

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22481

研究課題名（和文）高強度レーザー応用のためのデブリフリー集光システムの開発

研究課題名（英文）Development of debris-free focusing system for high-intensity laser applications

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） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：高強度レーザー光の応用は、これまでのレーザー加工や表面処理などのエネルギーを光線的に使用する応用から、高エネルギー光子発生や、レーザー加速、中性子発生など真空中での新しい応用に向けて具体的なシステム設計が進んでいる。そこで本研究では真空環境下で高強度レーザーを集光でき、応用上のデブリ問題を完全に解決できることを目指した、オゾン混合ガスを媒体とする集光光学系の開発を行った。0.001Torr以下の真空中で大気圧程度のオゾンガス領域を数100us程度の時間保つ構造体と、希ガスを混合させた高圧オゾン生成装置を開発し、集光に必要なオゾンガス中での大振幅密度変調の書き込みを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザーをターゲットに集光することで生じる融解物（デブリ）は、レーザーの集光素子に付着し、汚染や損傷の原因になることから、解決が望まれている。現在は交換可能なシールドガラス等が使われることが多いが、根本的な解決になっていない。オゾン素子是我々のオリジナルなアイデアと技術であり、真空中で実現できれば、デブリ問題の完全解決を図ることができる。また、気体中の大振幅密度波形成の物理は、学術的に見ても高い独自性を持っている。気体媒質のサイズは1mm角程度もあれば、そこに粗密波を励起して10J級のレーザーでも十分制御することが可能になる。

研究成果の概要（英文）：Specific system designs for applications of intense laser light are progressing from conventional applications such as laser processing and surface treatment to new applications in vacuum, such as high-energy photon generation, laser acceleration, and neutron generation. In this study, we developed a focusing optics system using an ozone gas mixture as a medium, which can focus a high-intensity laser beam in a vacuum environment and completely solve the debris problem in the application. We developed a high-pressure ozone generator with a mixture of the rare gas, and demonstrated the writing of large-amplitude density modulation in ozone gas, which is necessary for light focusing.

研究分野：光工学

キーワード：気体光学 光学素子 レーザープラズマ 高強度レーザー 損傷閾値 回折格子

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、レーザーの高出力化が加速しており、市販レベルのものでもピーク値で PW( $10^{15}$ W)を超え、平均出力でも 10kW を超えたものが始まっている。高出力レーザーの産業応用ではレーザー加工や表面処理加工などのエネルギーを光線的に使用する応用が市場の6割以上の用途を占めているが、最近は高エネルギー光子発生や、レーザー加速、中性子発生など新しい応用に向けて具体的なシステム設計も進んでいる。このようなレーザーが高出力化していく流れの一方で、レーザーシステムを構成する光学素子の耐力は、大きな進展がなく、すでに固体を使用する素子の理論限界近くまで来てしまったという見方もある。現在は高強度レーザーに対応するために素子を大型化するしか方法がなく、これを解決するために、固体より高強度光に耐えうる気体媒体を利用した光学素子も提案されてはいたが、形状不安定で高精度化できないと考えられていた。

しかし最近になって我々は、大気圧のオゾン混合ガス中に、2本の紫外レーザーパルスで空間周期パターンを照射することで、気体中に大振幅の粗密波を励起する方法を見出した。これによって大きな屈折率変調構造をガス中に誘起することができ、固体の100倍以上高耐力な気体媒質回折光学素子の開発に成功した。この素子は、気体でありながら数 $\mu\text{m}$ 程度の格子間隔を持ち、96%以上の回折効率を達成でき、さらにその回折波面は標準の光学素子面精度を超えていることも実証されている。さらに現在この研究では、ガス中に曲率を持った粗密波を形成させることで、レーザーを回折させながら集光させる機能を持つ光学素子が、わずか3mmのガス層の厚みで実現できるようにもなっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、我々が開発しているオゾン光学素子を、多くの高強度・高出力レーザー応用に利用できるようにするために、真空内で使用できるシステムにまで発展させる。真空でのレーザー応用では、レーザーを一点に集光させ媒質との相互作用を行うことが多い。これに必要な真空度は高強度レーザーの応用により決まり、おおよそレーザー集光点で  $10^{-3}\text{Torr}$  以下程度の真空が必要である。一方で、この光学媒質は気体であるので、真空中でオゾン光学素子を生成するには、真空内に高圧気体を噴出させ過渡的に気体層（1気圧程度の気体分子密度）を形成させる必要がある。この分子流領域の真空から粘性流領域の気体素子までを両立させる手法を確立することを目的とした。

### 3. 研究の方法

平均自由行程を考えると、真空中で気体素子の高密度部は音速で広がってゆく。そこで、まず、時間的、空間的に気体噴出の集中を行い、過渡的に高密度の気体層を作れる手法を確立することをを行った。具体的には以下の項目を実施した。

