

パルスレーザーダメージ評価システムの開発

米田研究室 相馬恭輔

1 序論

レーザー出力は、レーザー媒質の発展や高強度半導体レーザーの応用などで飛躍的に増大している。その一方で、ミラーなどの光学素子は、従来のコーティング方法に膜材料を高バンド化するなど、進展はしているが、桁違いな改良ができていないわけではない。その中で、波長 $1\mu\text{m}$ 帯のパルスレーザー用高反射率光学薄膜では、これまでの数倍にあたる $200\text{J}/\text{cm}^2$ を超えるものが HfO_2 などの材料で得られるようになってきており、これら高耐力ミラーの実応用が望まれている。これら高耐力ミラーでは、薄膜形成時の耐力はそれほど大きくなく、レーザーによるコンディショニングによって性能が飛躍的に伸びることを利用している。また、レーザーの高繰り返し性から来る高平均化出力レーザーでは、 $10^5\sim 10^6$ の照射履歴に対する光学薄膜の耐力評価が必要になってきている。このため、これまでの単一ショットでのダメージ評価ではなく、照射履歴を含む耐力評価や使用する際の準備方法（コンディショニングなど）を明らかにしていく必要がある。しかし、これには膨大な照射・損傷データが必要であり、さらに最適化経路を決定するためには、機械学習の利用が不可避だと考えられている。そこで、本研究では、通常のナノ秒レーザーで照射履歴を含む新しいレーザー損傷試験を行うシステムを構築することを目的とした。

2 実験の原理

2.1 散乱光診断

本実験では、散乱光診断と呼ばれる損傷検出方法を用いている。散乱光診断は、レーザー照射箇所から散乱する光を用いて損傷を検出するものである。光学素子の1か所に対して、高強度レーザーと He-Ne レーザーなどのプローブレーザーを同時に照射する。プローブレーザーの散乱光を、フォトダイオード(PD)などの光検出器を用いて検出する。もし光学素子表面に損傷がある場合、そこからの散乱強度がかなり大きくなることを利用して損傷の有無を判断する。

2.2 損傷閾値

損傷閾値は、光学部品にレーザーを照射した際に、損傷が生じない最大エネルギー密度として定義されている。本実験では、ミラー表面のエネルギー密度とミラーからの散乱強度の関係をグラフ化し、散乱強度がかなり大きくなる直前のエネルギー密度を損傷閾値とする。

3 評価方法

開発した光学系を用いて、ミラーの損傷試験を行い、損傷閾値を求めた。

4 実験装置について

作成した装置の概要を図1に示す。

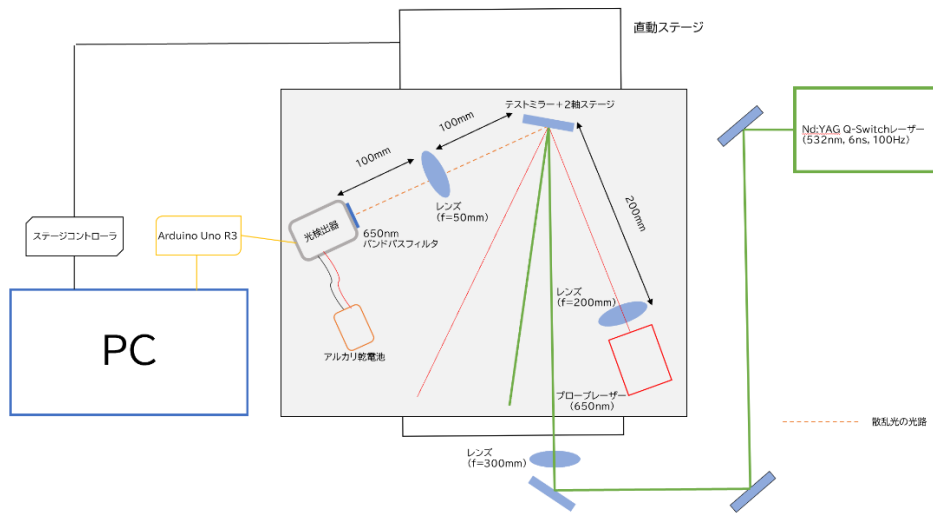


図1：実験装置の概要

5 実験

5.1 M^2 の計算

レーザー損傷試験を行う前に、使用するNd:YAG Q-Switchレーザー(532nm, 6ns, 100Hz)の品質を測定するため M^2 の計算を行った。CCDカメラを用いて測定したところ、実際のビームウエスト半径 $W_0 = 27.9 \mu\text{m}$ で、その時のレンズ($f = 300\text{mm}$)-テストミラー間距離 z_0 は338mmであった。また、図2における $C = 10\text{mm}$ だったので、(1), (2), (3)式より $M^2 = 2.24$ と求まった。

