

高耐力ミラーのための新しいアニール手法の開発

米田研究室 高橋瞭太郎

1 序論

ミラーは高密度のレーザーの光を受けることで壊れてしまう。また、レーザーの波長が短くなればなるほど、ミラーは壊れやすくなってしまう。対策として、レーザーの密度を下げる、つまりレーザーの径を大きくすることや、チャープパルス増幅法を用いるなど工夫はなされているが、熱の影響もあり大きな光学系には限界がある上に小型化を原理的に行うことができない。その解決策として、ミラーの耐力を向上させるというものがある。実際にミラーはその耐力を向上させるために材料を変えたり成膜方法を工夫するなどさまざまな対策がとられてきたが、材料からのアプローチだとその変化には時間がかかりすぎる。そのため、本実験では先行研究で成功事例のあるレーザーアニールを参考にし、ミラー表面にアニール処理を行った。レーザーアニールでアニールされた際の様子は次の図1のようなものであり、この時耐力の変化を見るとアニール前のミラーに比べて三倍のエネルギー密度の光にミラーが耐えられるようになっていることがわかる。

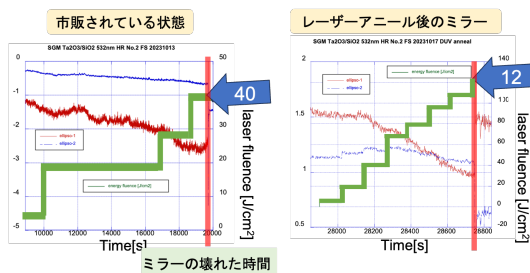


図1 レーザーアニールによる耐力の変化

しかし、使用しているフッ化アルゴンレーザーのランニングコストが高すぎ、アニールの効率も悪いという欠点もある。その欠点を克服するために、本研究では、次の図2 アルゴン

レーザーの波長も含まれている重水素ランプを用いてアニール処理を行い、効率よくミラーの耐力を向上させることを目的とした。

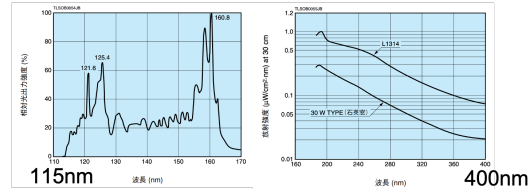


図2 重水素ランプの波長領域 [1]

2 実験

2.1 実験 1: 重水素ランプの性能評価

ミラーへのアニール処理を行うに際し、重水素ランプが真空紫外を出すかどうか、また使用する工学素子が正しく真空紫外を透過するかどうかを確認するために、重水素ランプの性能評価を行った。

まずは、重水素ランプからの光をカルシウムフロライドのレンズでコリメートし、金コーティングされた反射型の回折格子に入射させた。そこから反射した回折光を、真空紫外光で蛍光するテトラフェニルブタジエンを塗布した蛍光板に入射させ、その様子をカメラで観測した。また、入射角と反射角を計測し、回折格子方程式に代入することでどの程度の波長が出てきているかということを調べた。

2.1.1 実験結果

観測できた最短波長は 161nm で、真空紫外光が出ていることが確認できた。

2.2 実験 2: アニール処理中のミラー表面の観測装置の作成

アニールは、ミラーの薄膜内にある不純物準位が高エネルギーの光子によって励起させられ

た後、なんらかの理由によりそのまま励起した状態を維持することで不純物準位の電子が減り、それによってミラー損傷の原因となる電子雪崩が起きづらくなることからミラー耐力が向上すると考えられるが、しかしその原理は確立した理論ではなく、アニールによる変化がどのように起きているのかということを観測したいという動機があったため、本研究では単にミラー表面に光を当てるだけではなく、その当たっている状態をリアルタイムで観測できるような観測系を作成した。

2.2.1 実験方法

ミラー表面の様子は、ミラー表面の薄膜の厚さと複素屈折率の3つの変数が変わることによって記述できるが、厚みの変化は少ないと考え複素屈折率の2変数のみで記述できるとする。この時、複素屈折率の変化は、ミラーから反射したレーザー光の楕円偏光で知ることができる。楕円偏光の二つの変数、 p, s 偏光間の位相差と、 p, s 偏光の振幅反射率の比の二つの変数である。