#### （1）ガス流停滞によるオゾン高密度化：

真空中のオゾンガスの噴出には高速パルスバルブを用いた。さらに、ガス噴出部直上にガスの拡散を防ぐ遮蔽物を設置し、一時的にガスを停滞させることで瞬間的な高密度ガス領域を生成する手法を試験した。遮蔽物内部の時間的なオゾン密度の変化は、オゾン分子に対して弱吸収のある波長 290nm のパルスレーザーを利用して時間プローブすることで測定した。これにより、真空中でガス密度が最大となる時間を決定できることになる。

## (2) 高圧オゾン生成：

高速バルブで噴出するオゾン濃度は、ガスリザーバーに蓄積している初期のオゾンガス圧の高圧化も必須となる。しかし、一般的なオゾン生成手法では、原料酸素ガスから誘電体バリア放電などにより生成されるが、生成効率は大気圧程度で最大となり、高圧条件では効率的なオゾン生成手法がない。そこで、バッファーとして高圧の希ガスを混合した酸素ガスに対してバリア放電を行い、高圧かつ高濃度オゾンを生成する手法の開発を行った。

## 4. 研究成果

上記2つ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) ガス流停滞によるオゾン高密度化：

まず、単純に高速パルスバルブで真空中にオゾンガスを噴出させた場合のオゾン密度のシャドウグラフ計測を行い、時間的な密度変化を計測した。パルスバルブの開放時間が  $400\ \mu\text{s}$ 、 $10^{-2}\text{Torr}$  の真空環境条件のとき、オゾンガスは噴出直後から拡がってゆくために、オゾンによる明確な密度変化は見られなかった。一方で、同条件で、ガス噴出部直上にガスを停滞させる遮蔽物を配置した際のオゾン密度の時間発展の計測では、ガス噴出後、おおよそ  $600\ \mu\text{s}$  後にオゾン密度が最大になり、遮蔽構造体によって効率的に大きな局所的高密度オゾン領域が生成できていることがわかった。今回は単純な単層の遮蔽体で実験を行ったが、この手法が効果的であることが明らかになったため、今後はこの成果を発展させ、真空中でのより最適なガス遮蔽構造物や、差動排気を利用したより高真空中でのオゾン生成を目指していく。

### (2) 高圧オゾン生成：

(1) で示された手法では、ある程度の高密度状態を生成することは可能であるが、実際に真空中で気体素子を生成するためには、より高濃度オゾン領域が必要になることが分かっている。単純には高速パルスバルブでガスを噴出させる際の圧力を上げればよいが、すでに述べたように、単純な酸素ガスからの放電により生成させる手法では、高圧かつ高濃度オゾンを生成することは難しく、実験的にも3気圧を超える高圧酸素での放電によるオゾン生成では、生成効率が落ちることもわかってきた。そのため、ガスの高圧を保持する部分として高圧の希ガスを利用し、新たに高圧ガスリザーバー中で大気圧程度のオゾンガス+高圧希ガスを放電させ、オゾンを生成させる装置を開発・製作を行った。結果として、単純な大気圧オゾンをパルスバルブで噴出させる手法と比較して、真空中で高濃度オゾン領域 ( $1\text{mm}^3$ ) を生成できることが分かった。

### (3) 真空中での大振幅粗密波生成

これらの技術開発を元に、真空中で紫外レーザー光によるオゾンガス光学素子の生成試験を行った。希ガスを混合させた酸素より高圧オゾンを生成し、高速パルスバルブで瞬間的に真空中に噴出させ、パルスバルブ出口直上に配置したガス遮蔽構造物によってある時間のみ高濃度化させる。密度が最大となるガス噴出後  $400\ \mu\text{s}$  程度の時間に、時間的・空間的に高品質化された紫外レーザーを干渉入射し、オゾン領域に粗密波を生成する。この粗密波は、オゾンガスに対して弱吸収のある波長のレーザーによって観測を行った。その結果、真空中であっても、大気中でのオゾン粗密波の生成と同じように、粗密波の密度変調構造が紫外レーザーを照射した瞬間から徐々に大きくなり、ピークを迎えたあと、徐々に減衰し、また大きくなる、波のような現象を示すことが観測できた。さらにこの密度変調構造が最大となる時間に別の波長のレーザーを入射させると、ガス素子に入射する光が回折可能であることも実験的に示すことができた。いまだ回折効率は低いですが、①、②で示した手法が効果的に機能するデータを獲得でき、今後はこれら手法の改良により、高効率で回折できるガス素子の開発が可能となる可能性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 道根百合奈
2. 発表標題 紫外レーザー光励起オゾン混合ガス回折光学素子の開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 道根百合奈
2. 発表標題 真空環境下でのオゾン混合ガス回折レンズの研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 道根百合奈
2. 発表標題 ダメージ・メンテナンスフリーで動作するオゾンガス媒質光学素子の開発
3. 学会等名 令和2年度育志賞研究発表会
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
---------------------------	-----------------------	----

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