

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600112

研究課題名(和文) オゾン励起状態を利用した高強度レーザー用回折光学素子の開発

研究課題名(英文) Development of UV excited ozone grating for ultra-high power lasers

研究代表者

米田 仁紀 (Yoneda, Hitoki)

電気通信大学・学内共同利用施設等・教授

研究者番号：00210790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の高強度レーザーシステムのために、現状の光学素子の損傷閾値を桁違いに上げた高強度光学素子を開発する目的で、オゾンガスを紫外線励起させた回折光学素子を提案、実証実験を行った。この素子では大気圧放電で生成したオゾンを、その吸収ピーク波長の紫外光レーザーで励起、空間的な屈折率分布( $n \sim 10^{-4}$ )をもたせることで回折光学機能を作る。この素子の破壊限界はナノ秒のレーザーに対し、 $1 \text{ kJ/cm}^2$ と通常の100倍程度高い耐力が得られた。また、オゾン密度、媒質長、入射角度を精密に調整した結果、回折0次光を極端に小さくできるパラメータが存在し、使用する+1次光の回折効率が、70%以上になることがわかった。

研究成果の概要(英文)：To develop high damage threshold optics for future high power laser system, we've proposed uv excited ozone diffraction optics. In this research, we clarified and demonstrated that (1) this damage threshold is about  $1 \text{ kJ/cm}^2$  for 6ns pulse laser, (2) more than 70% diffraction efficiency is achieved with precise control of initial ozone density and matching between incident angle and diffraction grating period. With these experimental results said that one order of magnitude smaller optical system will be available and only 1cm cross sectional optics can control 1kJ high power laser beam. That should be very active for future ultra-high power lasers.

研究分野：レーザー科学

キーワード：超高強度レーザー 光学素子 回折光学 光損傷閾値 UVレーザー

## 1. 研究開始当初の背景

① 超高出力レーザーシステムで使われる回折格子は、いまや 1m 以上のものが必要になってきており、その製作そのものの困難さだけでなく、大きくなることによる光学性能（回折格子の間隔の一樣性がメートル級の光学素子で保たれている必要がある。）の低下も問題になってきている。一方、レーザーの高出力化に対する期待は、研究発展を受けて大きくなってきている。これは、現在のペタワット ( $10^{15}\text{W}$ ) レーザーで行われている  $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$  程度の強度を 5 桁上の  $10^{26}\text{W}/\text{cm}^2$  以上にすることで、真空の絶縁破壊や真空の非線形光学と言った新たな段階に移ることが理論的な予測より明らかになってきているからである。しかし、現在建設中のレーザーでも、 $10^{18}\text{W}$  とまだ遠く、さらに高出力化に対する研究を進める必要がある。回折格子の光学損傷閾値を現状のままだと仮定すると、3 桁の高強度化は、30 倍以上の大きな回折格子が必要になる。すでにこのままでは製作できる範囲ではない。したがって、損傷閾値の高い光学素子を作らなければレーザーの高出力化も計画できない段階に来ている。これまで誘電体多層膜上に回折格子を切るなどして、光学損傷閾値をあげる努力はされてきたが、フェムト秒領域では大きな改善にはなっていない。また、プラズマを利用した回折格子も提案され、原理実証実験がされてはいるが、強い非線形性を必要としているために回折格子を作るためのレーザーパワーが被回折ビームより高いなどといった、実際の応用には至っていない。これらの方法では、気体中に 2 本のレーザーを交差させ干渉によりレーザーの強度の粗密を作り、イオン化された電子を屈折率変調の要素として使う方法である。そのため、イオン化に多光子過程を用いており、高い集光強度を必要としている。このことは、同時に生成されたプラズマが高い温度を持っていることになり、電子密度の粗密が消滅する時間も短い。また、大きさも、集光点でしかできないために、最大でも  $100\mu\text{m}$  直径  $\times 1\text{mm}$  程度に限られている。

以上の状況を考えると、高い光学損傷閾値を持ち、書き込み強度が低くても可能で、屈折率変調の寿命が長く、kJ レベルのレーザー仕様にまでスケールアップできる

もの、が必要になってくる。本研究では、その特性に合致したオゾン媒質を用いた紫外レーザー屈折率変調書き込み方法を用いることで、これらの要求をクリアする。このオゾンを使用するアイデアは、気体で高い吸収係数を持ち、回折させるレーザーには低い吸収を示す媒質を探索した結果、昔、KrF レーザーで超短パルスレーザーシステム開発をしていた際に、可飽和吸収が期待されたオゾンがその要求にあっていると考えた次第である。オゾンの吸収係数データによれば、 $250\text{nm}$  の紫外光と使用する近赤外光とで 5 桁も違うことが示されている。

