

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14552

研究課題名（和文）オゾンガスレンズによる新しい高速イメージングシステムの開発

研究課題名（英文）Development of a new high-speed imaging system using ozone gas lens

研究代表者

道根 百合奈 (Michine, Yurina)

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・特任助教

研究者番号：00873358

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：我々の開発している気体媒質（オゾン混合気体）レンズを、高速度撮影・多点焦点撮影などのイメージングに応用させるための研究開発を行った。イメージングでは光量、画角を稼ぐために短焦点かつ大面積の高NAレンズが要求される。本研究では、短焦点レンズ作成のためのサブナノ秒紫外レーザー光源開発、屈折率変調構造の生成、大面積化としては、ガス領域面積の拡大のためのガス流路の開発を行った。さらに、気体レンズに対する最適被制御レーザー入射条件を決定する計算コード開発を行った。これらの成果により、高NA気体レンズ開発・生成のための原理実証試験が完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Society 5.0に代表されるように次世代のマン-マシンインターフェースとして多焦点、多次元対応の新しいカメラ、光学レンズの開発が進められている一方で、サブマイクロ秒からナノ秒の高速度現象の撮影技術に関しては、70年以上前に開発されたフレーミングカメラやストリークカメラといった技術が現在でも使用されている。そのような技術に対して、本研究で開発した気体レンズで行うことにより、高速度撮影・多点焦点、多波長、多時刻対応の、全く新しい概念のイメージングシステムが構成できるようになる。気体レンズの収差は、編構造パターンを照射することだけで修正することは容易であり、理想的なレンズを作ることも期待される。

研究成果の概要（英文）：We conducted research and development to apply the gas medium (ozone mixed gas) lens we are developing for imaging purposes, such as high-speed photography and multi-focus imaging. In imaging, high NA lenses with short focal lengths and large areas are required to ensure sufficient light and field of view. In this study, we developed a sub-nanosecond ultraviolet laser light source for creating short focal length lenses, generated refractive index modulation structures, and developed a triple-structure gas flow path to expand the gas region area for larger lenses. Additionally, we developed a computational code to determine the optimal laser injection conditions for the gas lens. These achievements have completed the proof-of-concept tests for the development and creation of high NA gas lenses.

研究分野：光学

キーワード：光学素子 高強度レーザー イメージング 集光光学素子 レンズ オゾン 回折光学素子 ガス光学素子

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、光学系のほとんどは固体が用いられ、レンズ、ミラー、分散素子など高精度なものはガラスや結晶を基本材料に用いるのは常識となっている。変わったものでは焦点可変のレンズなどで液体が固体に挟まれたものも出てきており、可変性や大型化など効果のポテンシャルは高いといわれるが、大きく発展はしていない。一方、撮像素子の方もシリコン技術をベースにした CCD などが中心で低雑音かつ高感度のものや、読み出し速度を変えて高速化したものが出てきている。マイクロ秒を超えナノ秒現象の撮影となると、いわゆる光を電子にいったん変換し、マイクロチャンネルプレートのような電気パルスによる高速ゲート利用してストリークカメラやフレーミングカメラが作られているが、方式としては 70 年以上前に開発されたものを使っている状況にある。しかし最近、Society 5.0 などで行われているように、多点焦点撮影やステレオ機能などの 3D 情報を得る“カメラ”が、マン・マシンインターフェースとして次世代には必要とされてきている。しかし高速性となると、組み合わせる撮像素子を上のようなものに変える以外、方法は限られてしまっている。

一方、最近我々は、大気圧のオゾン気体を材料とする新しい高強度素子の開発に成功してきた (Y. Michine, et al. Communications Physics Vol. 3, 24 (2020))。これは従来までの気体を使ったレンズなど違い、オゾンを含む気体中に紫外レーザーパルスを空間周期的に照射し大振幅の密度波を発生させ、その密度変調構造による回折現象を基本機能としたものである。すでに 96% を超える高平均回折効率、 $1.6\text{kJ}/\text{cm}^2$ までの高耐力化が実証されている。この素子の 1 つの特徴は、自由空間にガスを放出させた状態でいわゆる窓無し状態でも使用が可能で、大型化などにも適用できる点である。これらに加え、今年に入り曲率をもった粗密波形成法を確立し、いわゆる集光光学系として利用できるようになってきた。

