

レーザー損傷評価新技術で試験能力向上

マイケル・トーマス

欠陥に起因する損傷モデルは、ラスタースキャンテストアプローチとともに、レーザー誘起損傷しきい値試験(LIDT)の幅を広げる。

レーザー技術が進歩して、レーザーパワーがさらに高くなり、短パルス化し、新しい波長が入って来るにともない、こうしたレーザーをサポートする光共振器素子やビーム輸送コンポーネントを含む光コンポーネントも同じように進化せざるを得なかった。フェムト秒領域から連続波(CW)で動作するレーザーがあり、現在オプティクスメーカーは、広範な顧客向けに多くのソリューションを供給することが求められている。

新しい蒸着プロセスや今までにないプロセス制御が、光コーティングの技術水準の進歩に役立ってきた。とはいえ、さらなる高出力のレーザー光源の開発で制限となるメカニズムの1つは、レーザー誘起損傷、つまり劣化を示すことなく出力に耐えるこれらのコーティング能力である。

プロセス開発と製造に不可欠なものは、幅広い波長範囲とパルスフォーマットに渡り光コンポーネントの損傷しきい値について、明確に定義され、統計

的に妥当な計測を行う能力である。万能策となる試験は何一つ存在しないので、適切な試験には、最終アプリケーションでコンポーネントが直面する波長、パルスフォーマット、パルスエネルギーをエミュレートする多数のレーザーが必要になる。とはいえ、特殊な損傷テスト手順の設計や履行において実行すべき一般的な枠組みというものがある。

ここでは、適切なテスト手順の定義、その結果の解釈で理解すべき最も重要なコンセプトの1つについて議論する。この計測技術の重要部分は、ISO-21254レーザー損傷試験仕様に組み込まれているが、われわれはこれまでにない、刺激的なテスト法について議論する。それは、関連する損傷試験の実施能力を促進してきたものであり、改定計測基準に向けた実装の初期段階にある。

この議論の一環として、薄膜に生ずるレーザー損傷について厳密に議論する。しかし、この技術は、材料のバルク光学特性のテストにも関連する。

欠陥主導の損傷モデル

レーザー損傷の一定のメカニズムを理解し、さらに膜表面を調べる適切な試験の設計に役立てるために、堆積プロセスに関して仮説を立てなければならない。

欠陥モデルの背後にある基本は、基板に堆積されたどんな膜でも欠陥を持つということである。欠陥は、特定の堆積プロセスおよびそのプロセスで用いられる材料に固有である⁽¹⁾。吸収、電界摂動、場合によってはレーザービームの微小焦点のために、こうした欠陥が選択的損傷前兆として機能し得ることの理解は重要である(図1)⁽²⁾。

時として、このような結果が微分干渉コントラスト法顕微鏡(DIC)あるいは暗視野顕微鏡を使って簡単に観察されることがある。あるいはまた、光学表面からの散乱をイメージングすることによって観察されることがある。他の例では、膜内のサイズまたは位置が小さいために、こうした欠陥は、光学測定器では観察することはできない。これらの欠陥は、膜上にランダムに分布する傾向があり、特殊欠陥密度で規定できる。欠陥の性質は、これらの欠陥によって促進されることで、光学被覆の損傷しきい値が、膜に固有の損傷しきい値以下になることである。

この欠陥が促進する損傷機構を理解すれば直ちに、試験を行う際、表面の十分なエリアを調べなければならないことがすぐにわかる。こうすることで、高信頼に欠陥を見つけ出し明らかにすることができる⁽³⁾。このため、損傷試験は、可能な限り大きなビームで行うべきである。

しかしレーザーの制約により、完全開

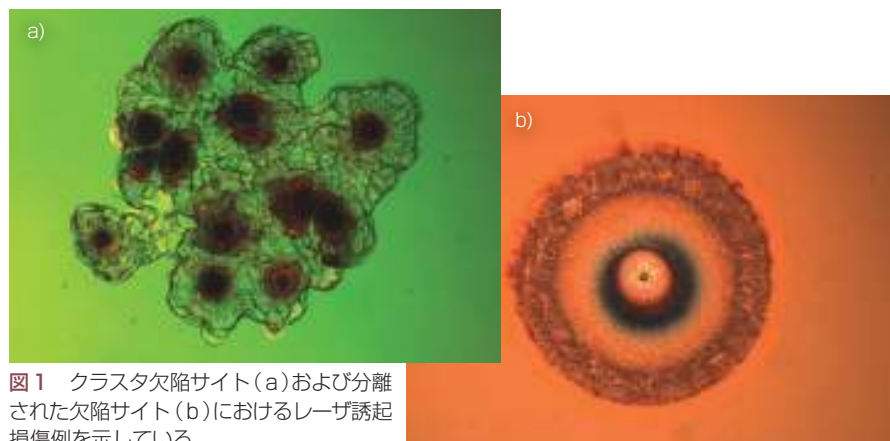


図1 クラスタ欠陥サイト(a)および分離された欠陥サイト(b)におけるレーザー誘起損傷例を示している。

口部のレーザービーム径でサンプルをテストできる光源が常に利用できるわけではない。また、サンプルをテストするためのガウシアンビームを利用すると(現在、テスト手順として認められている)、そのビームの直径あるいは「ピーク」領域が、 $1/e^2$ ポイントで定義されるときに、名目上ビーム径の18%となることを理解しておくことも重要である。そのビームの「ピーク」領域は、ビームエネルギーが中心最大値の10%まで落ちる領域で定義されている。

