

フェムト秒レーザーとナノ秒レーザーの 損傷しきい値

オリビア・ホイラー

フェムト秒レーザーとナノ秒レーザーの損傷メカニズムの違いを理解することが、
レーザーシステムの効率と寿命の向上につながる。

レーザー技術が進化し続ける中で、高精度用途で求められる厳しい仕様を満たすために、光学部品も進化する必要がある。医療処置、微細加工、基礎科学研究など、その他多くの分野に、ウルトラファーストレーザー技術の力によって大きな変革もたらされている。これまでナノ秒レーザーが主に使われてきた業界や用途で、ウルトラファーストレーザーを採用しようとする課題が伴う。その1つは、光学部品に対するレーザー損傷しきい値が全く異なることである。レーザーシステムの効率と寿命を確保するには、ナノ秒とフェムト秒のパルス持続時間全体で、レーザー損傷しきい値にどのような理由でどのような違いがあるかを理解することが不可

欠である。

レーザー誘起損傷しきい値(Laser Induced Damage Threshold:LIDT)とも呼ばれるレーザー損傷しきい値(Laser Damage Threshold:LDT)は、すべてのレーザーシステムにおいて光学部品を選択する際に評価すべき重要なパラメータである。ISO 21254の中でLDTは、「光学部品にレーザー照射した際に損傷確率がゼロであるレーザー放射の最大値」と定義されている⁽¹⁾。この定義は明快に見えるかもしれないが、実際のLDT値は、光学部品そのものの性質以外のさまざまな要因に依存する。特に、光学部品のLDTは、ナノ秒(10^{-9} s)とフェムト秒(10^{-15} s)のどちらのパルス持続時間で評価するかによ

って、数ケタもの差が生じる可能性がある。このような大きな違いが生じるのは、それらの異なる時間スケールで生じるレーザー損傷のメカニズムが著しく異なるためである(図1)。

ナノ秒レーザーの損傷メカニズム

フェムト秒パルスと比べて、ナノ秒レーザーの長いパルスは、主に熱メカニズムによって、光学部品に損傷を引き起こす。レーザーはかなりの量のエネルギーを光学部品の材料に印加し、それがレーザースポットの局所的な加熱を促進する。この加熱は、直接的に熔融を引き起こしたり、熱膨張とそれに伴う機械的応力によって何らかの構造的な変化を引き起こしたりする可能性があ

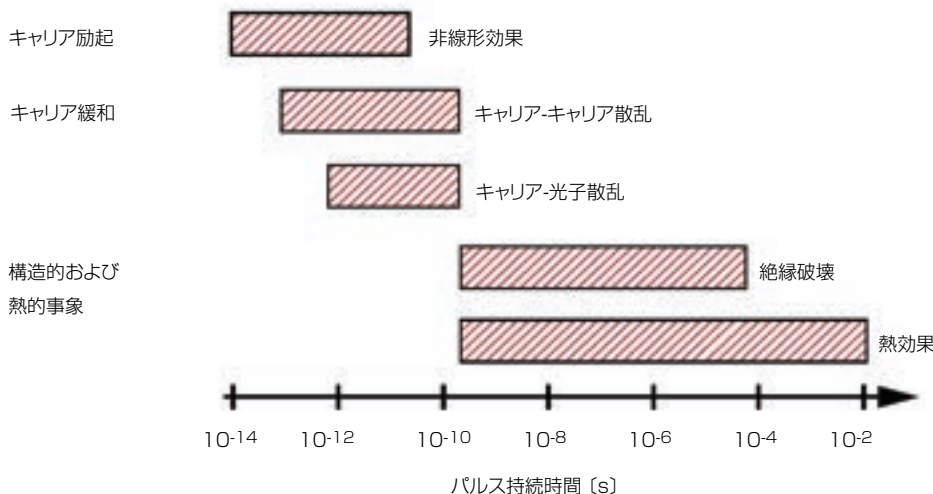


図1 レーザー誘起損傷のメカニズムは、パルス持続時間の長さによって大きく異なる。ナノ秒など、パルス持続時間が長い場合は、損傷は主に熱効果によって引き起こされる。パルス持続時間がフェムト秒単位まで短くなると、キャリア吸収や非線形効果が支配的な損傷メカニズムになる⁽²⁾

る。また、この応力によって亀裂が生じたり、層間剥離というプロセスによってコーティングが基材から完全に剥離したりする場合もある⁽³⁾。

ナノ秒レーザーの照射下にある光学部品は、コーティング材が直接加熱されるだけでなく、コーティング内の欠陥に特に敏感である。これらの欠陥は、その周囲よりも吸収がはるかに高くなりやすいため、光学コーティング内の小さな避雷針のように機能する。その結果、その欠陥領域は他の部分よりも早く加熱し、壊滅的なレーザー損傷の場合は、コーティングを破裂させる。この激しい損傷メカニズムは多くの場合、表面にクレーターを残すだけでなく、損傷事象直後にさらなる微粒子を再堆積させることになる(図2)。