2. 研究の目的

本申請研究は、この新しい気体レンズを、高速度撮影・多点焦点撮影などのイメージングに応用し、まったく新しい概念のカメラを開発しようというものである。この達成のためには、学術研究として、以下のことを明らかにすることを目的とした。

(1) 高 NA 化に対応するレンズを回折光学素子で構成するには、全体の格子間隔の変化の小さいことが必須条件となる。現在、オゾンレンズのような不等間隔縞構造では、回折限界の集光性能は得られているものの、回折領域が制限されてしまうことが実験的に明らかになってきている。そこで、サブナノ秒の紫外レーザー光源を開発し、格子間隔の変化の小さい、縞間隔を数 μm 程度まで短縮させるものが作れるかどうかを明らかにする。一方、格子間隔の変化が急激な場合でも、レンズに入射する光波面の曲率を、レンズの変調間隔それぞれに適した入射角となるようにすることで対応できるかを明らかにする。

(2) 同様に、密度変調の立ち上がりは波の性質で決まりサイン波のようになるが、これにシャッターのような、より矩形時間ゲートのような機能を持たせられるかを検討する。上記のサブナノ秒光源を用い、まずは等間隔縞の場合でのオゾン密度時間発展計測から必要な初期ガス密度、オゾン層の厚み、縞間隔等の条件を探っていく。

(3) 高 NA 気体レンズ生成のため、大面積のオゾンガス層を生成する手法を開発する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、以下の研究開発を行った。

(1) ①サブナノ秒紫外パルスレーザー光源の開発と密度変調量計測

回折レンズ生成光源として新たに $100\text{ps}\sim 2\text{ns}$ のパルス幅可変紫外レーザー光源を開発し、ガス中での粗密波生成試験と、密度変調量の計測を行った。具体的には、光源は制御するレーザーとの同期を考慮し、外部クロック同期が可能な電気的変調信号 ($100\text{ps}\sim 2\text{ns}$ のパルスで出力される) をファイバーシステムで増幅するシステムを構築した。その後、再生増幅器増幅を行い、およそ 1.3mJ , 500mW , 400Hz 繰り返し周波数の赤外光源を得た。その後、LBO、BBO 結晶による 2 段階の波長変換を行い、紫外レーザー光源を得た。また、開発した光源による平行平面のガス回折格子を生成し、密度変調量計測を行った。

②レンズに入射する光波面の最適曲率半径の探索

気体レンズの焦点距離は不等間隔屈折率変調構造の曲率半径に依存し、曲率半径が小さい＝焦点距離の短いレンズとなり、高 NA レンズに適したものとなるが、焦点距離の短いレンズは変調間隔が急激に変化することになるため、平行光に対しては数 $100\mu\text{m}$ 程度の回折領域しか得られない。そこで、気体レンズに入射する光波面の曲率がガスレンズの変調間隔それぞれに適した入射角となるような光学系を設計し、実験を行った。

(2) 気体レンズに対する最適条件探索のための計算コード開発

(1) ②の実験結果と比較しながら、厚み 5mm の体積位相レンズ (フレネルレンズ) に対し、ど

のような入射角度のレーザーが、どのような発散角で入射すれば、大面積で理想的な回折集光条件になるのか、計算機コード開発を行った。

(3) ガス領域面積の拡大手法の開発

厚み 5mm 程度のオゾンガス層流窓が、外部に漏れ出ることなく安定に供給される技術開発が必要である。そこで、酸素、オゾン、酸素の3層構造のガス流路の開発を行った。これは、外側の流路の酸素ガス流を制御し、極力中心のオゾンガス流路に乱流が生じるのを抑えることを狙っており、実際に流体シミュレーションで流路構造や流速等の最適化後、光造形3Dプリンターによっていくつかの試作を行った。

4. 研究成果

上記の項目について得られた成果のまとめについて以下に示す。

(1) ①サブナノ秒紫外パルスレーザー光源の開発と密度変調量計測

開発したサブナノ秒紫外レーザー光源の全体像は図1(左)に示した。また図1(右)には、出力された波長 1064nm レーザーパルスの時間波形を示しており、設計通りに基本波光出力を得ることができている。これを2段階の波長変換を行い、10%程度の変換効率で、100uJ 出力を達成することができた。