たとえば、 $1/e^2$ ポイントで定義された1mm径のレーザービームなら、ピーク領域径は名目上 $180\mu\text{m}$ となる。確かに、1mmスポットは一定の高エネルギーレーザーシステムでは効果的に使用可能である(ここでは、このビームサイズでも小さいと見なされる)。しかし、CWあるいは高繰り返しレートのレーザーシステム、またはパルスエネルギーが低いレーザーでは、より小さなスポットを使ってフルエンスを高めなければならない。これによって問題の有効エリアが減少するのである。

ラスタースキャン技術

より大きなテストエリアを調べるために、従って欠陥を明らかにする信頼度を高めるために実行する方法は、これまでにないラスタースキャン技術の到来である。この技術は、米ローレンスリバモア国立研究所で開発された。国立点火施設(NIF)の建設に先立って、縮小した試験エリアを大型のオプティクスに損傷特性に合うように調整することが目的であった⁽⁴⁾。

この技術では、個々のレーザーパルスは曲がりくねったラスタースキャンパターンで動作を繰り返す。そのパターンでは、個々のパルスは、所定の集中スポット径のガウシアンピークの90%ポイント



図2 新規に堆積された膜の上の欠陥が、散乱計を使って可視化されている。

で区切られている。この90%区切りは、レーザースキャンのX方向とY方向の両方で使われる。スキャンは、テストされるオプティクスの所定の部分で行われ、損傷の始まりは、リアルタイム計測(図2)を行う散乱計を使うか、あるいは照射前後に顕微鏡による表面検査を利用するかのいずれかで観察される。思い通りの(損傷なし)ラスタースキャンが特定のレベルで完了していると、レーザフルエンスは規定量で増加し、表面の損傷が観察されるまでラスタースキャンは、再びこのパターンを踏襲する。

この技術の利点は、ガウシアンビームの領域がオーバーラップするときに、オーバーラップしたビームのコンボリューションから、所定のスキャンエリアで「凸凹の」フラットトップビームが得

られることである。そのスキャンエリアは、試験されるオプティクスのフル開口までのどんなサイズでも可能である。必要なら、開口部を完全にカバーする。従って100%信頼性ですべての膜の欠陥を調べるように、試験を設計することができる。

テストの要件および所望の結果に応じて、試験手順の特定変種を行うことが可能である。テストエリアが開口部の大きな割合となるアプリケーションでは、ラスタースキャンは同じエリアを何度も何度もテストする。これは、「条件づき」テスト、つまりR:1として知られる計測である。ここではエネルギーが同じエリアで徐々に増加する。もっと小さなスキャンエリアを使用し、開口部がもっと大きいなら、各フルエンスレベルに対してフレッシュサイトを利用することができ、1:1、つまりS:1テストとなり、各ロケーションは、シングルパルスで照射される、または同じサイトがマルチパルスで照射される。

結論として、このラスタースキャン法は、標準ISO-21254の有益な代替となる。このテスト手順のさらなる改善により、ユーザーは特定のエンドユーザー向けに所定のフルエンスで、特定の信頼レベルの計測を含む試験を設計できるようになる⁽⁵⁾。

参考文献

- (1) C. J. Stolz et al., "Electric-field enhancement by nodular defects in multilayer coatings irradiated at normal and 45° incidence," Proc. SPIE, 5273, 41 (Jun. 10, 2004).
- (2) J. Wang, "Laser induced damage threshold prediction of dielectric enhanced mirrors at 1064 nm," Proc. SPIE, 9453, 94530S (May 22, 2015).
- (3) J. W. Arenberg and M. D. Thomas, Opt. Eng., 53, 12 (2014).
- (4) M. J. Runkel and M. C. Nostrand, "Overview of raster scanning for ICF-class laser optics," Proc. SPIE, 4932, 136 (May 28, 2003).
- (5) J. W. Arenberg et al., "Periodic review of ISO 21254: U.S. National Committee proposal for revision," Proc. SPIE, 10014, 10014-25 (2016).

著者紹介

マイケル・トーマスは、米スピカテクノロジーズ社(Spica Technologies)の社長。Optics and Electro-Optics Standards Council(OEOSC)の議長も務める。OEOSCは、光コンポーネントに対するレーザー損傷を計測するために、新しい米国レーザー損傷基準の作成作業を行っている。
e-mail:mdthomas@spicatech.com URL:www.spicatech.com