

# 超高エネルギー・パルスレーザーの出力を 倍増させる多層膜誘電体グレーティング

Bruno Touzet

## 要旨

世界中でチャープパルス増幅法 (CPA) を使った 超高エネルギー・パルスレーザーの研究開発が進められている。高エネルギー化達成のために、パルスコンプレッサに使われるグレーティングの効率アップと損傷が発生する閾値レベルを高めることが求められている。ジョバンイボン社 (JY) では、従来から金コーティングしたグレーティングを製作してきたが、更なる高性能化を狙って、イオンエッチング法による新しい多層膜誘電体 (MLD) グレーティングを開発した。本稿では、試作したMLDグレーティングの構造、製作方法及び CPA への実装評価結果を紹介する。この結果、ワンパスあたり 96% の効率を持っており、従来の金コーティンググレーティングに比べ損傷に対する閾値レベルが2倍も高いことを確認した。

## はじめに

現在、フェムト秒 ( $10^{-15}$  s) やピコ秒 ( $10^{-12}$  s) の高エネルギー・パルスレーザーを得るためには、チャープパルス増幅法 (Chirped Pulse Amplification: CPA) が使われている<sup>(1)(4)</sup>。日本では大阪大学や日本原子力研究所 (JALE)、アメリカではRochester大学やLawrence Livermore 研究所 (LLNL)、イギリスではAWE (Atomic Weapons Establishment) やRutherford Appleton研究所 (RAL)、ドイツではIena大学や重イオン研究所 (GSI)、フランスでは原子力委員会 (CEA) とLULI研究所など、世界中の先端研究機関が本法を用いた重要なプロジェクトを進めている。これらのレーザーパルスの圧縮過程ではグレーティングが重要なコンポーネントで、通常2枚のグレーティングが反射型で使われている。図1に2つのグレーティングペアを使ったチャープパルス増幅法の動作原理を示す。高エネルギー化のために、高効率で大きなグレーティングが求められているが、そこで最も大きな制約条件になっているのがレーザーによるグレーティングの損傷である。

従来、 $1.053 \mu\text{m}$ あるいは800 nm付近で動作するグレーティングは、最高の反射率を得るために金でコーティングされていた。損傷閾値は、金コーティングが損傷を受け始める時のエネルギー・レベルである。

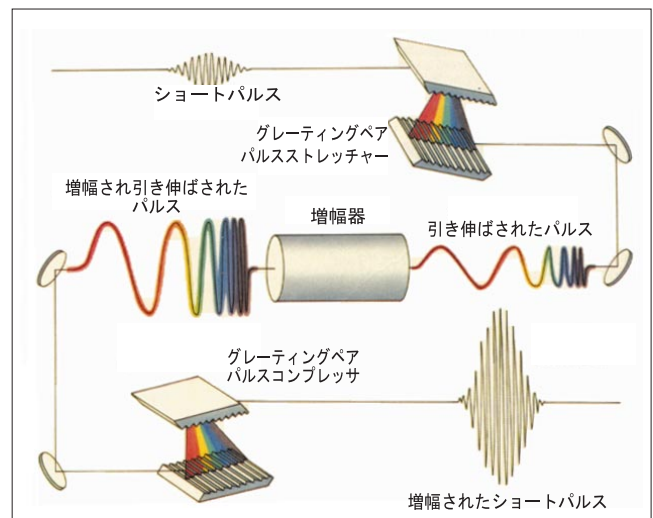


図1 2つのグレーティングペアを用いたチャープパルス増幅法の動作原理

ジョバンイボン社 (JY) では、現在、最大600 mmのパルスコンプレッサの大型金コーティンググレーティングを製作できる体制を整えている\*1。一方では、金コーティングの限界をクリアするために、高い損傷閾値を有する多層膜誘電体コーティングの内側に回折溝を刻み込むという新しい技術を開発した<sup>(5)</sup>。

\*1 JYは、最大直径600 mmのグレーティング用ホログラフィック記録が可能な装置を開発し、クリーンルームに設置している。更に、大口径グレーティングの効率分布測定が可能な走査型の効率試験器 (走査ステップ  $3.5 \times 20 \text{ mm}^2$ , 走査面積  $420 \times 480 \text{ mm}^2$ ) を製作した。波面精度を試験するための干渉計と溝形状を検査するためのAFM顕微鏡も有している。

以下に 従来からの金コーティンググレーティング  
及び 新しい多層膜誘電体 (Multi Layer Dielectric : MLD)  
グレーティングの概要と特性 ,そしてMLDグレー  
ティングのCPAへの実装評価結果などを紹介する。

## 2 金コーティングによる ホログラ フィックグレーティング

CPA法が開発された当初(1986年) から 金コーテ  
ィングされた正弦波構造のホログラフィックグレー  
ティングを使うと 極めて効率の高いTM偏光が得ら  
れることが実証されていた。これと関連し ,JYでは ,フ  
ランスの“ Laboratoire d 'Optique Electromagnetique ”の  
Neviere教授と共同研究で行った計算の結果 ,1.053  $\mu\text{m}$   
のレーザ光の効率を最適化するためには溝の密度が  
1 mmあたり1740本が適当であるという結論を得た。  
現在 ,TM偏光の絶対効率は98 %に達している。その  
後 ,1480 本/mm及び1200 本/mmのCPA用グレー  
ティングでも同様の効率を持つものが製作されている。

1.053  $\mu\text{m}$ のレーザ用に最適化された溝密度1740本/mm ,  
直径400mmのグレーティングの外観を図2に 効率の面内  
分布(実測値)を図3に 効率の波長特性(計算値)を図4  
に ,そして正弦波形溝構造を図5にそれぞれ示す。

実測効率は理論値とよく一致しており ,また効率は  
グレーティング全体に渡って均一であることがわか  
る。ここでは  $\lambda/6$ の波面精度が測定された。CEAと  
LULI研究所での実験によると 金コーティンググレー  
ティングの損傷閾値の代表値は ,ナノ秒系で2 J/cm<sup>2</sup> ,ピ  
コ秒系で1 J/cm<sup>2</sup>であった。



図2 1.053  $\mu\text{m}$ レーザ用グレーティング(金コーティンググレー  
ティング溝密度:1740本/mm ,ブレース波長(最大効率波長):  
1.053  $\mu\text{m}$  ,直径420 mm)

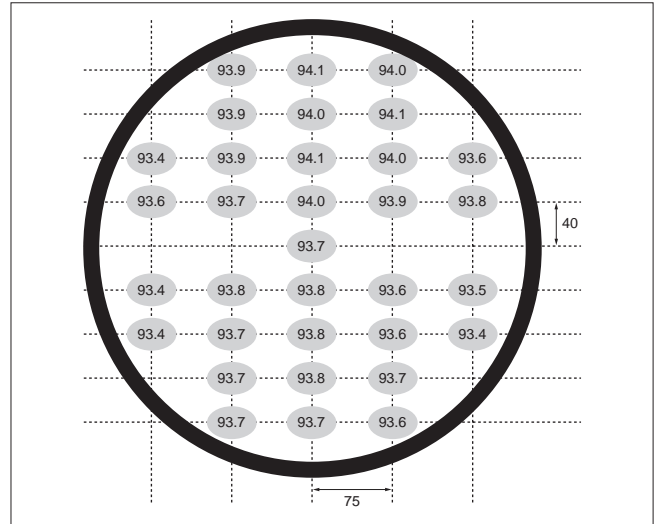


図3 1.053  $\mu\text{m}$ レーザ用グレーティングの効率の面内分布  
(実測値)

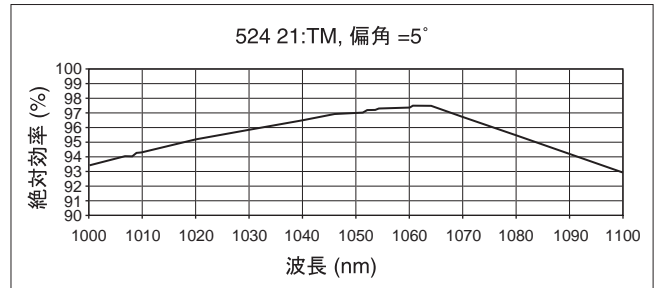


図4 正弦波形溝のホログラフィック金コーティンググレーティ  
ングの効率の波長特性(計算値)