今回の研究では、その二つの変数を調べるために、つぎの図3のような装置を作成した。

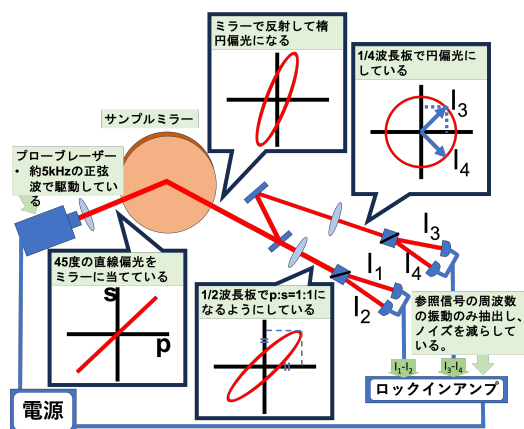


図3 観測系の模式図

ここでは、ミラーから反射してきた光を二つに分け、それぞれの光を、感度が高くなるよう

に波長板で回転させたのちにウォラストンプリズムに挿入し、その差分を見た。しかし、この方法で見える信号は実際の振幅比と位相差の情報を記述するには十分だが、解を得ることはできない。そこで、測定された信号に合うように二つの変数を仮定し、それを代入した上でフィッティングを繰り返し最終的に妥当な変数を得ることで、楕円偏光の信号を得て、ミラー表面の状態を調べることができるようになる。

この時、ノイズを減らすためにレーザーを特定の正弦波で駆動させその周期の信号のみ抽出するロックインアンプを用いるなど工夫を凝らしている。

この装置を、次の図4のように真空チャンバーの中に作り、サンプルミラー表面に真空紫外から可視光までの幅広い波長領域の光を出すことができる重水素ランプの光をアライメントした。

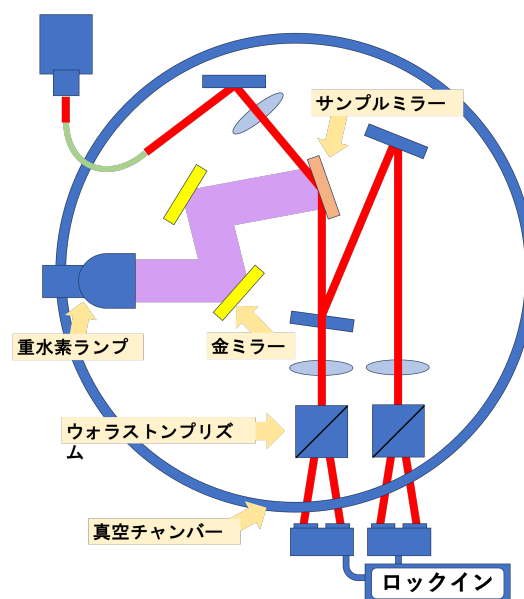


図4 光学系全体

2.2.2 誘電体多層膜ミラーへのアニール処理

本実験で使用したサンプルミラーは誘電体多層膜ミラーと呼ばれるミラーで、図5のように反射したい光に対してその半波長の長さごとに薄膜を成膜し、それぞれの反射光が合わさることで100%に近い反射率を得ることのできるミラーである。

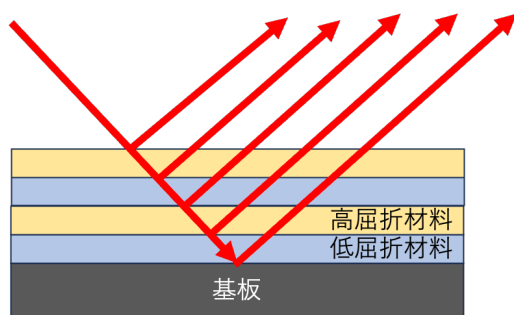


図5 誘電体多層膜ミラーの模式図

誘電体多層膜は高屈折の薄膜、低屈折の薄膜を順番に並べることで作成され、成膜方法も様々あるが、本実験ではIBS法と呼ばれる方法で成膜されたミラーとEB法と呼ばれる方法で成膜されたミラーを使用した。3種類の、高屈折率材料や成膜方法が異なるミラーに対してアニール処理を行った。この時使用したミラーは、高屈折材料に HfO_2 、 Ta_2O_5 を使用したIBSで成膜されたミラーと、 HfO_2 を使用してEBで成膜されたミラーの3種類である。それぞれの観測結果を比較したものが次の図6と図7である。

