密度は $0.3 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 程度を示している。図 7 には $y=22$ mm における断面での電離度を示す。接触面の内側では、0.07 から 0.08 程度の値を示している。局所熱平衡を仮定し、Saha の電離公式よりエネルギーを求めると、約 1.4 eV と得られた。

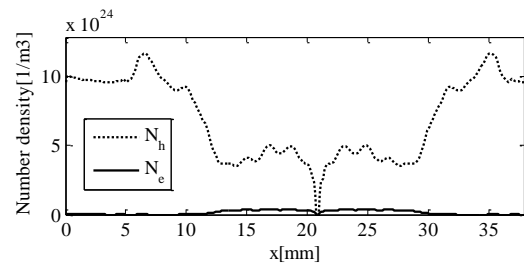


図 6 $y=22$ mm における密度分布

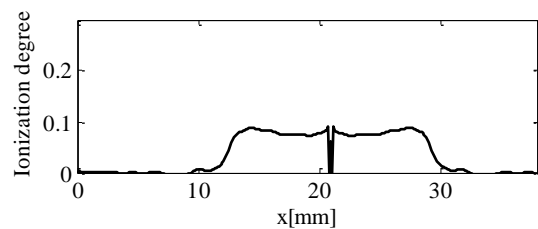


図 7 $y=22$ mm における電離度分布

以上のように、本研究課題では、単一画面に結像した2波長マッハツェンダ干渉計を開発し、レーザーパルスで生成したプラズマの密度計測に適用して、その機能を実証した。

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0件)

[学会発表] (計2件)

- ① 長谷川直紀, 米元聖貴, 横田茂, 酒井武治, 佐宗章弘, “カラーCCD を利用した単一結像マッハツェンダ干渉法による密度場計測,” 第44回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 富山国際会議場, 富山, 7月5日-6日, 2012.
- ② 長谷川直紀, 横田茂, 佐宗章弘, “2波長単一結像マッハツェンダ干渉法を用いた電離を伴う流れの計測,” 第10回日本流体力学会 中部支部講演会, ホテル杏泉閣, 長野, 11月9日-10日, 2012.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐宗 章弘 (SASOH AKIHIRO)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号: 40215752

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし