

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 3 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13697

研究課題名(和文)高エネルギーレーザーフラックス光学

研究課題名(英文)High energy flux optics

研究代表者

米田 仁紀(YONEDA, Hitoki)

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：中性ガスを媒質として、安定に屈折率の空間変調を作り、96%という高い回折効率の光学素子を開発することに成功した。この素子は、大気圧の酸素とオゾンから成り立っており、その耐エネルギー力は1.7kJ/cm²と従来の固体素子の数百倍を持つものであることが分かった。この素子の鍵は、密度揺動を如何に生成させるかであるが、ここでは、オゾンによる共鳴吸収とそれに引き続き起きる再結合過程、さらに、この局在した温度揺動を初期条件として、エントロピー波が効率よく生成されることが分かった。さらには、この波は、非線形発展をし、数周期まではきれいな振動をするが、その後ダンプすることまで実験的に明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We succeed development of an optical element with high diffraction efficiency of 96% by spatially modulating the refractive index in neutral gas. This optical element is composed of oxygen and ozone at atmospheric pressure. The laser damage strength is more than 1.7 kJ/cm² for 6ns pulse. It is several hundred times of conventional solid element. The key of this element is how to create the density fluctuation. We clarify this process and there are the resonance absorption by ozone and the recombination process that follows it, and the localized temperature fluctuation as an initial condition, the entropy wave was generated efficiently. In addition, temporal nonlinear development of this wave is observed. After several clean cycle oscillations, the dumping occurs suddenly.

研究分野：レーザー工学

キーワード：高強度レーザー 回折格子 光学損傷

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日

機関番号：12612
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2016~2017
課題番号：16K13697
研究課題名（和文）高エネルギーレーザーフラックス光学
研究課題名（英文）High energy laser flux optics

県空代表者

米田仁紀 (YONEDA Hitoki)
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（研究機関全体）：（直接経費）2,800,000 円

研究成果の概要（和文）

この研究では、オゾンの効率的な紫外線吸収を利用した、新しい高耐力光学素子の開発とその応用を実証させることが主となっている。これまでオゾンを含む中性ガス中に、大きな粗密波を生成できることが分かっていたが、それを利用した回折格子の回折効率はまだ低く、ショットごとのばらつきも大きかったので実用化には難しい状態であった。また、生成機構も不明な点が多く、高効率、高安定、高耐力を持つ実用的な回折光学素子を開発するためには、その基礎過程から明らかにし、90%以上の回折効率を実現させる必要があった。この研究では、多色のプローブレザーを用い、オゾン、酸素密度の空間分布を高時間分解で測定し、さらに、流体モデルなどを開発することで、その粗密波の生成機構を明らかにした。また、書き込みレーザーのコヒーレンスを改善し、さらに、空間的に周期構造を持たせるための書き込みレーザー干渉計内の光学素子の面精度を改善し、50mJ/cm²程度の書き込みエネルギーで1.7kJ/cm²の耐力を持つ回折光学系が、回折効率のばらつき10%以下でできることに成功した。最大回折効率は96%にもなり、さらに、この残りの非回折光波、もとの被回折光に含まれている、位相がずれているノイズ光が主成分であることも明らかになった。これらから、この高フラックス光学素子は、実際のレーザーシステムや、高強度レーザーを利用したレーザー加工やアブレーションシステムの最終段に用いることができ、大きなインパクトを持つことを実験的に実証することができた。

研究成果の概要（和文）

In this research, it is mainly to demonstrate the development and application of new optical elements for high energy flux lasers by utilizing efficient ultraviolet absorption of ozone molecules. It has been known that a large density wave can be generated in a neutral gas containing ozone, but the diffraction efficiency of the diffraction grating using it was still low, and the fluctuation of the diffract efficiency is not acceptable level. In addition, the generation mechanism of this density wave in mixed gas has a large uncertain. To develop practical diffractive optical elements having high efficiency, high stability, and high damage threshold, it has to be clarified with the fundamental physical process and it has to be demonstrated that diffraction efficiency higher than 90%.

In this study, we have developed multicolor probe lasers system to measure the spatial density profile of ozone and oxygen molecules with high temporal resolution. We have also developed fluid dynamics models to clarify the generation mechanism of this density waves in the ozone mixed gas, In addition, we improves the coherence of the writing laser for

generation of density wave and the surface precision of the optical element in the writing laser interferometer for generating periodic structure. Finally, we have succeeded in making >90% diffraction optical system with small variation of diffraction efficiency(10% or less). The maximum diffraction efficiency reached 96%. It was also revealed that the remaining undiffracted light wave is consisted with the noise light in the original diffracted light. From these, it can be experimentally verified that this high energy flux optical element can be used in the final stage of laser processing and ablation system using an actual laser system or high intensity laser.