## 2. 研究の目的

超短パルス超高出力レーザーは、いまやエクサワット ( $10^{18}\text{W}$ ) に向けて開発が進みつつある。この中で基盤となる技術はチャープパルス増幅であり、増幅器内で周波数チャープされたナノ秒程度のパルスを増幅し、増幅後に圧縮するものである。この圧縮には回折格子が使われるが、その光学損傷閾値が弱いことが、現在光学素子の大型化を招き、また、大型かつ高精度な回折格子開発そのものももっとも厳しい開発項目になっている。本提案では放電生成されたオゾンガス中に紫外レーザーで過渡的な屈折率空間変調を作り、それを高出力レーザーの分散デバイスとする技術を開発することを目的としている。現在使われている誘電体コーティング回折格子の 2 桁以上の強度で使用できる素子を実現させ、最終圧縮光学系の  $1/10$  以上のスケールダウンを目標にする。

## 3. 研究の方法

上で述べた超高出力レーザーに適用可能な回折光学素子開発のためには、以下のことを明らかに、もしくは、達成させる。

- $\text{kJ}/\text{cm}^2$  のレーザー強度で使用可能な過渡的グレーティングの条件を決定する。
- チャープパルス圧縮が可能な不等間隔グレーティングを精度よく作成する方法を確立する。
- $10\text{fs}$  パルスに対応した周波数幅内で十分な回折効率ができることを実証する。
- 圧縮されたパルスによる媒質内の最大使用強度とその制限要因を明らかにする。
- ナノ秒パルスを圧縮するために  $15\text{cm}$  程度の長さのグレーティングを真空挿内に形成させる技術を確立する。
- $\text{kJ}$  レーザー制御に向けて必要となる断面

積、素子形成に必要なエネルギーを明らかにする。

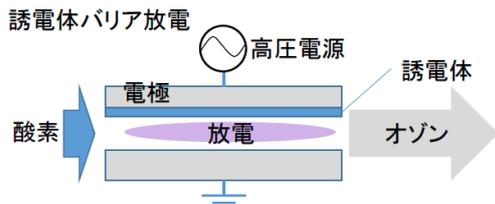


Fig. 1 オゾン発生法

#### 4. 研究成果

次世代の高強度レーザーシステムでは、現状の光学素子の損傷閾値から考えると、大型化が余儀なくされる。しかし、素子によっては技術的に大型化が難しいものもあり、ビーム分割光学系を使わざるを得ない状況にある。もし、桁違いに高強度で使用可能な光学素子ができれば、これら状況を大きく変えることも可能で、この研究では、オゾン励起状態を利用した回折光学素子を提案、実証実験を通して研究を行っている。

この素子では大気圧放電 (Fig. 1) で生成したオゾン媒質を、その吸収ピーク波長に合わせたレーザーで空間的な変調をつけて励起、照射部で屈折率が変化する ( $\Delta n \sim 10^{-4}$ ) ことを利用して体積ホログラムのような形で回折光学機能を作る。(Fig. 2) この素子の破壊限界を、6nsの532nmレーザーに対し調べたところ、およそ  $1 \text{ kJ/cm}^2$  となり通常の光学素子の100倍程度高い耐力が得られることがわかった。

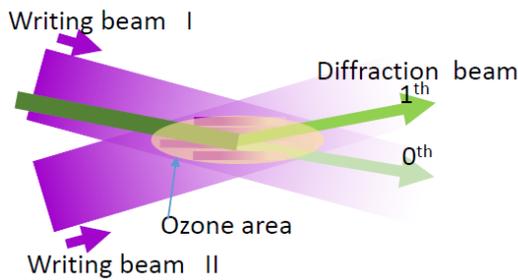


Fig. 2 オゾンへの屈折率空間変調の書き込み法

この素子を実際のレーザーシステムに組み込むためには、高効率な回折効率を達成する必要があった。特に、紫外光で書き込むという方法で、通常の回折格子程度の回折が得られるのか、十分低い書き込みエネルギーでこの回折素子を生成できるかなど、動作原理を詳細に理解し、最適条件を見つけていく必要があった。