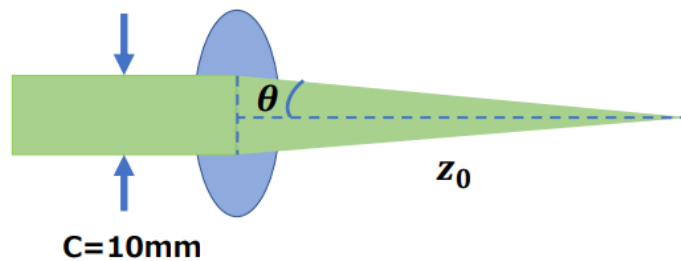


図2： θ , C , z_0 の関係

$$NA \sim \sin\theta = \frac{C}{2z_0} \quad (1)$$

$$M^2 = \frac{\pi\theta\omega_0}{\lambda} \quad (2)$$

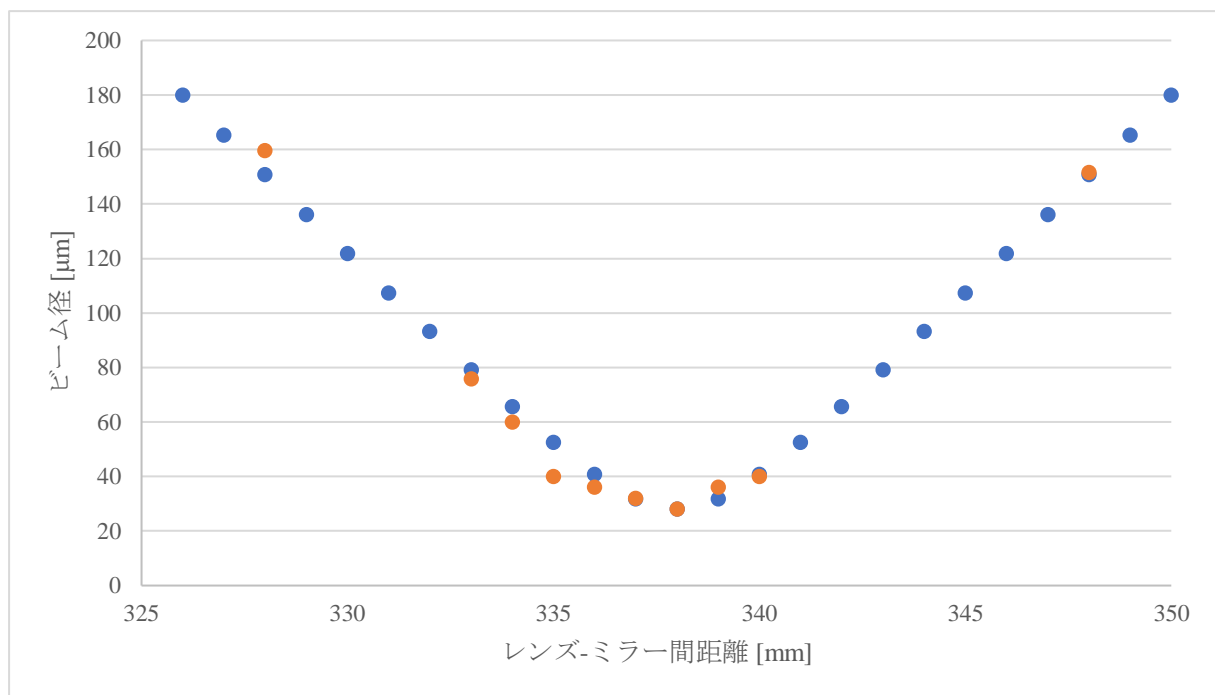
$$\text{理想的なビームウエスト半径 } \omega_0 = \frac{W_0}{M^2} \quad (3)$$

5.2 レンズ-ミラー間距離とビーム半径の関係

レンズからの距離 z とビーム半径 $W(z)$ の関係は、 M^2 を用いて (4) 式で理論的には表される。

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left[\frac{M^2 \lambda (z - z_0)^2}{\pi W_0^2} \right]^2} \quad (4)$$

CCD カメラを用いて距離とビーム半径の実際の間関係を測定し、図 3 のように理論曲線と比較した。ここで、ビーム半径は ImageJ で Plot Profile をとり、最大輝度の $1/e^2$ 幅としている。実測値と理論値がフィットしたため、実際のビーム半径も (4) 式で表されるものとした。



5.3 ミラーに吸収されたエネルギーの測定

図 1 において、 $f = 300\text{mm}$ のレンズ入射直前とテストミラー入射直後の 2 点でレーザーのエネルギーを測定したところ、その差は $44\mu\text{J}$ であった。ここから、レンズからの距離とテストミラー表面のエネルギー密度の関係が求まった。

5.4 レーザー損傷試験

Nd:YAG Q-Switch レーザーを $f = 300\text{mm}$ のレンズでテストミラー上の非損傷部に集光した。また、プローブレーザー (650nm) を $f = 200\text{mm}$ のレンズを用いて、Nd:YAG Q-Switch レーザーの集光点と同じ場所に集光した。その後、直動ステージを動かし、レンズ-ミラー間距離を 290mm から $10\text{mm} / 1\text{s}$ の速度で変化させた。そして、光検出器で検出した散乱光を Arduino Uno R3 を用いて電圧に変換し、 100ms 毎にその電圧を測定した。その結果、ミラー表面のエネルギー密度と光検出

器にかかる電圧の関係は図 4 のようになった。図 4 から、損傷閾値は損傷が生じない最大エネルギー密度である $1.52\text{J}/\text{cm}^2$ と求まった。

6 結論

散乱光分析を利用した新しいパルスレーザーダメージ評価システムを作成し、通常の HR ミラーに対して損傷閾値試験を行った。通常のナノ秒レーザーを用いた損傷閾値試験を行うことができた。