

レーザ誘起損傷閾値 (LIDT) テスト技術の適用法

ジェイソン・イエーガー

光学部品へのレーザ誘起損傷を避けるには、いかなる条件でそれが起こるかを理解するとともに、レーザ誘起損傷閾値がどのように決まるかを理解するのがベストである。

レーザ光には、独特の特性がいくつかある。それには単色性、高コヒレンス、高コリメーションが含まれる。その結果、レーザは幅広いアプリケーション、材料加工、通信、医療、セキュリティと防衛で重要なツールとなっている。

材料および光学被覆の進歩によりレーザ光学系は今では、ビーム強度のペタワット、つまり 10^{15} W 達成を可能にしている。しかし、1960年にテッド・メイマン氏 (Ted Maiman) が最初のレーザを実証して以来⁽¹⁾、大きな制約の1つは光学損傷である。高エネルギーおよびハイパワーレーザシステムの光学部品、レンズ、ミラー、非線形オプティクス、プリズム、ファイバなどはレーザ誘起損傷 (LID) を回避するため

に十分なマージンが確実に維持されるように正しく選択されなければならない。レーザ誘起損傷閾値 (LIDT) がどのように計測されるかを的確に把握することが、所定のアプリケーションに適した光学部品を決めるために極めて重要である。

根本原理

レーザ誘起損傷は、試料表面あるいは大部分における、検査技術によって観察できるような何らかの永続的なレーザ照射誘起による特性変化として、ISO21054に従って定義されている。LIDは2つの主要な基本メカニズムに分類できる、熱誘起と電界誘起である (図1)。

熱: 連続波 (CW) レーザでは、損傷閾値は熱吸収によって促進される⁽²⁾。損

傷モードは、パルス幅が、 $\sim 10^{-8}$ s までの長いパルスでも見られることがある。損傷は、材料の溶解と気化の両方、あるいはいずれか一方が原因で起こる。吸収は、熱伝導性による材料の熱分散能力を超えているということである。CW レーザの LIDT はパワー密度として表され、光輝、つまり面積当たりのパワーと見なされている (W/cm^2)。

電界誘起: パルス幅が $10^{-8} \sim 10^{-14}$ の短パルスレーザ光源では、損傷閾値は光電離効果または電界効果によって促進される (図1)。電界効果は、フルエンスあるいはエネルギー密度に関連して議論されることがある。つまり面積当たりのエネルギーである (例えば、 J/cm^2)。

光電離は、電磁放射によって媒体に生ずる電離である。電界が媒体に結合し、フォトンの吸収によって電子を伝導帯に励起する。これらの電子がプラズマを作り、臨界密度に達すると、入ってくるフォトンと直接相互作用する。これはプラズマ周波数がレーザの周波数と共振するためである。するとプラズマの温度が著しく上昇し、爆発的な拡大が始まる。したがって、衝撃波が形成される。これはスパークのように見え、パチッという音が出ることもある。

プラズマからの熱は、周辺格子に結合し、パルス幅が十分に長いと熱損傷を起こす。パルス幅が $10^{-10} \sim 10^{-13}$ s では、アバランシェ電離が主要な役割を果た

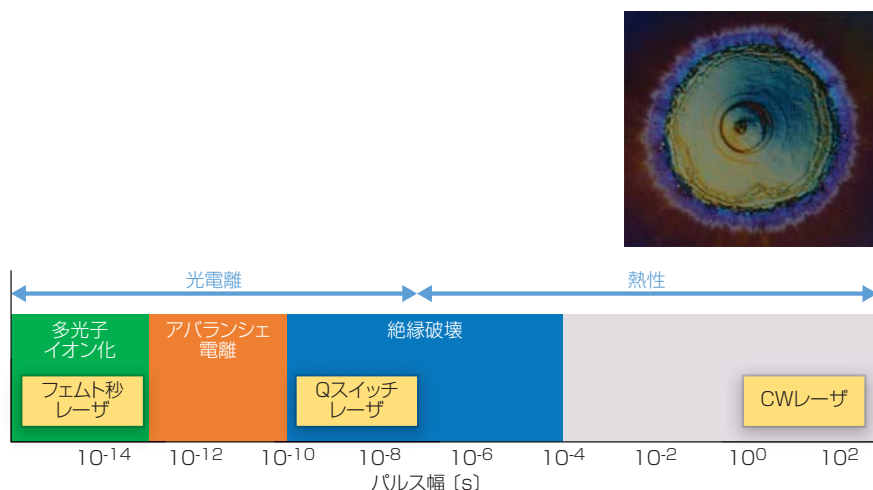


図1 レーザ誘起損傷は、電界誘起および熱誘起光学損傷を含み、パルス幅域全体に見られる。挿入図は、誘電体被覆における電界誘起レーザ損傷の例 (提供: 米カンテル社)。