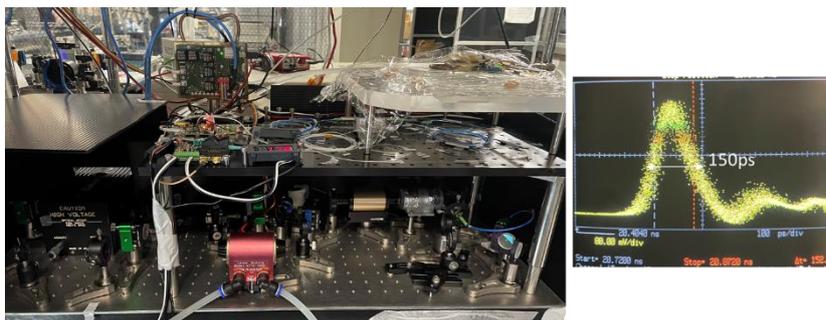


図1: (左)サブナノ秒深紫外パルスレーザー (右)実際の出力波形

次に、開発したサブナノ秒紫外光源で、平行平面の空間変調パターン(干渉縞)をオゾンガスに照射し、ガス回折格子の生成を行った。さらに別途準備した波長 290nm のプローブ紫外レーザーパルス光により、その密度変調特性の計測を行った。図2の写真は、プローブ紫外レーザーによるオゾンガス中の密度変調構造の吸収計測像を示している。オゾンガスにサブナノ秒紫外レーザーが照射された瞬間(0ns)は、オゾンガス密度は初期の均一密度条件の状態であるが、時間経過で、徐々にサブナノ秒紫外レーザーの照射部と非照射部のオゾンガス密度に差が表れ始め、15ns 後には、その密度変調振幅がピークとなる状態が観測できた。

またさらに長時間観測していくと、この密度変調振幅の変化が波のように周期を繰り返す様子も観測された。ナノ秒紫外レーザーでも同様の傾向が観測されていたが、このサブナノ秒紫外レーザーであっても、理論予測された通りの傾向が観測できたことになる。

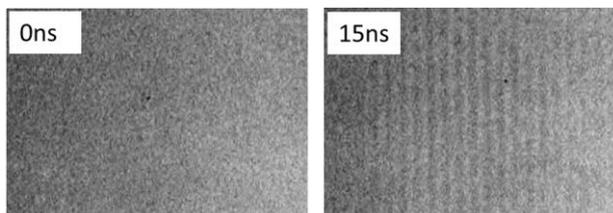


図2: サブナノ秒深紫外パルスレーザーによる密度変調構造の時間発展像

② レンズに入射する光波面の最適曲率半径の探索

曲率半径 $R=300$ 程度のガスレンズをナノ秒紫外レーザーで生成したのち、被制御レーザー光の発散角をシリンドリカルレンズペアで調整し、ガスレンズに入射させた。図3は被制御レーザーの焦点距離を-1120 mmから-357 mmまで変化させ、ガスレンズに入射させた際の0次透過光パターンを示しており、焦点距離-357 mmの被制御レーザー入射角の時に、回折領域が顕著に増加できていることが確認できた。

またこの際の回折領域は 3 mm 直径程度になっており、ナノ秒レーザーの場合でも、不等間隔密度変調構造をもつガスレンズに適切な発散角のレーザーを入射すれば、大面積で制御可能

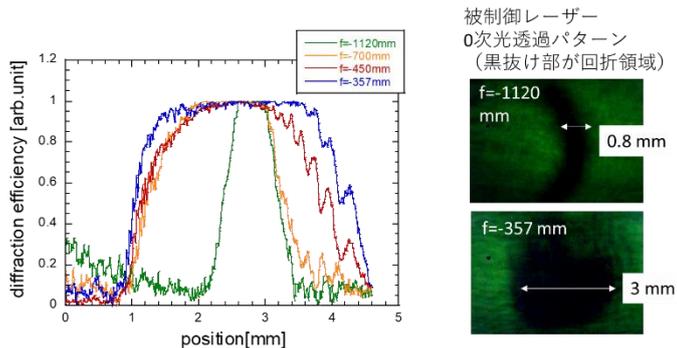


図3: 入射レーザーの発散角の調整

であることが明らかになった。

(2) 気体レンズに対する最適条件探索のための計算コード開発

図3の実験結果を受け、気体レンズに対する最適被制御レーザー入射条件を決定する計算コード開発を行った。気体レンズを生成させるためのパラメーターは、紫外レーザーの球面波と平面波それぞれの干渉角度で、その曲率半径と実験より得られた密度分布から構造が決定される。それに対しての各レーザー波長の入射角度は、回折格子方程式を満たし、かつ最大回折効率をとるようなパラメーターを、ガス厚みを含めて計算できるようにした。この計算コード開発は終了し、実験との整合がとれるかどうかの試験は、今後の課題になる。