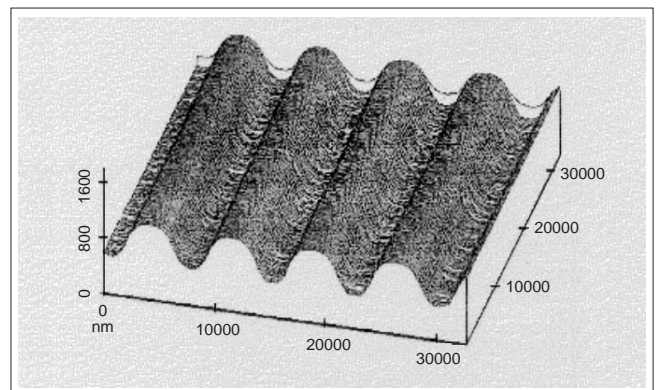


図5 ホログラフィックグレーティングの正弦波形溝構造

### 3 多層膜誘電体(MLD)による新型グレーティング

我々は最初に、高いレーザー損傷閾値を有するMLDの上に、イオンエッチング法により細かい溝を刻むという新しいタイプのグレーティング(MLDグレーティング)について理論的な考察を行った。この結果、高屈折率層と低屈折率層の酸化物交互層を使って、100%の効率を持つさまざまな多層膜構成が見い出された。そして、その上に台形の溝を刻み込む方法を選んだ。

イオンエッチング法で作成したのMLDグレーティングの構造を図6に、製作方法を図7に示す。

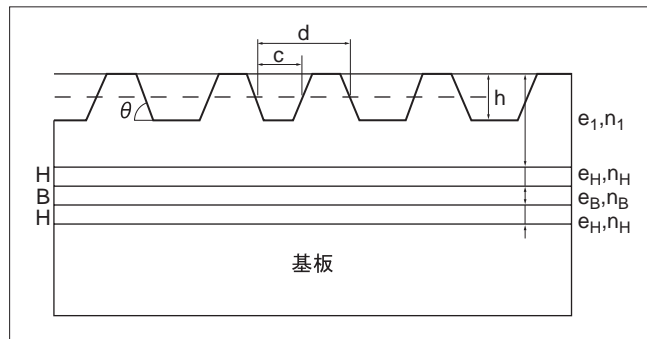


図6 MLDグレーティングの構造模式図  
(基板上に多層誘電体反射層を形成。他層より厚い最上層をイオンエッチングする。)

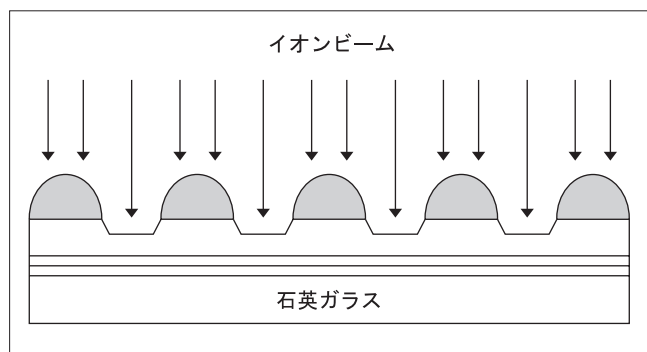


図7 MLDグレーティングの製作方法  
(ホログラフィの干渉縞を誘電体の上に記録し、その後イオンエッチングで溝を掘る。)

溝密度、波長、屈折率の高低などによって光学特性が決まるこの種のグレーティングの場合、最適構成は、上側層の厚さ $e_1$ 、溝の深さ $h$ (または $h/d$ 、ここで $d$ は周期)、及び溝の半値幅 $c$ (または $c/d$ )によって明確に規定される。TE偏光に対して高効率のグレーティングはこのようにして得られた。

いくつかサンプルを試作し、評価した結果、実際にレーザー圧縮装置の中で使うことができるグレーティングとして、低屈折率層を上層とする構造を選んだ。サンプルの損傷加速テストはLULIで行った<sup>[6]</sup>。100  $\mu\text{m}$ に絞ったレーザービームを用いて、ワンショット測定と繰り返し測定の両方を実施した。なお、ワンショット測定(フェムト秒系)では、損傷閾値 $2.5 \text{ J/cm}^2$ という値が得られた。