す。パルス幅 $<10^{-13}$ s のフェムト秒レーザーでは、マルチフォトン電離プロセスが主要動因であり、その役割はパルス幅縮小にともない大きくなる。この領域はコールドレーザー加工の基盤である。プラズマ拡大時間は非常に短いので、エネルギーが周辺材料に効果的に伝わることはない⁽³⁾。

レーザー損傷テスト手順

最も一般的に利用されるテスト手順はISO21254、「レーザーとレーザー関連装置 - レーザ誘起損傷閾値のテスト法」であり、その前身はISO11254である。これらの国際基準は、レーザービームの影響下の光コンポーネントの不可逆損傷を判断するために使用される。再現性があり、テストラボに依存しないような方法である。

例としては1-on-1テスト(サイトあたり1パルス)とS-in-1(サイト当たりマルチショット)。損傷は、なんらかの永続的レーザー誘起変化と定義できる。これは検査技術、一般には150×微分干渉(DIC)顕微鏡によって観察できる。DIC顕微鏡は、ノマルスキー型微分干渉顕微鏡でもある(図2)。この照明技術は、透過サンプルのコントラストを高めるために利用される。DICは干渉分光法をベースにしてサンプルの光学パス長の情報を得る、別な方法では見えない特徴を明らかにする⁽⁴⁾。

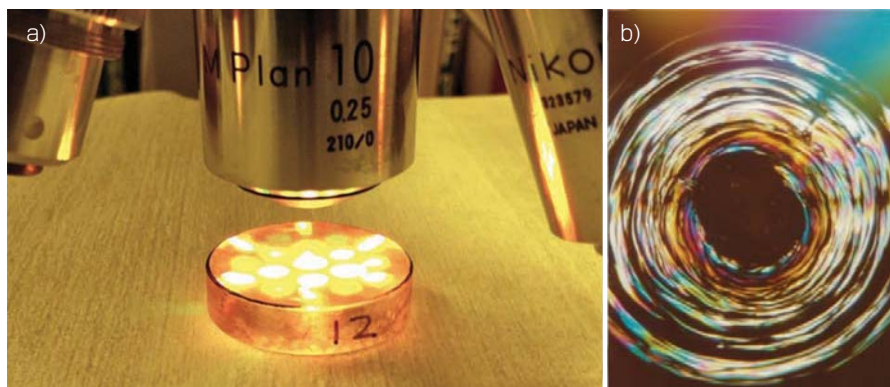


図2 150倍反射型ノマルスキー顕微鏡を使った光学検査(a)でレーザー損傷が明らかになる(b) (提供:米カンテル社)。

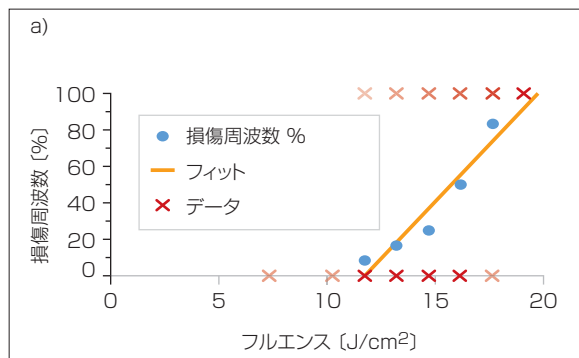
S-on-1レーザー誘起損傷周波数法(ISO21254)では、ISO21254基準に基づいて各レベルで所定数のサイトにおいていくつかの異なるフルエンスレベルでテストサンプルが照射される。レベルは、高い方のフルエンスが高い損傷確率となるように意図的に選ばれており、低い方のレベルでは低い損傷確率が存在する。損傷比率はフルエンスレベルに対比してプロットされている。このデータに対する最小二乗線形一致が計算され、ここではゼロパーセント損傷線がほとんどの場合、損傷閾値を決める。一般的な表示データは図3に示している。この方法で、損傷閾値の最も正確な計測が得られる。

レーザー損傷テストステーションレイアウト

代表的暴露テスト構成は図4に示し

ている。このテスト光源はフラッシュランプ励起、電気-光Qスイッチ、Nd:YAG共振器-増幅器で、単一横モード(TEM₀₀)動作に限定されている⁽⁵⁾。テスト光源の出力は可変減衰器で所望のレベルに設定され、ダイクロイックでヘリウム・ネオン(HeNe)レーザーからの可視光と結合してテストサンプルに供給される。テストサンプルは、最高形態の収斂レンズの位置またはその背後にある。レンズを使用することで、テストサンプルにおいて破壊的なエネルギー密度(フルエンス)が生成される。

