

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21153

研究課題名（和文）中性ガスを利用した超低挿入損失光学素子による高ピーク強度高平均出力レーザーの開発

研究課題名（英文）Development of high peak power lasers with ultra-low loss neutral gas optics

研究代表者

米田 仁紀（Hitoki, Yoneda）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授

研究者番号：00210790

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：中性ガスを利用した新しい光学素子の高ピーク強度かつ高平均出力レーザーへの応用を行うために、要素技術の開発・研究を行った。具体的には、真空内での動作について、真空中に噴出させたガス密度の高密度化を行うために、3Dプリンターで種々の構造を持ったガスセルを製作し、真空中でもオゾン回折格子が生成できることを実証した。大面積化をともなう球面波-平面波変換では、空間位相整合の問題であることが解明されプレ光学系を入れることで対処できることが分かった。高フィネス共振器での超低損失ミラーのオゾン雰囲気下での膜劣化については、ガス導入によるフィネス低下は $10^{-x}$ のレベルでは無視できる程度であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オゾンを含むガス光学素子は全く新しい概念に基づく光学素子で、なおかつ高速スイッチング性、超高耐力、高品質性をもつため、新しいレーザーを生み出すことができる。この応用としては、これまでダメージへの対応のためにできなかったパラメータ領域での動作や、新しいタイプの増幅器、パルスレーザー生成法などが開発可能である。現在、企業との協力を考えながら社会実装できるタイプのレーザーを開発できるところまで来ており、他には無いレーザー装置を世の中に出すことができるようになる。

研究成果の概要（英文）：We have developed detailed technologies to apply new optical elements using neutral gas to high-peak intensity and high-average power lasers. Specifically, regarding the operation in the vacuum, gas cells with various structures were manufactured with a 3D printer to increase the density of the gas ejected in the vacuum, and the ozone diffraction grid was created even in the vacuum. In the spherical-plane wave conversion with a large area, it was found that it could be improved by inserting a pre-optical system. Regarding the film degradation of the ultra-low loss mirror in the high finesse cavity resonator under the ozone atmosphere, it was confirmed that the finesse decrease is negligible small at the level of about  $10^{-x}$ .

研究分野：レーザー科学

キーワード：光学損傷 パルスレーザー 高出力レーザー 高ピークパワーレーザー

## 1. 研究開始当初の背景

レーザーの高出力化は年々増強傾向にあり、繰り返しを上げることによるパルスレーザーの高平均出力化も数年で桁違いに増加するなどの状況にあった。この中で光学素子の性能だけが取り残されたようになっており、その特性にレーザーシステム全体おパフォーマンスが制限されることも増えてきていた、一方、我々の研究で見つかったオゾン吸収媒質にするガス光学素子は、気体媒質でありながら高い光学波面特性を持ち、固体に比べ10~100倍強い光学破壊しきい値も有するものであった、このため、この新しい光学素子をレーザーシステムに実用するシステムができてくれば、桁違いに大きな室力をコンパクトサイズで発生できるものが実現できることになる。一方、最終的な出力制限は熱によると考えられていて、いかに低損失はシステムを構築できるかも1つの鍵となると考えられた。

## 2. 研究の目的

以上のような背景を受け、この研究では、我々が開発してきた素子を用いて、具体的な高出力化レーザーシステムを構成させるための要素技術の開発や、それにかかわる原理実証を実験的に達成していくことにした。具体的には、高出力化レーザーへの対応を進める中で、申請時での課題には入っていない方が、種々のレーザーシステムデザインを考慮し、現在のレーザーシステム中での導入を考えた場合、重要となると考えた真空内動作についての対応と原理実証を行うことにした。また、超低損失光学システムでの光蓄積スイッチによるパルス化では、スイッチする場所がそれまでオゾン回折格子で良好の特性を示してきた平面波的なものではなく、曲率を持った波を対象とする必要が出てきたために、球面波に対するオゾン光学素子の制限要因や最適条件にした場合のオゾン回折格子特性を調べることにした。さらに、蓄積型パルスレーザーでは、当初より影響があるのではないかと指摘されていた高反射率ミラーに対するオゾン分子の影響についても、定量的な評価ができるようにした。

## 3. 研究の方法

この新しい光学素子を高ピーク強度高平均出力レーザーにつなげるためには、いくつかの要素技術の開発が必要である。その中では、これら光学素子が高出力・高ピークレーザー環境で使われることが多いために、真空中での動作を少なくとも原理実証させておく必要がある。このために、高速バルブでの真空内へのオゾン混合ガスの噴出方法を検討し、十分なガス密度を得られる条件を設定することにした。また、これには、高速バルブ上流のガス圧力が高い必要性が出てきたが、純酸素を使うオゾン発生では、高密度化が難しく、エキシマレーザーなどの高圧ガス放電レーザーのアイデアを利用した、バッファーガス導入による高圧化を試すことにした。