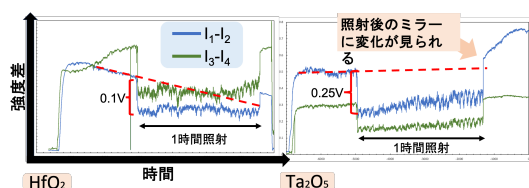


図6 高屈折材料による比較

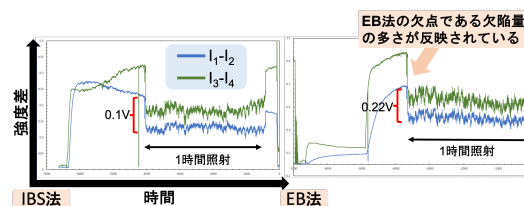


図7 成膜方法による比較

図6を見ると、ハフニウムオキシドのミラーに対してタンタルオキシドのミラーの方が、重水素ランプを当てた際の変化が大きいです。これは、タンタルオキシドの方がバンドギャップエネルギーが大きく、それによって重水素ランプの光で励起する電子の数が多いためミラー表面で大きな変化が起きているからと考えることができる。また、図7を見ると、IBSに対して、EB法で成膜されたミラーの方が変化が大きいです。これは、EB法が単純に材料を蒸着させているだけに対して、IBS法ではイオンビームを材料に当て跳ねた材料を基板上に成膜させることで成膜していることから、EB法に比べて欠陥量が少ないことに由来している。このように成膜方法の違いや、使用した材料の違いが見えるようなデータが得られていると言える。また、変化の様子を仔細に見るために赤い破線を伸ばすと、照射後に照射前と違う傾向が見て取れ、これが不純物順位の変化のシグナルだと取ることができる。そのため、耐力が向上していることを期待してミラーの耐力テストを行った。

2.3 実験3: ミラーの耐力テスト

2.3.1 実験方法

ミラーの耐力を調べるために、ミラーが壊れるまで100Hzの532nmのレーザーの強度を徐々に上げどの程度で壊れるかを調べた。また、ミラー表面からの散乱光を観測した。散乱

光はミラーが正確に光を反射している時はほとんど変化しないが、ミラーが破損したタイミングで大きく増加するため、散乱光の増加したタイミングをミラーが破損したタイミングだとした。

2.3.2 実験結果

ミラーの耐力テストの実験結果を次の図8に示す。

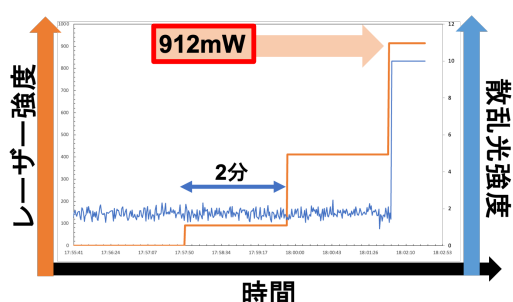


図8 耐力テストの結果

この図の横軸が時間、オレンジ色の線があてられているレーザーの強度、青い線が散乱光強度である。レーザー強度を912mWに上昇させた瞬間に散乱光強度が増大しミラーが壊れたことが確認できる。この時100Hzでチチチチとミラーから音が鳴るなどしており同じタイミングでミラーが壊れていることが確認できている。

しかし、この912mWのレーザーというのは重水素ランプを当てる前のミラーの壊れた強度と同じ強度であったため、アニールの成果を確認することはできなかった。

3 結論

本研究では、レーザーアニールに変わって重水素ランプでのアニールを行いミラーの耐力を向上させることを目指した。またそのために重

水素ランプの性能評価を行い、真空チャンバーの中に観測用の光学系を組み、実際にミラーへのアニールとミラー表面のリアルタイム観測を行い、最後にミラーの耐力が向上しているかのテストを行った。

その結果として、アニール中のミラー表面の様子を観測することに成功し、成膜方法や材料によってアニール中の光学定数が違うということを確認することができた。しかし、アニールしたミラーの耐力を調べたところ、耐力向上には至っていないということもわかった。

今後の展望としては、重水素ランプをアライメントするためのミラーを変えるアライメント用のミラーの枚数を減らす。入射角をより大きくし反射率を高める。という工夫をしながら重水素ランプの強度を上げよりアニールの効果を高めるとともに、アニールの時間を伸ばしながら耐力向上を目指していこうと考えている。

参考文献

- [1] 浜松フォトンクス, 光源総合カタログ, https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/LIGHT_SOURCE_TLSZ0001J.pdf