(3) ガス領域面積の拡大手法の開発

今後、大面積の気体レンズを生成するには、一様な厚みをもったオゾン層が、閉じ込める窓なしの状態が存在している必要がある。そのため、現在のガス流路開口部 $1 \times 1 \text{cm}^2$ から、3重構造ガス流路の構造で、開口部が $3 \times 3 \text{cm}^2$ となるようなガス流路の設計・開発を行った。ここでは相互作用領域となる開口部のオゾン密度分布の一様性、高密度性が重要であるため、3層流路構造の中心部にはオゾンガス、その両外側の流路には、オゾンガスをガイドする窒素ガスが流れるようになっている。図4は実際に光造形3Dプリンターで試作した実際の3層構造ガス流路である。各層を流れる気体の流入・流出速度を制御し、深紫外LED光源で開口部でのオゾン密度分布を可視化し、最適条件を決定できるようなシステムが完成した。

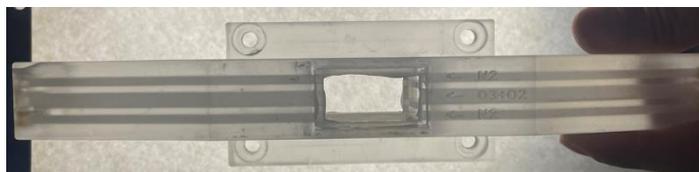


図4: 開口部が $3 \times 3 \text{cm}^2$ の大口径3重ガス流路

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yurina Michine and Hitoki Yoneda
2. 発表標題 Ozone grating for ultra-short pulse laser compression
3. 学会等名 The 13th Advanced Lasers and Photon Sources Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yurina Michine and Hitoki Yoneda
2. 発表標題 Ultra-high field optics made by ozone mixed gas
3. 学会等名 The 10th International Conference on Pacific Rim Laser Damage (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 道根百合奈、米田仁紀
2. 発表標題 気体光学素子の新展開
3. 学会等名 2024年第71回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 道根百合奈、米田仁紀
2. 発表標題 J-PARCにおける高強度陽子ビーム生成のためのレーザー荷電変換手法の開発
3. 学会等名 第10回レーザー学会専門委員会「自然に学ぶレーザーカオスと量子ダイナミクス」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 道根百合奈、米田仁紀
2. 発表標題 オゾン混合気体中での光励起粗密波の高精度制御手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 道根百合奈、米田仁紀
2. 発表標題 紫外光励起オゾン光学素子の粗密波制御手法の開発
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第44回年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yurina Michine and Hitoki Yoneda
2. 発表標題 Ozone grating for laser particle accelerators
3. 学会等名 The 11th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS '22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yurina Michine and Hitoki Yoneda
2. 発表標題 Ozone gas optics for high energy laser applications
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 道根百合奈, 米田仁紀
2. 発表標題 ピコ秒深紫外レーザーによるオゾンガス中での大振幅粗密波生成
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yurina Michine
2. 発表標題 Candidate of final focusing system for high power lasers
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 道根百合奈, 米田仁紀
2. 発表標題 ピコ秒紫外レーザー光源によるオゾンガス光学素子生成
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yurina Michine and Hitoki Yoneda
2. 発表標題 Development of ozone mixed gas optics in vacuum environment for high power lasers
3. 学会等名 The 10th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 道根 百合奈、米田 仁紀
2. 発表標題 高強度レーザー応用へ向けたオゾンガスオプティクス of 進展
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 回折装置、レーザー装置、干渉縞形成方法、及びレーザー光回折方法	発明者 米田仁紀，道根百合奈，玉置善紀，他2名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2024-055808	出願年 2024年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------