

高強度オゾンプラズマグレーティングの開発

1013131 野間澄人

指導教員：米田仁紀

1.背景

近年、超高強度レーザーの開発が行われており、ペタワット(10¹⁵ワット)級の出力を出せるレーザーも数多くの国で開発されるようになった。そして、エクサワット(10¹⁸ワット)というさらに高出力レーザーを目指したとき、その開発には、従来の光学素子で取り扱える強度より桁違いに大きな強度の光を扱え得る光学素子開発が必須となっている。特にパルス圧縮部で使用される回折格子などの光学素子は、原理的に通常のミラーよりレーザー耐力が1桁以上小さくなっておりこれまでは大型化で解決を図っていたが次世代のレーザーでは、製作の限界を超えると考えられる。そこで、本研究では、プラズマを媒質とした桁違いに高強度光を取り扱える回折光学格子の開発を目的に研究を行った。

2.原理

2.1 高強度パルスレーザー

パルス幅がとて短く、ピーク値が高いレーザーを超短パルスレーザーと呼び、様々な研究やまた産業にも広く使われている。現在、超短パルスレーザーについて様々な研究、開発が進められているが、この超短パルスレーザーの発展には1985年にMourouらによって開発されたチャープパルス増幅技術が必要不可欠であった。⁽¹⁾チャープパルス増幅とは、高ピークを得るための増幅をするときに自己収束による増幅素子の損傷を回避するために開発された方法である。チャープパルス増幅の概念図を図2.1⁽²⁾に示す。チャープパルス増幅は図2.1にあるように、パルス伸長器とパルス増幅器とパルス圧縮機によって構成される。パルス伸長器の目的は、パルスのパワーのピーク値を落とすためであり、分散媒質に光を入射することにより、波長による伝番の差が表れ、パルス幅が広がる。そして、増幅器が損傷しない程度以下にパワーが落ち、幅が広がったパルスを増幅器で増幅し、増幅されたパルスをパルス圧縮器の中で、分散媒質に波長による伝番の差なくすように作用させて圧縮する。このようにして、短いパルス幅で高ピークパワーを得ることができる。超短パルス光は時間領域幅が狭い代わりに、周波数領域では幅の広い光であり、これらの関係はフーリエ変換限界によって決まる。このようなフーリエ限界のパルスに対して、中心周波数からのずれ $\Delta\omega$ に対する二次の分散 ϕ_0 を与えるとフーリエ合成における相対位相差は、

$$\varphi(\Delta\omega) = \frac{1}{2}\phi_0(\Delta\omega)^2 \dots\dots(1)$$

となり時間領域におけるパルス幅が伸長する。この与えられた分散に対してパルス圧縮器で逆の分散をかけてやれば元のパルス幅に戻るようになる。

分散を与え、パルスを伸長、圧縮させる素子としては、角度により光路差を与えるものと伝番方向の構造周期によって光路差を与えるものがあり、代表的な例として、回折格子とファイバグレーティングを示す。回折格子は生産性は高いものの、光が強くなればそれだけ面積の大きなものが必要となり損傷閾値に限度がある。また、ファイバグレーティングのほうも、小型の圧縮装置として使うことができるが、高強度の光の場合ファイバの媒質により非線形効果が起こり吸収や変形損傷が起きる問題がある。

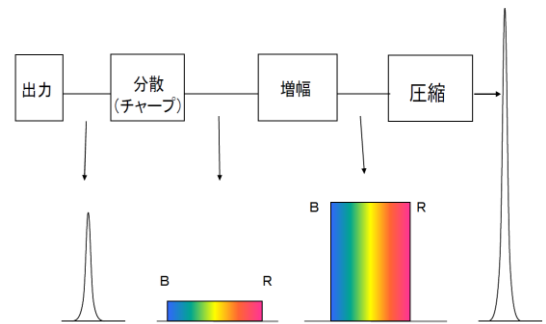


図2.1 チャープパルス増幅の概念図⁽²⁾

2.2 プラズマグレーティング

チャープパルス増幅における伸長、圧縮は分散機能素子を使用しパルスを伸長、圧縮する。一般に分散機能素子としては、固体の回折格子やプリズム、ファイバー内にレーザーで屈折率変調を書き込んだファイバグレーティングなどがある。本研究では、超高強度レーザーで用いられるチャープパルス増幅器の伸長、圧縮の部分の大幅な小型化を狙い、プラズマを用いて、桁違いに大きな強度で同一機能を果たす分散素子を考える。本研究では、ファイバグレーティングのような周期構造を気体にプラズマで与えることにより、分散素子として働くプラズマグレーティングの開発を目指す。図2.2に示すような屈折率周期構造体において1次元モード結合理論を用いて反射率を評価できる。⁽³⁾

