コーティングの欠陥を修復するレーザ加工ピット

ジョン・ウォレス

意図的に形成した円錐平底ピットは、その損傷閾値がコーティング欠陥の閾値を大幅に上回る。このピットでコーティングの欠陥を修復すると、不完全なコーティングをもつ大型光学系の高いピークパワー環境での使用が可能になる。

高エネルギーレーザと一緒に使用する光学系は、その光学コーティングに小さな欠陥があると、破壊的な損傷が発生する。レーザによる損傷は欠陥のある場所に発生し、そこではより多くの光が吸収され、ランナウェイ効果を引き起こす。その結果、大型光学系に対する高ピークパワーの光学コーティングは、1カ所もしくはごく少数の欠陥でも光学系全体が使用できなくなるため、その加工は非常に難しく高価になる。

コストを増やして完全な光学系を作製する代わりに、米国立点火施設（National Ignition Facility：NIF）の科学者チームは、多層誘電体反射コーティングを損傷する可能性のある欠陥に対処する方法を考案した[1]。この方法は、まず注意深く制御されたフルエンスのレーザ光を照射して欠陥を検出し、次に、それぞれの欠陥を改質して、動作状態のレーザ光のレベルであっても変化しないで存続する良性「緩和構造」を形成する。この改質はフェムト秒レーザ加工、ダイヤモンド機械加工や磁気流動仕上げを用いて行うことができる[2]。

レーザ強度の3Dモデル

米ローレンスリバモア国立研究所（LLNL）、米カリフォルニア大学バークレイ校およびパノラミックテクノロジー社（Panoramic Technology）から集った研究者たちは、平坦底面と円錐壁をもつ円形ピットの形状をした緩和構造をモデリングし、実験的に試作した。このモデルは市販の有限差分時間領域ソフトウエアを使用し、マクスウェル方程式を解いて、レーザビームが構造に入射し反射するときのレーザ強度の3Dマップが計算された。

このモデルの1064nmレーザ波長とハフニア／シリカ多層誘電体構造は、NIFにある慣性閉じ込め核融合研究システムの大型反射鏡の特性との整合性が得られる。ハフニアは1.971の高い屈折率をもつが、シリカは1.4497の低い屈折率をもつ。ガラス反射鏡上のコーティングはハフニアとシリカの24の交互4分の1波長層から成り、全体の膜厚は4μmになる。

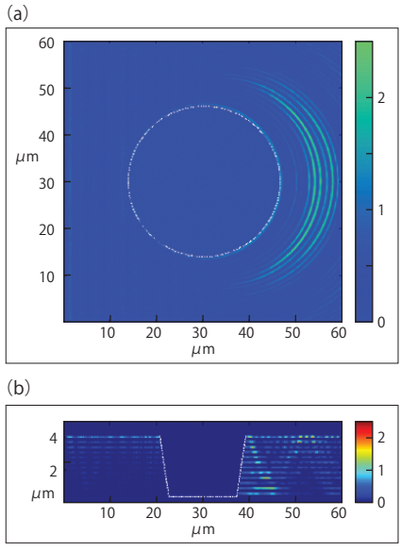

図1　24層ハフニア／シリカ反射誘電体コーティング膜中の円錐緩和構造を取り囲むハフニア層に対して、左から*s*偏光を45°の角度で照射したときの電場強度（増加に関係する）を示している。図は上と横からの断面を示し、コーティング厚みは見やすいように拡大している。円錐角は15°に設定された。赤色と橙色はより大きい増加に対応する。

計算は多数の異なるビーム入射角と*s*および*p*偏光に対して行われた。0～75°の範囲の円錐角が15°ごとに設定された。斜め入射角をもつビームのシミュレーションでは最大反射率が維持されるように波長のシフトが行われ、また屈折率は実際の値の代わりに、有効屈折率が使用された。

結果は電場強度に関係して表示された。つまり、ある点の値はその点の実際の強度を入射ビームの強度で割算した無次元数であった。このシミュレーションは詳細に行われ、二つの4分の1波長材料のそれぞれに分けた3D強度データがマッピングされた。

強度の低減

シミュレーションの結果、入射角、円錐角、偏光および強度は非常に複雑な関係をもつことが分かった。例えば、ハフニア層、15°の円錐角、左から45°の入射角を条件にした場合は、*s*偏光に対する最大強度がピットの右側に生じた（図1）。しかし、*p*偏光に対する最大強度は同じ条件であってもピットの左側に生じた。

一般に、ハフニア層内の*s*偏光の最大強度は入射角と円錐角に依存するが、1.5～9.5の範囲になった。強度を最小にする最適な方法は幾何学条件に依存

することが分かった。入射角が0～35°の範囲にあるときの円錐角は0～30°の範囲が好ましく、入射角が35°以上になるときの円錐角は15～60°の範囲が好ましいことが分かった（図2）。

強度は全体として*p*偏光の場合に低くなった。入射角が0～25°の範囲の場合、円錐角は0～30°の範囲が好ましかった。入射角が25°と45°の間の場合、最適の円錐角は55°と65°の間にあるが、最高の入射角は円錐角が45°と75°の間にあるときに得られた。