### 4 MLDグレーティングの仕様

#### 4.1 最初に試作したMLDグレーティングペア

初めて試作したMLDグレーティングは次のような仕様のものである。

- ・ 溝の密度: 1740 本/mm
- ・ 1056 nmでの効率: 最高100%
- ・ 入射角:  $72.25^\circ$
- ・ 多層誘電体コーティングの層数: 20 層
- ・  $\text{SiO}_2$  最上層寸法:  $120 \times 140 \text{ mm}^2$

本MLDグレーティングの入射角に対する効率(理論値)を図8に、効率の波長特性(理論値及び実測値)を図9に示す。

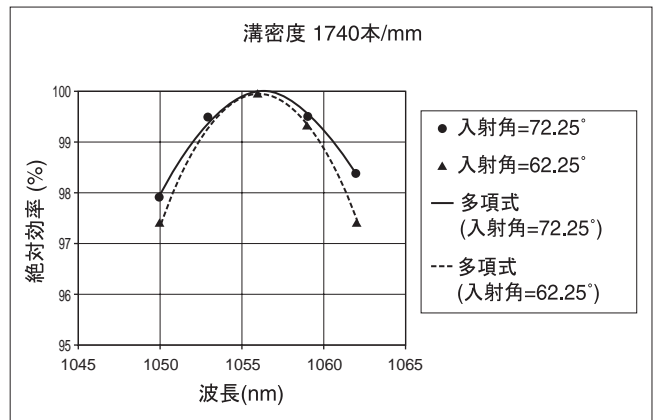


図8 誘電体グレーティングの入射角に対する効率の理論値

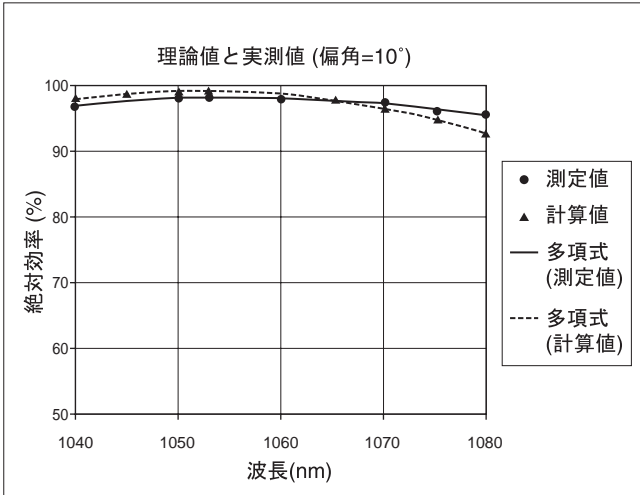


図9 試作MLDグレーティング(120 × 140 mm)の効率 (理論値と実測値, 偏角 10°)

上記のような仕様のMLDグレーティングペアは、ピークで98%、平均で96%と理論値の100%に近い効率が得られた。波面精度は予想通り 1/6であった。

このグレーティングをLULIのレーザ圧縮装置<sup>(7)</sup>に組み込んだ結果、ビームサイズを90 mmから18 mmに絞ることに成功した。図10にサンプルの評価用計測系を示す。

入力エネルギーはコンプレッサ・ユニットの入口側で測定される。第二のグレーティングの表面(ここで強度が最大となる)はCCDカメラで撮影される。エネルギー密度の最大値と平均値の比、つまりビーム・プロファイルは1.20であった。