これらの欠陥箇所は、レーザー損傷の誘発源となるため、特定の光学部品において、欠陥が多いほど一般的にLDTは低くなる。そのため、ナノ秒レーザーとともに使用する光学部品の表面品質は、非常に重要である。また、ナノ秒時間スケールのLDT試験は、かなり統計的なプロセスである。光学面上の任意の箇所の損傷確率は、入射ビームのサイズ、欠陥箇所の分布と密度、本質的な材料特性など、多数の関連要因に起因する。寄与要因が多様であることは、ナノ秒のLDT値が、コーティングが同じでもバッチによって大きく異なる可能性があることの原因でもある。LDTは、基材の研磨や前処理のばらつき、実際にコーティングを塗布する間の変動、さらにはコーティング後の保管条件の変化によって、影響を受ける可能性がある。このように、ナノ秒のLDT値にはさまざまな要因が寄与するのに対し、フェムト秒レーザーの損傷を引き起こす主要なメカニズムの要因は、塗布されたコーティング



図2 ナノ秒パルスを出力する532nmのレーザーによるレーザー損傷。この損傷は、表面上のクレーターと再堆積した微粒子からわかるように、欠陥のクラスタによって引き起こされている⁽⁴⁾

材に主に内在している⁽³⁾。

フェムト秒レーザーの損傷メカニズム

フェムト秒レーザーの超短パルスは、異なるメカニズムで損傷を引き起こす。生成するピーク出力が非常に高いことが、その理由の1つである。ナノ秒レーザーとフェムト秒レーザーのパルスエネルギーが同じだったとしても、フェムト秒レーザーパルスのほうが、パルス持続時間が短いため、ピーク出力は約100万倍高くなる。この高強度のレーザーパルスは、価電子帯から伝導帯に電子を直接励起することができる。入射レーザーパルスの光子のエネルギーがこの遷移幅(材料のいわゆるバンドギャップ)よりも低い場合でも、ウルトラファーストレーザーパルスのピークフルーエンスは非常に高いため、電子は一度に複数の光子を吸収する可能性がある。この非線形メカニズムは、多光子イオン化と呼ばれ、ウルトラファ

ーストレーザー光学部品における一般的な損傷経路である。

トンネルイオン化も、フェムト秒レーザー照射時の損傷経路になる可能性がある。この現象は、ウルトラファーストレーザーパルスによって生成される非常に強力な電界の下で生じる。入射電界が非常に強いために、伝導帯のエネルギーが歪み、トンネル効果によって電子が価電子帯から伝導帯に遷移する。十分な電子が伝導帯に遷移すると、その自由電子の海に入射光が直接エネルギーを結合し始め、それがコーティング材の崩壊を引き起こす⁽³⁾。

このような損傷経路に基づき、フェムト秒のLDTは、ナノ秒のLDTよりもはるかに確定的である。レーザー損傷は基本的に、フェムト秒レーザーからの特定の入力フルーエンスで「作動」する。そのフルーエンスの大きさは、塗布された誘電体コーティング材のバンドギャップに比例する。これは、それよりもはるかに確率的な性質を持つナ