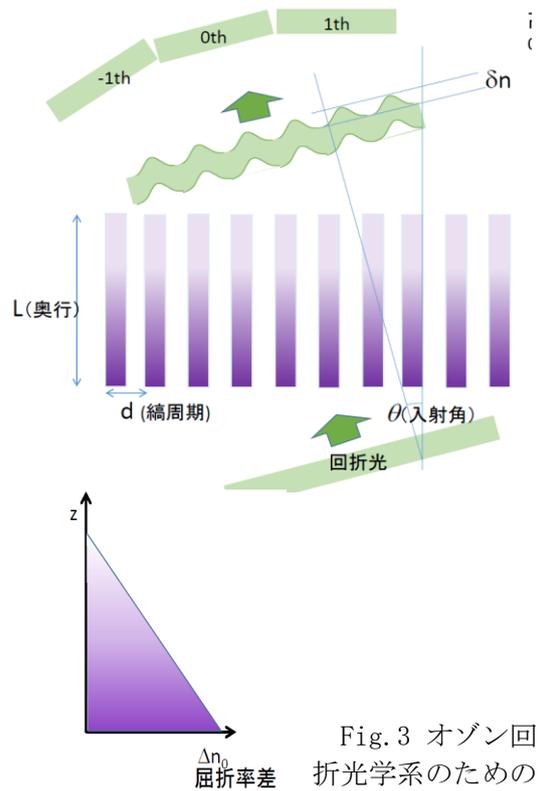


Fig. 3 オゾン回折光学系のための数値計算モデル

この研究では、この素子内で非回折ビームである0次光の強度をいかに抑えるかを、計算機シミュレーションにより導出し

(Fig. 3)、確かにオゾン密度、媒質長、入射角度を精密に調整できれば、0次光を極端に小さくできるパラメータが存在できることがわかった。(Fig. 4) この結果をもとに、実際の光学素子を構成させ、Fig. 5で示されている+1次光の回折効率60%以上を達成できることが分かった。このとき、回折効率のバラつきはあるものの、最大の回折効率は70%に達している。

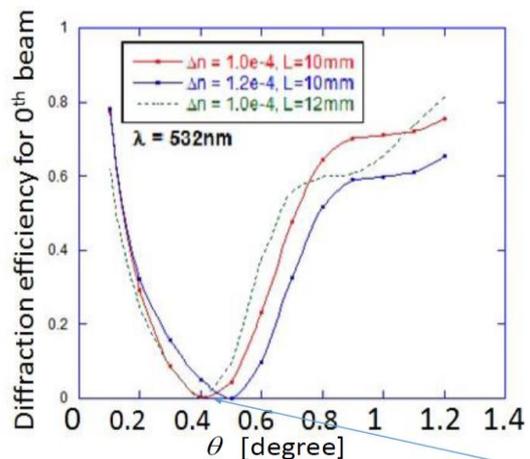


Fig. 4 オゾン回折格子光学系の0次光強度のパラメータ依存性

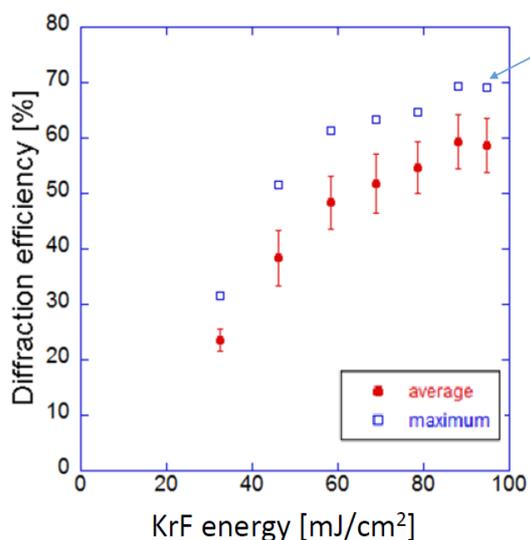


Fig. 5 オゾン回折光学素子の回折効率の書き込み光エネルギー密度依存性赤点の実験平均値を青口はその条件での最高回折効率を示している。

このオゾン媒質は、超高強度レーザー使用を目指して窓なし条件で行っている。このため、生成されたオゾンガスは自由空間に噴出させた形になっている。一般にこのような自由空間へガス放出では、そのレイノルズ数に応じて層流から乱流に発展する。境界面の内ガス流路を作ったために、この研究で用いられているオゾン媒質でも Fig. 6に示されるような、乱流状態にあることがわかった。(シャドウグラフ解析によ