2次自己相関計によって出力部におけるパルス持続時間を測定した。レーザビーム全体の効率を把握するために出力エネルギーを測定した。

損傷の有無は計数カメラを用いて目視検査した。計数カメラの画像からはグレーティング上の1 mm以上の微小な損傷を判定することができる。

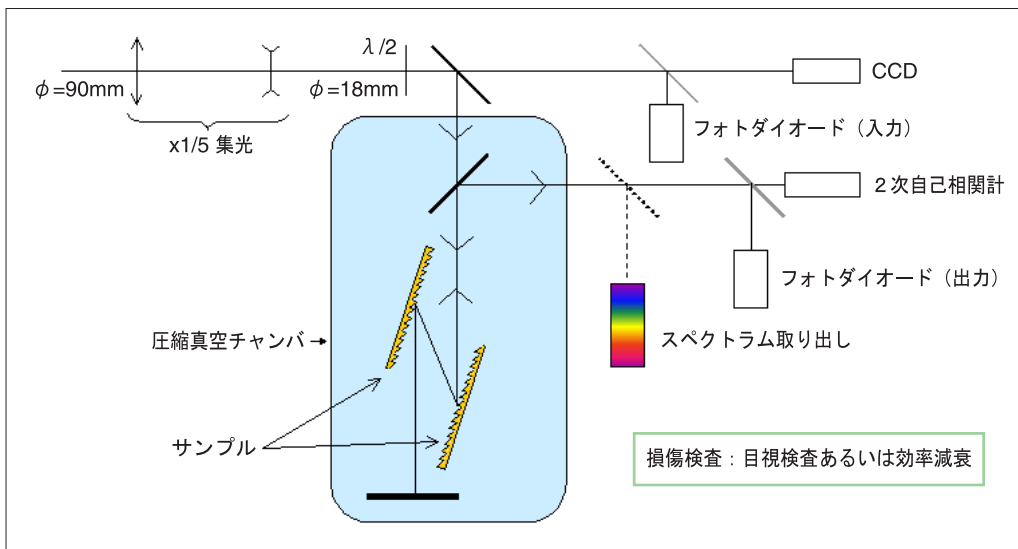


図10 大口径MLDグレーティング性能評価システム (引き伸ばされたレーザパルスを1ピコ秒以下のパルスに圧縮し、損傷閾値を測定した。)

## 4.2 2回目のMLDグレーティングペア

次に $210 \times 420 \text{ mm}^2$ と大形のMLDグレーティングペアを製作した。この場合も効率の均一性は良好で、LULI研究所に納入し、レーザー出力強度を倍増させるためにテラワット・レーザー圧縮装置に組み込まれた。本MLDグレーティングペアの外観を図11に、効率の分布(実測値)を図12に示す。

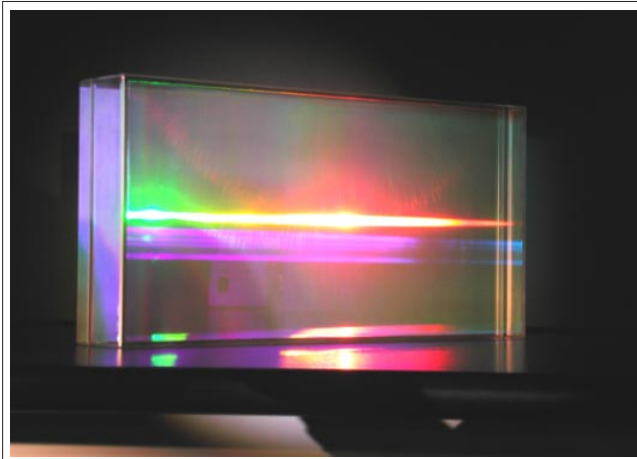


図11 大口径MLDグレーティング(溝密度:1740本/mm, プレーズ波長:1.053  $\mu\text{m}$ , 寸法:210  $\times$  420 mm)