1. 研究開始当初の背景

誕生から Laser は発展し、出力は何桁も増加し MJ, PW まで増加されてきた。しかし、使用される光学損傷強度は、その耐力がほぼ一定で、レーザーは大出力化にともない、大型化することが当たり前になっている。

現在までに、1m を超える光学素子が作られるようになってきたが、すでに1つの光学素子としては製造上の限界がきており、ビーム結合などの技術で多素子をパラレルに使用する方法が考えられている。

レーザーは 1 パルスのエネルギー、強度の増加だけでなく、高繰り返し化も進んでいる。光学損傷は、確率的な事象であるために、このような高繰り返しでは、わずかな光学損傷確率でも、光学素子の破壊が短時間で起きてしまう。そのため、固体光学素子では、nominal な光学損傷閾値に比べ、1/10 程度の強度で利用されている。

プラズマをベースとする transient element も開発され、プレパルス除去のプラズマミラーやビーム結合などに使用もしくは提案されているが、元来、プラズマ生成は非線形性を強く使用しており、また、使用するレーザーに比べ同等かそれ以上のエネルギーを使用しないと機能しないものもある。したがって、高機能で高耐力、高効率な過渡的光学素子の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

これらを解決するために、我々は従来の固体素子より耐力が 1~2 桁高く、その過渡的光学素子の生成も使用するレーザーの 4~5 桁小さいエネルギーで可能な全く新しい光学

素子を開発した。

3. 研究の方法

この開発した素子では、中性ガスの周期的な粗密を作ることで、回折させる素子である。一般に中性ガス分子の原子分極率は自由電子に比べ2けたほど小さく、例えば、1気圧のガスの光学屈折率は、真空のそれからわずか 10^{-4} しか差がない。したがって、中性ガスで回折光学素子を作るには、大きな密度揺動が必要であった。

deepUV に強い吸収を持つオゾン分子を混入させ、そこに、UV レーザーにより周期的なエネルギー付与の状態を作ると、中性ガス中に効率よくエネルギー付与ができる。深紫外の光子を吸収したオゾンは、原子状酸素と酸素分子に解離するが、1気圧の高圧下では、すぐに別の酸素分子と結合し、再びオゾン分子になる。このリサイクル反応のため、吸収された光子エネルギーが効率よくその近傍のガス分子の熱エネルギーに変換される。

初期に一樣密度のオゾンを含む中性ガス中に、周期温度構造を誘起することで、第2音波であるエントロピー波を励起できる。この時、ある程度長距離にわたり一定周期の波を励起すると、その密度揺動の振幅は 0-100% に近いほど大きくなる。

この大振幅の密度波を生成できたことで、中性ガス密度を等エントロピー的に圧縮、高密度化させることができ、そのために、中性ガスでありながら大きな屈折率空間変調を生むことが可能になった。

4. 研究成果

このときの回折効率の書き込みレーザー強度依存性を測定した。その結果、わずか $50\text{mJ}/\text{cm}^2$ で 95%にも及ぶ回折効率を実現できることが分かった。また、回折効率の時間変化は、書き込みレーザー照射後周期を音速程度で割った時間後に最大となり、それが数周期繰り返されることが分かった。これは、可逆過程で粗密が作られている1つの証拠であった。このため、圧縮、膨張に関し、エネルギー消費が起きておらず、効率よく粗密波が最大になっていくことも明らかになった。

このオゾン媒質のレーザー破壊閾値を計測した結果、6ナノ秒のレーザーで $1.7\text{kJ}/\text{cm}^2$ のけた違いに大きな強度でも使用できることが分かった。このため、制御用（書き込み）レーザーと被回折ビームとのエネルギー比は 4×10^4 もあることになり、 50mJ のレーザーで 1kJ のレーザーを制御することができることが証明された。この大きな差の理由は、書き込み光の波長で、被回折光の波長での値に比べ、オゾンはけた違いに大きな吸収係数を持つこと。中性ガスの粗密がオゾンの解離-再結合過程を利用した等エントロピー圧縮に近いものが実現できていること、などが理由となっている。

この回折光学素子は、過渡的に生成される素子のため、nominalな破壊限界までの使用

が可能である。また、書き込みビームの干渉計の条件を少し変えるだけで、被回折ビームの回折角を変化させたり、集光する回折波を生成させることができる。このため、高出力レーザーシステムのダウンサイジングだけでなく、高強度ビームの高速制御や、レーザー加工などの最終光学系の後に、レーザーアブレーションが起きる直前の強度でも偏向させることができるので、デブリ保護などに使用することができる。

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 8件)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

6. 研究組織

(1) 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

(4) 研究協力者

道根百合奈 (Michine Yurina)