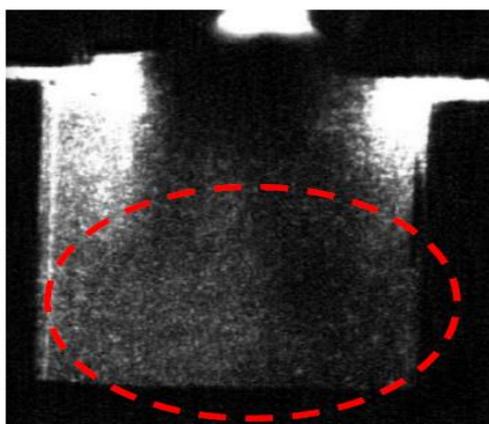
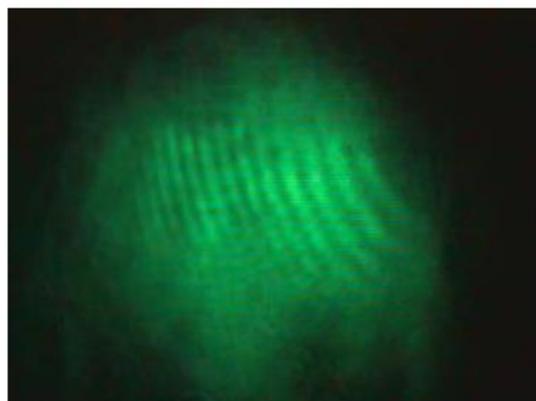


Fig.6 オゾン噴出部の紫外線レーザーによるシャドウグラフ測定の結果。吹き出し口(上部)から出てきた後に乱流が発生している状況がわかる。この時のレイノルズ数は1000程度になっていた。

る) さらに高い性能を安定に出させるためには、この乱流の制御が必須となるが、適度な流速をあたえ、乱流を逆にAPD放電部が形成するノズル形状から離れた地点で十分に発達させてしまうことで、逆に光学波面としてはスムーズなものが得られることがわかった。実際に、回折された光の波面計測を行った結果がFig. 7である。この干渉縞は波面の様子を表わしているが、ショットごとの波面揺らぎは少なく、良好であることがわかった。



## 回折ビームの波面測定

Fig. 7 回折されたビームの波面計測で撮られた干渉縞像

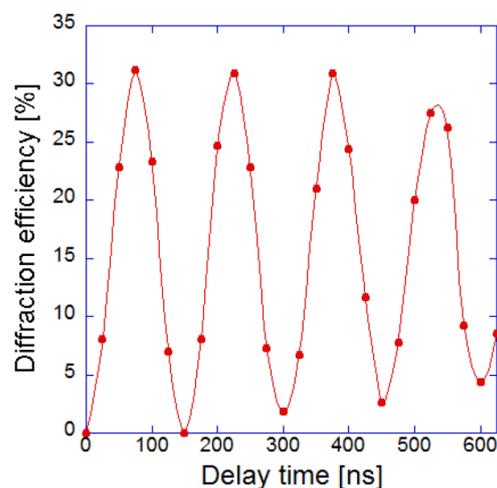


Fig. 8 回折ビームと書き込みビームの時間ずれによる回折効率の変化

一方、Fig. 5に現れている、回折効率のばらつきには、空間的に変調させた屈折率揺動の強度揺らぎが影響している。この研究では、書き込みレーザーとしてKrFエキシマレーザーを用いているが、その波面強度の一様性は、 $1/4\mu\text{m}$ という短波長性のために、わずかな光学素子の波面誤差からも回折波

が生じてしまい、空間一様性がAPD部でとりにくい状況であった。ただし、このレーザーは原理的に飽和フルエンスが小さく ( $2\text{mJ}/\text{cm}^2$ )、発振器直後の光強度一様性は、高いことが知られている。そのため、発振器出力光イメージを空間フィルターを利用した像転送光学系によりAPD上部に像転送する光学系を設置した。さらに回折格子生成のための書き込みレーザーと、回折させるレーザーとの時間タイミングを精密に同期させた (Fig. 8の様になる) 結果、現在では最大75%を超える回折光学素子実証することができた。

これらの結果を受け、国内の学会で発表を行ったが、桁違いに効率のよい、しかも2ケタ違い光強度破壊しきい値が実現されていることに対し、驚きを持って受け入れられている。この素子は将来の超高出力レーザーシステムに対し、大きな貢献ができることがわかった。

#### 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 4 件) 国内学会 2 件、国際会議 2 件

(1) Y. Michine, H. Yoneda, The development of optical switch of high intensity lasers with plasma grating, Plasma2014, 2014.11.18, Niigata, Japan

(2) 道根百合奈, 米田仁紀, 紫外線励起オゾンガス中の屈折率の空間変調について, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015. 3. 21, 早稲田、東京

(3) Y. Michine, H. Yoneda, The Development of Ozone Grating for High Intensity Lasers, The 4th Advanced Lasers and Photon Sources, 2015.4.24, Yokohama, Japan

(4) 道根百合奈, 米田仁紀, 紫外光励起オゾン回折光学素子の非平衡性が及ぼす役割, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015. 9. 17 大阪

[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 (Yoneda, Hitoki)

電気通信大学・学内共同利用施設等・教授

研究者番号 : 00210790