次に、球面波への対応を考えた場合、この素子の体積ホログラム的な回折現象を扱う特性のために、波長分散や空間位相の不整合によるエリアの限定などが起こると考えた。実際に単純な球面波-平面波の干渉パターンを利用した粗密波発生では、三日月の形をした限られたオゾン領域でしか回折しないことが分かった。これを解決するために、空間位相整合がとりやすい粗密波励起用レーザーパターンと、プレ光学素子による入射波面変形を併用させて最適条件を探すようにした。最後に、レーザー光の高フィネス共振器内で光蓄積を行う場合、どうしても高フィネスに達成するためには、局所的なオゾン流では対応できず、共振器を構成している部分へのオゾンガス封入を考える必要があることが分かった。この時、高フィネスを実現させるためのミラーのオゾンガスによる劣化を定量的に評価しなければ、社会で実装できるレーザーシステムにはならないと考えた。そこで、オゾンなどのガスによるミラー特性の劣化を、調べることにした。特に光学薄膜は、ボイドが存在していると考えられ、その分実効的な表面積が増え、結果として理想的な固体表面より影響が出やすいことが考えられた。これらを膜内へのガス吸着量を手量評価する装置を開発し、実際の種々のコーティングで作られる高反射率膜について調査を行った。

#### 4. 研究成果

具体的な研究成果は以下になる。

##### (1) 真空内での動作

このガス素子を高ピークパワーレーザーで利用しようとする、必ず聞かれるのが一般に圧縮回折格子などは、すでに空気中の伝播による分散や非線形光学効果の低減のために真空もしくは希ガス中で行われているが、それらとのマッチングが可能かということであった。元来、このガス光学素子は、屈折率が固体に比べ3~4桁低い値のために、高密度のガスを必要とする。この矛盾を打開するために、パルスガス噴出が考えられるが、それでも真空中への噴出となれば、低密度化は避けられず、さらにガスの密度分布も大きくついてしまう可能性がある。これらを打開するためにガスをため込み、さらにガス分子の運動方向をある程度制限できるガスセルの開発を行っている。具体的には、高速バルブからのガス流を止める“壁”の部分を3次元的な微小セルを重ね合わせたような構造にした。これらは製作が困難であるので、3Dプリンターを用いてそのセルの大きさ、間隔などを変えたものを作れるようにし、ガスの噴出条件により変えられるようにした。これらの助けを入れると、真空内であっても一様な回折格子を書き込むことができるようになった。

##### (2) 空間位相整合による回折波ビームへの条件緩和

この光学素子は、体積的な回折格子となるために、強い波面選択性がとられることになる。これは、レーザー増幅システムを作る際の波面クリーナーなどには非常に有効であるが、単にレーザーを切り出したいとか、回折波のモードを変えたい(単純な平面波か

ら球面波へ) 時などは工夫が必要になる。特に、単純なレンズのような集光光学系は、ガス中に書かれる回折格子の空間パターンをフレネルゾーンプレートのような形にすることで、可能ではあったが、空間的な位相整合のために、その口径は著しく縦横比が大きくなった形となってしまう。これは、共振器内の光波をスイッチさせる場合にも重要であり、対象となる光波に合わせた設計ができるのか、空間位相整合をうまく変化できるのかを示していく必要がある。この解決には、所望する光波の空間の位相整合条件に合わせた回折格子を書き込むか、回折される入射ビームの空間モードを合わせることが考えられる。ここでは、まずその原理実証として書き込まれる回折格子をフレネルゾーンプレートに近い状態にし、そこに入射される光波の波面を変えることで、有効面積が広げられるかを調べた。その結果、入射波の発散角をある程度つけることで、3mmφの円形開口をもつ回折光学系を設定できることが分かった。この時、入射波は曲率半径が70cm程度の発散を持ったビームで実証されているために、構想されている光共振器内のビームには、まさに合致したものでできることが明らかになった。

### (3) オゾンガスの共振器内光学薄膜への影響

超低損失ミラーでは、ppm オーダーに損失を抑えることができなければ、こうフィネス共振器を構成することができない。オゾン分子は活性的な分子として有機膜の除去などを含む表面クリーニングにも使われるが、これが高反射膜にどう影響するかは、この研究で調べる1つの課題であった。まず、実際に高フィネス共振器を構成し、そこにオゾンを含むガスを十分な高密度で封入、そこでのフィネスの変化を調べた。この時、オゾン分子自体は、共振器を挿入したガスチャンバーの壁との相互作用で低下していくので、オゾン密度を保つために、わずかな流れをもって継続的に流入させる構造をとった。その結果、フィネスの低下は $10^5$ レベルではわずかであり、これはオゾンによる膜の変化というよりも、ガスの流れによる影響が大きいと思われた。膜内へのオゾンなどのガス分子の混入は、光学薄膜が結晶ではなく、ある程度のボイドを含んでいるためと考えられている。そこで、この影響をより直接的に確かめるために、超高真空チャンバー内で、鏡の表面を外部からCO<sub>2</sub>レーザーを用いて加熱し、その膜内部から放出されるガス分子成分を四重極質量分析器で調査できるものを製作した。その結果、通常の高耐力膜として使われる電子ビーム蒸着の場合は、多くの分子が放出されているが、IBS法によって作られた超低損失膜の場合は、放出されるガスは微量であり、光学薄膜で通常問題となる水分子もわずかしかな含まれていないことが分かった。そのため、オゾン分子の共振器ミラーへの影響は無視できるレベルであることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 道根百合奈、米田仁紀
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、米田仁紀
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 2021年

1. 発表者名 道根百合奈、米田仁紀
2. 発表標題 紫外光励起オゾン混合ガス回折光学素子の密度変調生成時間高速化の研究
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yurina Michine and Hitoki Yoneda
2. 発表標題 Final focusing optics with UV excited ozone mixed gas grating for high power laser systems
3. 学会等名 The 9th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS '20) (国際学会)
4. 発表年 2020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	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・特に助教  (12612)	

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