また、誘電体多層膜ミラーと同じ原理であると考え、簡易に

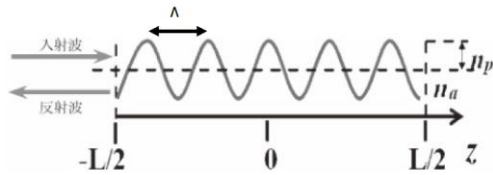


図2.2 屈折率1次元周期構造

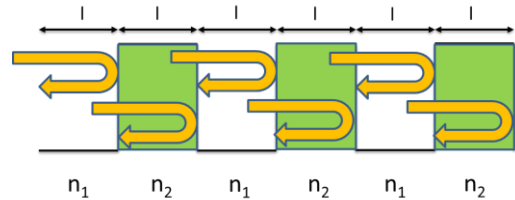


図2.3 屈折率周期変調構造

図 2.4 のように屈折率 n_1 と n_2 からなる周期 $2l$ (反射する光の波長 (ブラッグ波長) $\lambda_B = 2m/l$, m は有効屈折率) の構造体を考え、それぞれの位置の境界における屈折率差から起こる反射の重ね合わせから反射率 n を求めることもできる。実際に計算をして求めてみると、

$$n = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} + \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} e^{-i2Ln_2/\lambda} + \dots \quad \dots \dots \dots (2)$$

となり、ここからも計算することができる。

プラズマグレーティングを作る際、今回の実験において不等間隔にしなければならない。レーザーで気体をプラズマ化することは述べたが、具体的には述べていないので、ここで述べておく。

Kr-F エキシマレーザーで干渉縞を作りそれを、それをオゾンに照射すると光のあたる部分のみが光のエネルギーをプラズマ化し、干渉縞の形にプラズマの層ができ、当たらないところはオゾンの層ができる。ただ、普通の干渉縞であると、プラズマとプラズマの間隔は同じであり、単一の波長は反射しても、パルスを伸長、圧縮することはできない。そこで、今回の実験では、レーザーの光で干渉縞を作る前に、プリズムでレーザー光を分光してやり、ビーム径の端と端で光の進む角度を少し変え、また、端から端まで波長がグラデーションで変化するようにする。そうすることで、干渉縞を作ったときに干渉縞の間隔が等間隔にならないようにした。

最後に、プラズマグレーティングの概念図も載せておく。

3.書き込み系の製作

3.1 プリズムのセッティング

前章において、不等間隔の干渉縞を作る際レーザー光を分光すると述べた。今回の実験ではプリズムを使用して分光した。分光するといっても、レーザーの光であり、コヒーレントは非常に高く、波長幅は非常に狭い。そのため、グレーティングに十分なビーム径を得ようとすると、ビーム径まで広げるのに長距離光を飛ばさなければいけなくなる。そこで、光を効率よく分散させる角度において、できるだけ多くのプリズムを並べるこ

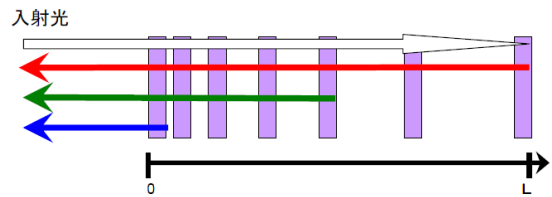


図2.4 プラズマグレーティングの概念図

とにした。そのために、プリズムのそれぞれの屈折率を調べ、どのような配置になるか屈折の法則から計算した。また、そのプリズム群を光が通った時どのように分光するかをシミュレーションした。また、高強度の Kr-F エキシマレーザーを使うのでプリズムは、高強度にも耐え得る合成石英 (Fused silica) を使用した。