レンズは移動キャリッジに搭載されており、照射を受けたスポットサイズを所望の値に設定できるようになっている。一旦設定されるとスポットサイズは、テスト中は一定に維持される。サンプルは、精密多軸ステージに設置されている。ステージは、ビームの中



b)

典型的なLIDTテストパラメータ	
波長	1064nm
パルス幅	20ns
繰返し率	20Hz
入射角	Normal
偏光状態	Linear
ビーム直径	1.0mm
横モード	TEM ₀₀
軸モード	Single

図3 LIDTテスト結果を損傷周波数プロットで示している(a)。テストパラメータは表に示している(b)。

眼科学向け 先端診断 装置に 向けて

TECHSPEC®
精密ガラス
非球面レンズ



- エドモンド・オブティクス自社設計・
自社製造品
- 球面収差を軽減
- 広帯域反射防止 (AR) コーティングも
ラインナップ

Edmund
75 YEARS OF OPTICS
www.edmundoptics.jp/017-8152

エドモンド・オブティクス・ジャパン
株式会社
〒113-0021
東京都文京区本駒込2-29-24
パシフィックスクエア千石 4F
TEL: 03-3944-6210
FAX: 03-3944-6211

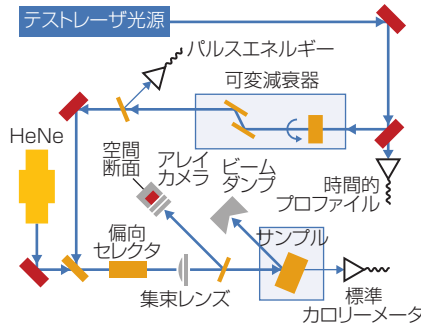


図4 一般的なLIDT暴露テストステーションの構成。

の別のテストサイトの位置決めと入射角の設定に使用される。偏向状態は波長板で選択される。

入射レーザーパルスはコーティングされていないクォーツでサンプリングされ、ビームのウエッジ部分は様々なディテクタに送られる。ここで全パルスエネルギー、空間プロファイル、時間波形が計測される。サンプル表面とそれから散乱された可視レーザー照射は、20倍光学顕微鏡(図には示していない)で観察される。

LIDT結果のスケールリング

LIDT結果は利用されるテストパラメータに大きく依存するので、よくあ

る疑問は、その結果が他の波長あるいはパルス幅にマッピングできるかどうかということである。パルス幅拡張では、業界で受け入れられているルートTスケールリング近似を使うことができる。スケールリング係数はパルス幅領域特有である。例えば、 $T^{1/2}$ (Tはパルス幅)に比例してスケールする「ルートT」スケールリングは、次のように、おおよそ30ps~100psで使用可能である。

$$\text{放射照度 (MW/cm}^2\text{)} = \text{放射照度}_{\text{old}} \text{ (MW/cm}^2\text{)} \times \text{SQRT} \left(\frac{T_{\text{old}}}{T_{\text{new}}} \right)$$

あるいは:

$$\text{フルエンス (J/cm}^2\text{)} = \text{フルエンス}_{\text{old}} \text{ (J/cm}^2\text{)} \times \text{SQRT} \left(\frac{T_{\text{new}}}{T_{\text{old}}} \right)$$

e波長スケールリングは不正確であることが示されており、推奨されていない。詳細については、ホワイトペーパー "Laser Induced Damage Threshold Wavelength Scaling, Fact or Fiction"⁽⁶⁾ 参照。レーザー損傷閾値を適切に理解することによってコストのかかる間違いを回避できる。光コンポーネントがアプリケーションに求められるパフォーマンスを確実に達成できるようになるからである。

参考文献

- (1) T. H. Maiman, Nature, 187, 493-494 (Aug. 6, 1960); doi:10.1038/187493a0.
- (2) R. M. Wood, "Laser-induced damage by thermal effects," Laser-induced Damage in Optical Materials, 9-23 (2015).
- (3) G. L. Wood, "Laser induced optical damage in solids," Center for Night Vision and Electro-Optics (Jul. 1991).
- (4) D. B. Murphy and M. W. Davidson, Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging, 2nd ed., 173-197 (2012).
- (5) S. C. Sietel, Laser Damage Test Handbook and Database of Nd:YAG Laser Optics, 2.7-2.8 (1998).
- (6) See <http://bit.ly/2c4ggxg>.

著者紹介

ジェイソン・イーガーは、米カンテル社のレーザー損傷試験ゼネラルマネージャー。
e-mail: jyager@quantelusa.com URL: www.quantel-laser.com