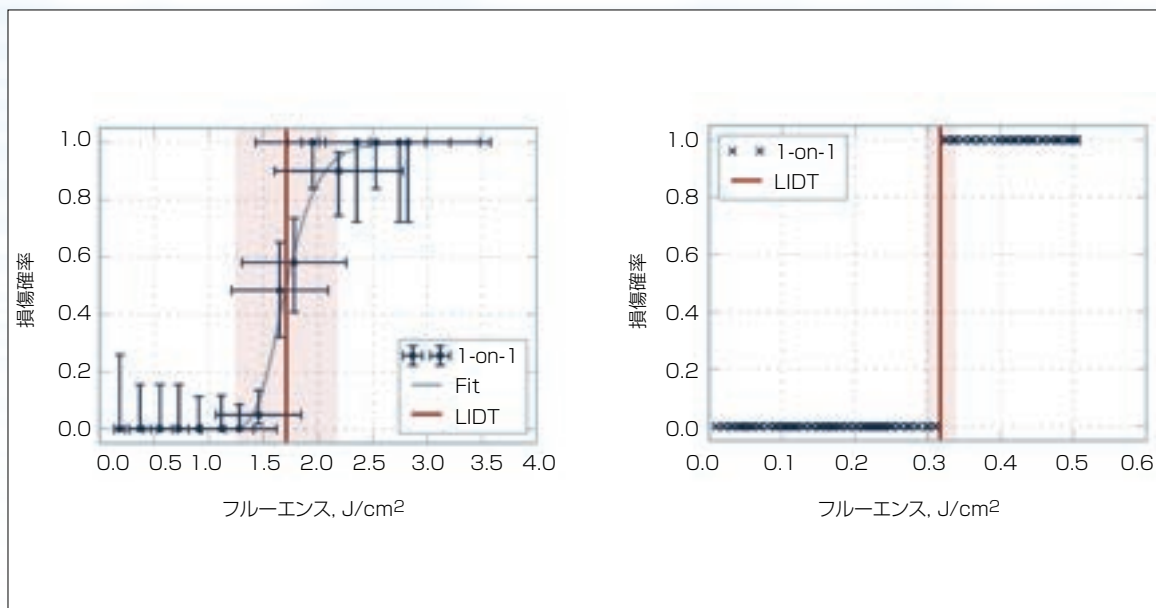


図3 4ns(左)と48fs(右)のパルス条件下で得られたLIDT試験結果。ナノ秒の損傷曲線は、測定の性質が確率的であるために勾配が緩やかなのに対し、フェムト秒レーザーの損傷曲線では、メカニズムが確定的であるために、損傷確率100%への遷移が急峻である。試験結果はリトアニアのリダリス社(LIDARIS)提供

ノ秒レーザーの損傷とは、非常に対照的である(図3)。

ナノ秒レーザーの損傷経路と比べてさらに対照的な点として、フェムト秒の時間スケールでは、熱効果が光学部品のLDTを左右しないことに注意することが重要である。ウルトラファーストレーザーパルスの持続時間が、材料構造内の熱拡散の時間スケールよりも、短いことがその理由である。その結果、フェムト秒パルスは、コーティング材にエネルギーを熱として蓄積せず、ナノ秒レーザーパルスのような、熱膨張や機械的応力は生じない。まさにこのような理由により、ウルトラファーストレーザーは、心臓血管ステント製造⁽⁶⁾など、高精度の切断やマーキング⁽⁵⁾を必要とする、多くの用途に非常に有効である。

スケーリングに注意

パルス持続時間と同様に、ナノ秒パルスとフェムト秒パルスの一般的なLDT値は、数ケタ異なる可能性がある。一般的なレーザーミラーのLDT値は、100fsのパルスで測定すると約0.2J/cm²だが、

5nsのパルスで測定すると同じ光学部品のLDTが10J/cm²近くになる可能性がある。この値の違いにまずは警戒すべきかもしれないが、これは、両方の時間スケールで生じる損傷メカニズムがまったく異なることを示している。同じ理由により、LDTスケーリング計算機を大きな時間スケールで使用する場合は、注意が必要である。一般的に、パルス持続時間が長いほどLDTは大きくなるが、フェムト秒パルスとナノ秒パルスの間でLDT値のスケーリングを行うと、ほぼ必ず光学部品の損傷につながる。最善策は、波長、繰り返し周波数、パルス持続時間を含めて、用途にできるだけ近い条件下で

得られた、適切なLDT定格値を持つ光学部品を選択することである。

適切な光学部品の選択

精度の向上に対する要求を満たすために、レーザー技術は発展し続ける。新しい技術が具体化するにつれて、レーザー損傷メカニズムの違いと、どのメカニズムが特定の時間スケールにおいて支配的なかを理解することが、対象用途に適した光学部品を選択するためにますます重要になってくる。そうした違いに留意することは、現在のレーザーシステムの効率と寿命を向上させるだけでなく、将来のより高度なレーザーシステムへのシームレスな適応を可能にする。

参考文献

- (1) See www.iso.org/standard/43001.html.
- (2) S. S. Mao et al., Appl. Phys. A, 79, 1695 (2004).
- (3) D. Ristau et al., Thin Solid Films, 518, 1607 (2009).
- (4) N. Carlie and K. Firestone, Laser Focus World (2019); www.laserfocusworld.com/14035451.
- (5) S. Lei et al., J. Manuf. Sci. Eng., 142, 1 (2020).
- (6) A. G. Demir and B. Previtali, Biointerphases, 9, 029004 (2014).

著者紹介

オリビア・ホイラー博士(Olivia Wheeler, Ph.D.)は、米エドモンド・オブティクス社(Edmund Optics)のウルトラファーストレーザー光学エンジニア。
e-mail: owheeler@edmundoptics.com URL: www.edmundoptics.com