その後、実際にシミュレーションした通りに、実際にエキシマレーザーの光を入射した。この時、入射する角度が少しでもずれると、プリズムを多く使ったために強度の効率が極端に悪くなるので、プリズムからプラズマグレーティングを作るのに十分な強さの光が出射するまで、何度もセッティングしなおした。

3.2 干渉縞の作製

プリズムの列を通りフォーカスレンズを通過した光にビームスプリッターを使い2つに分ける。今回使うレーザーは、連続光ではなくパルスであるので2つに分けた光の光路の長さは同じでないと干渉しない。つまり、分けた光路のそれぞれの長さを同じにし、片方の光路は可変させられるようにし、マッハチェンダー干渉計を組み、光路を調整することで2光線を干渉させて干渉縞を発生させた。そして、それをレンズの焦点距離となる位置でガラスに映し CCD で読み取った。

また、位置により波長ごとに分光されているから、BS1~BS2 の間のそれぞれの光に使われるミラーの数は、偶数または奇数に合わせられてなければいけないので、本実験では1枚と3枚にして奇数に統一した。

更にこの時 M3、M4 を乗せた X 軸ステージをずらし、それぞれの時のビジビリティを測り、それによりこの光の過干渉距離も調べた。

3.3 干渉縞の作製の結果

図 3.2 の干渉計において図 3.3 の干渉縞を測定することができた。

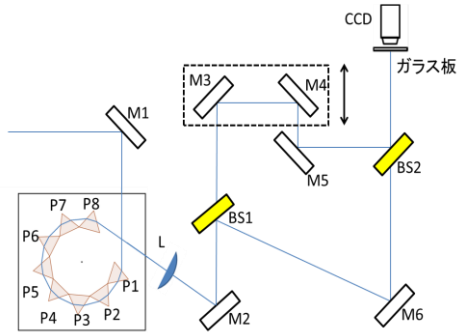


図 3.2 干渉計

M1,M2,M3,M4,M5,M6 ; 248nm 高反射率ミラー、BS1,BS2 ; ビームスプリッター、L ; フォーカスレンズ、P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 ; 合成石英

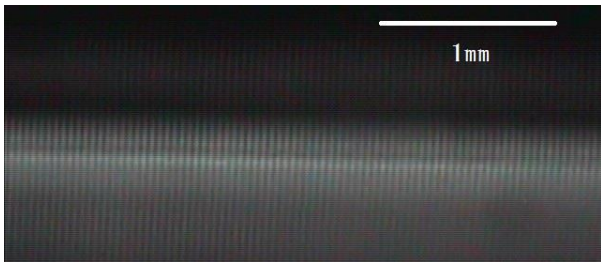


図 3.3 干渉縞

図 4.12 のピークを数えると 80 個の山があり、それはつまり図 4.9 の干渉縞において 80 本の干渉縞があるということである。今、1mm あたりの画像上のピクセル数は 189 個でありこの画像は横幅のピクセル数は 480 個であるから、