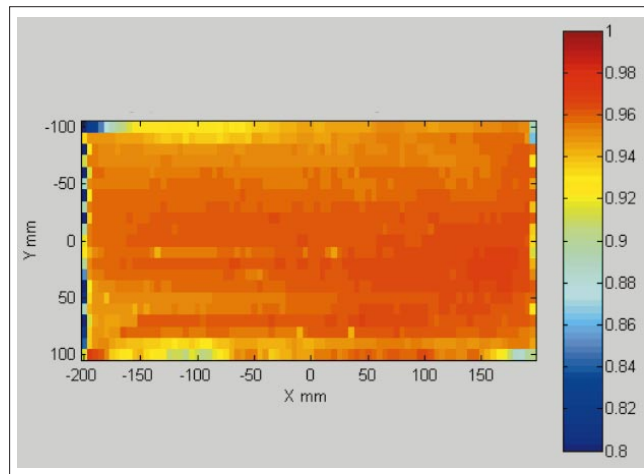


図12 大口径MLDグレーティングの効率分布(測定値)  
平均効率:96%

## 5 CPAによる実装評価

MLDグレーティングのCPA実装評価結果は以下の通りである。入射角 $i=72.5^\circ$ 、照射時間275 fsのパルスで行ったところ、全体の回折効率は85%であった。この値は各段階の効率が96%と高いことを意味している。ダメージ閾値は $i=72.5^\circ$ では $1.7 \text{ J/cm}^2$ 以上、つまりグレーティングの表面では $0.51 \text{ J/cm}^2$ 以上に相当す

る。このエネルギー密度で5回照射しても、目に見えるような損傷は生じなかった。最初の損傷は $2.0 \text{ J/cm}^2$ で生じた。

そこで、金コーティンググレーティングを使ったパルスコンプレッサと、MLDグレーティングを使ったコンプレッサを組み込んだレーザーを、それぞれの性能を出力の面からトータルに比較した。ダメージ閾値は、前者が $1 (\text{J/cm}^2)$ であったのに対して後者では1.7に改善された。つまり、入力可能なエネルギーが1.7倍に増加したことになる。4パスで比較した時の効率は、60%から85%となり、出力エネルギーが増加した。更に、新開発のMLDグレーティングでは、金コーティンググレーティングに比べて閾値は2.5倍に上昇していることがわかった。

## 6 今後の開発計画

超高エネルギーレーザーのパルスコンプレッサ用金コーティンググレーティングの製造方法は既に十分確立されており、大口径のグレーティングの効率の均一性と波面精度に関しては優れた結果が得られている。

一方、新しく開発したMLDグレーティングは、高効率かつ低損傷の極めて有望な結果を得ている。 $120 \times 140 \text{ mm}^2$ のMLDグレーティングを使ったパルスコンプレッサでは、従来の2倍のエネルギー出力が達成された。更に大きなサイズのMLDグレーティング( $210 \times 420 \text{ mm}^2$ )を試作し、優れた効率が達成されている。

現在、JYでは更に大きなMLDグレーティング( $335 \times 485 \text{ mm}^2$ )を製作中である。

## 7 おわりに

現在、日本、アメリカ、フランス等の新しいペタワット級レーザー研究センターでは更に大きなMLDグレーティングが求められている。大型化への対応策の一つは、2枚以上のグレーティングを位相を合わせて接合し、モザイク構成とすることである。2枚のグレーティングをつなぎ合わせた最初の試作品は、既にアメリカのRochester大学で作成されている<sup>[7]</sup>。このように、MLDグレーティングを使ったモザイク型グレーティングが、将来のパルスコンプレッサに求められるような大口径グレーティングのベースになっていくものと考えている。

### 参考文献

- [ 1 ] D.Strickland and G.Mourou, Opt. Comm. 56, 219 ( 1985 )
- [ 2 ] C.Sauteret, D.Husson, G.Thiell, S.Seznec, S.Gary, A.Migus and G.Mourou, Opt. Lett. 16, 238( 1991 )
- [ 3 ] K.Yamakawa, H.Shigara, Y.Kato, Opt. Lett. 16, 1593( 1991 )
- [ 4 ] M.D.Perry, Opt.Lett. 24,160( 1999 )
- [ 5 ] M.D. Perry, R.D. Boyd, J.A. Britten, D. Decker, B.W. Shore, C. Shannon et E. Shults, Opt. Lett. 20( 8 ), 940-2( 1995 )
- [ 6 ] A.Reichart, N.Blanchot, P.Y.Baures, H.Bercegol, B.Wattelier, J.P.Zou, C.Sauteret, J.Dijon  
Proceedings Boulder Damage Symposium 2000
- [ 7 ] J.Bunkenburg, T.Kessler, Hu Huang, C.Kellogg, C.Kelly, Rochester LLE



**Bruno Touzet**

Jobin Yvon S.A.S  
Gratings and OEM Division  
Sales Manager