シリカ層のモデリングの結果は、いくつかの細部を除いて、ハフニア層の場合と同様であった。例えば、*s*偏光、45°の入射角、15°の円錐角の場合、最大強度はハフニアよりも低い層のなかに現われた。

さらに解析した結果、すべての入射角と30°以下の円錐角に対する強度の増加の主な原因は層内の導波路効果によることが分かった。そこで、強度の増加を減少させる一つの方法として、円錐のエッジを粗くして光のコヒーレンスを解消し、導波を減少させるのが有効ではないかという仮説が生まれた。しかし、45°のビーム入射角と15°の円錐角に対して、平滑エッジと粗面エッジを比較したシミュレーションは、わずかな差しか示さなかった。このことから、粗面エッジの構造は波長に比べてあまりにも小さく、この仮説は成立しないことが分かった。

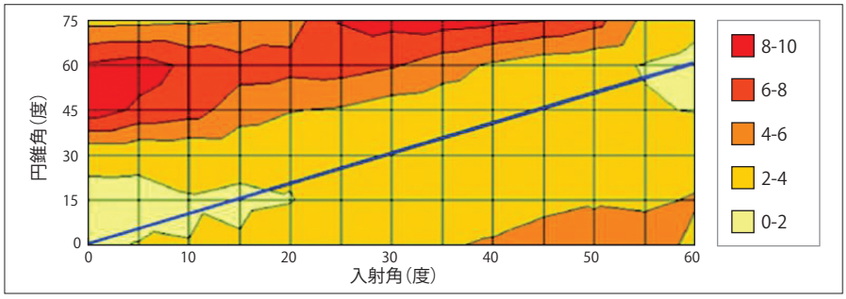

図2　*s*偏光に対する最大の増加を円錐角と入射角の関数として示している。対角線は円錐角と入射角が一致する場合であり、緩和構造の円錐角を決めるときは、入射角と同じ角度の設定が大きな効果をもつことが分かる。

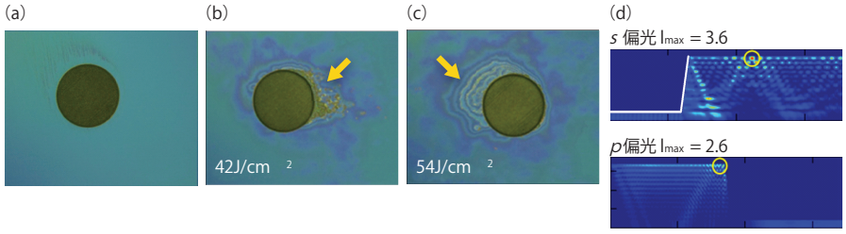

図3　1mmの直径と15°の円錐角をもつ平坦底面ピットを上から観察し（a）、損傷が生じるまでレーザフルエンスを増加したときの結果を*s*偏光の場合（b）と*p*偏光の場合（c）の実験で示している。黄色の矢印はレーザビームの方向を示す。シミュレーション（d）は実験結果とよく一致した。（資料提供：LLNL）

実際のコーティング欠陥の修復

フェムト秒レーザを使用して、さまざまな円錐角をもつ小開口光学系の円錐緩和構造が形成された[3]。レーザ照射による実験の結果、これらの構造ではコーティングの損傷閾値が2倍に増加することが分かった。NIFの大開口反射鏡への応用を目的にして試験したコーティングは、公称仕様20J/cm^{2}の損傷閾値を示した。この閾値はNIFの大面積反射鏡コーティングの欠陥を緩和構造で置き換えると、修復した欠陥の損傷閾値が反射鏡の公称閾値よりもはるかに高いレベルになることを示している。

実験的に置き換えた欠陥の損傷閾値の増加を解明するために、研究者たちはレーザフルエンスを損傷が発生するまで増加させた。45°の入射角と15°の円錐角の場合、損傷の発生は*s*偏光の場合が42J/cm^{2}のフルエンス、*p*偏光の場合は54J/cm^{2}のフルエンスであった。実験による損傷パタンはシミュレーション結果と一致した（図3）。

研究者たちは実際の応用において二つのアプローチから一つを選ぶことを推奨している。全体的なアプローチでは緩和構造の円錐角と入射角を等しくなるように形成する。このような幾何学構造は大きな入射角に対して比較的良好な動作を確保できる。もしくは、モデルパラメータをより厳密に近似させて円錐角を選択することも可能だ。

LLNL研究者のS・ロジャー・キウ氏（S. Roger Qiu）は「小開口光学系から得られた成果を全開口サイズ光学系に応用することがわれわれの次の段階だ。われわれは緩和過程をさらに最適化し、生産への応用を満足させるロバストな部品が得られるように研究する」と語っている。

参考文献
（1）S. Roger Qiu et al., Appl. Opt., 50, 9, C373（March 20, 2011）.
（2）J.E. Wolfe et al., "Laser damage resistant pits in dielectric coatings created by femtosecond laser machining," Proc. SPIE, 7504, 750405（2009）.
（3）J.E. Wolfe et al., "Fabrication of mitigation pits for improving laser damage resistance in dielectric mirrors by femtosecond laser machining," submitted to Applied Optics.

LFWJ