$$640 \div 189 \div 80 = 0.0423 \dots$$

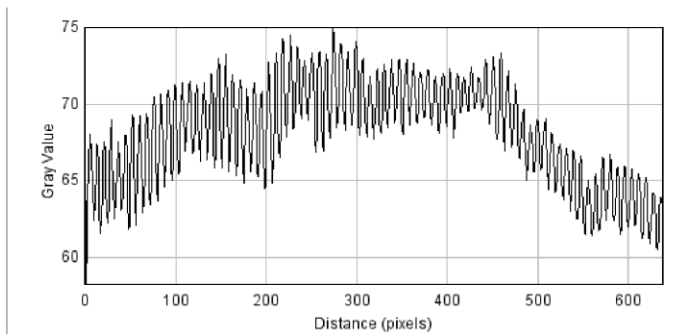


図 3.4 図 3.3 の画像解析結果

となり一つの干渉縞の間の幅は $42.3 \mu\text{m}$ となる。また、プラズマグレーティング全体の横方向のピクセル数は、2184 ピクセルで、

$$2184 \div 189 = 11.56 \dots$$

11.56mm となった。

また、中心と端で干渉縞の間隔は 4% の違いがあり不等間隔の干渉縞ができていることが確認できた。

4. パルスオゾンプラズマ装置

4.1 パルスオゾンプラズマ装置の作製

現在、高強度のチャープパルス増幅法は真空中で行われる。これは、光が強いため空気中だと散乱が起こりピーク値が落ちるためである。そこで、こちらが意図したときにオゾンを出現させる装置をつくった。こちらから、酸素を入れ、市販のオゾナイザを通して、オゾン濃度を高める。そして、オゾンストレージ部でオゾンのため、ここでインバーター回路を用いて誘電体バリア放電を起こさせ、オゾン濃度を高めた。そして、圧力を高めバルブのスイッチが入るとオゾンが発射する。そして、コイルとパルスジェネレータを使いスイッチ回路に電流が流れるとほぼ同時の任意の時間にレーザーの trigger が引かれるようにした。

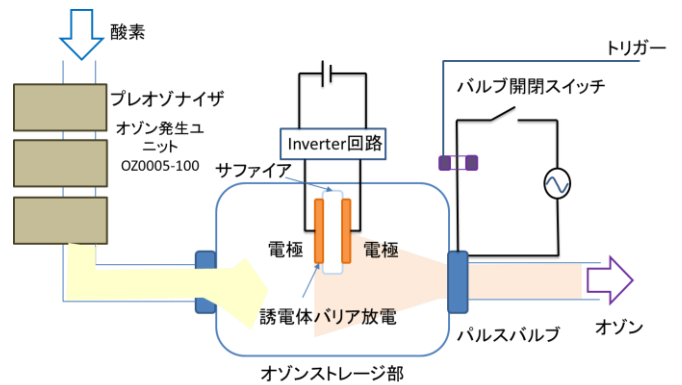


図 4.1 パルスオゾンプラズマターゲット装置

4.2 パルスオゾンプラズマの分布観測

発射されたオゾンの分布観測をした。バルブが開き、オゾンが出てくると設定したディレイで K r f レーザーを出射し、ガラスに、光を白く発光させてその像を CCD でとった。もし、そこに、オゾンがあればレーザーの光を吸収しガラスまで届かず光らない。しかし、そこになければ、ガラスは光るので、その比をとって分布を観測した。

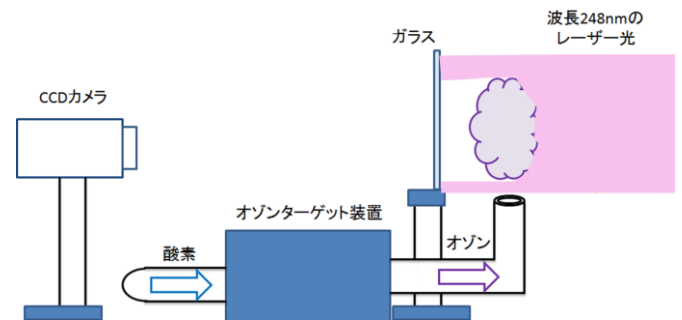


図 4.2 オゾンプラズマに対する照射実験

4.3 パルスオゾンプラズマの分布観測の結果

結果は図 4.3 のようになり、吹き出したオゾンのプラズマの形がはっきりとわかった。オゾンを発射させない時の Kr-F レーザによるガラスの発光(入力光)の強さを I_0 、発射させた時のガラスの発光(出力光)の強さを I_1 、として I_0/I_1 を取ると次の図 4.4 ようになりより形が分かった。また、バルブを開く瞬間のオゾンストレージ部の圧力に形が依存することがわかった。また、バルブを開くタイミングや、バルブが開いている時間にも依存することがわかった。

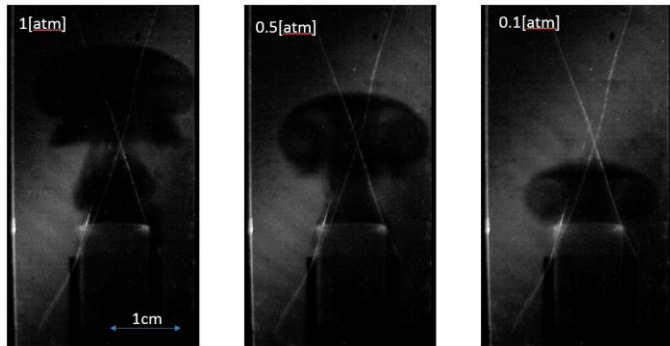


図4.3 気圧差によるオゾンプラズマの形の違い

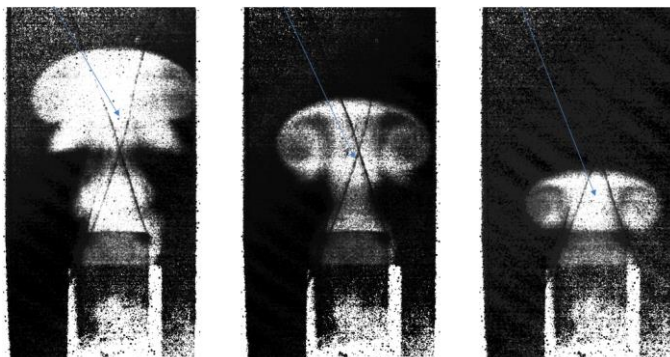


図4.4 図4.3の I_0/I_1 の画像

また、図 4.5 の黄色で囲んだところの値を取ると図 4.6 のようになり、オゾンプラズマで囲まれたところは入力光に対し出力光は平均で $1/190$ となった。

光の吸収反応の入出力比は、 $I = I_0 e^{-\alpha L}$ (α は、吸収係数)で表され、 $L = 1.60[\text{cm}]$ 、 $\log \frac{I_0}{I} = 5.25$ より、

$$\alpha = \frac{1}{L} \log \frac{I_0}{I} = \frac{1}{1.60} \times 5.25 = 3.290$$

また、 α は吸収断面積 σ とオゾン分子密度 N によって、 $\alpha = N\sigma$ ($\sigma = 1 \times 10^{-17}$)と表されるのでオゾン分子密度は、

$$N = \frac{\alpha}{\sigma} = 3.29 \times 10^{17} [\text{個}/\text{cm}^3]$$

であることがわかった。

5.まとめと今後の展望

本実験では、広帯域紫外光を利用した不等間隔プラズマ回折格



図4.5 解析したオゾンプラズマ

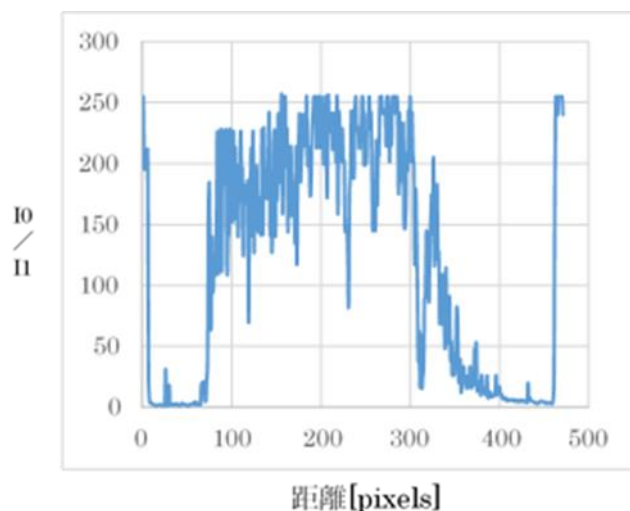


図4.6 解析した入出力比

子用書き込み光学系を製作、特性を評価し、パルス動作可能なオゾンターゲットを作成した。

今後の展望としては、干渉縞のビジビリティーの改善、パルス動作時のオゾン媒質の最適条件の発見をした後、紫外光によるオゾンレーティングを書き込み評価する。

6.参考文献

- (1) D. Strickland and Mourou. Opt. Commun. 56, 219 (1985)
- (2) 修士論文 上松弘明 米田仁紀研究室 電気通信大学 (2008)
- (3) Kondou Kiminori and Kodama Ryosuke 'Generation of Periodic Structure Plasmas and Its Application to Control of Laser Light' J. Plasma Fusion Res. Vol.84, No.4 (2008) 199-203