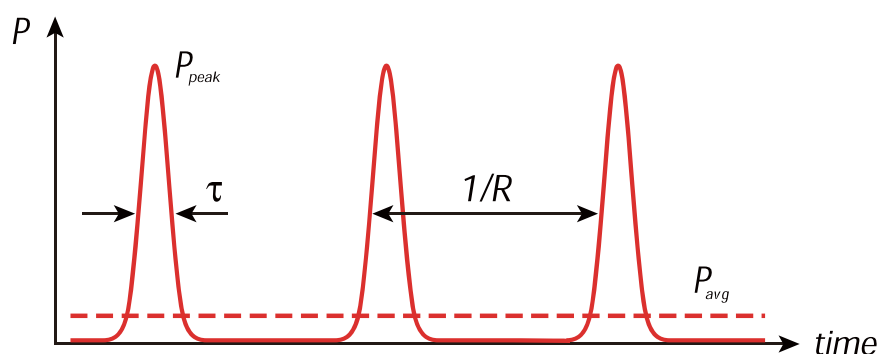


レーザー損傷閾値

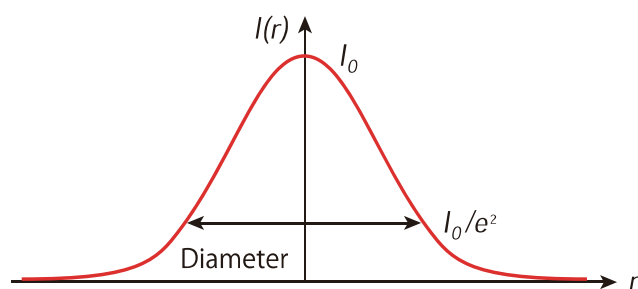
パルスレーザー vs CWレーザー：パルスレーザーはパルス幅 τ のパルスを連続的に出力します。下の図のようにパルス間の時間は繰り返し周波数 R の逆数 $1/R$ で求められます。一方、CW(Continuous Wave)レーザーは、光強度が時間的に一定のビームを出力します。パルスレーザーの平均出力 P_{avg} およびCWレーザーの出力は、通常、数ミリワット(mW)から数十ワット(W)です。パルスレーザーの出力特性を表す代表的なパラメーターは以下の表を参照してください。



記号	定義	単位	主な関係
τ	パルス幅	sec	$\tau = D / R$
R	繰り返し周波数	Hz = sec ⁻¹	$R = D / \tau$
D	デューティ・サイクル	無次元	$D = R \times \tau$
P	出力	W = J / sec	$P_{peak} = E / \tau$; $P_{avg} = P_{peak} \times D$; $P_{avg} = E \times R$
E	1パルスあたりのエネルギー	J	$E = P_{peak} \times \tau$; $E = P_{avg} / R$
A	レーザー照射スポット面積	cm ²	$A = (\pi / 4) \times \text{直径}^2$
I	強度	W / cm ²	$I = P / A$; $I_{peak} = F / \tau$; $I_{avg} = I_{peak} \times D$; $I_{avg} = F \times R$
F	1パルスあたりのフルエンス	J / cm ²	$F = E / A$; $F = I_{peak} \times \tau$; $F = I_{avg} / R$

光学フィルターのレーザー損傷は多くの要因に依存しています。そのため、起こりうる全ての状況においてフィルターの性能を保証することは困難です。しかしながら、これ以下であれば損傷が発生する可能性が低いというパルスのフルエンス（単位面積あたりのエネルギー量）またはパルス強度のレーザー損傷閾値 (Laser Damage Threshold; LDT) を定義することは有用です。

Technical Note



ここで留意すべきは、光学素子の表面におけるフルエンスおよび強度は重要なパラメーターであるので、レーザー照射スポットの面積も重要となる、という点です。照射スポットの面積が十分大きいことで、フルエンスや強度を最小化することができていれば、たとえ非常に高出力のレーザーであっても、光学フィルターが損傷することはありません。ガウシアン分布の強度プロファイルを持つレーザー照射スポットの直径は、左図に示すようにピーク強度の $1/e^2$ (≈ 0.135)のポイントで定義されます。

ロングパルスレーザー：「ロングパルスレーザー」のLDTは一般的にパルスのフルエンスが支配的であると考えられています。ロングパルスレーザーのパルス幅 τ は、ナノ秒(ns)からマイクロ秒(μ s)の範囲内、そしてパルス繰り返し周波数Rは通常1~100ヘルツの範囲内にあります。各パルス間の間隔が長い(ミリ秒)、照射対象の素材が熱緩和される余裕があります。従って、損傷は、熱による誘発よりは、ほぼ瞬間的な絶縁効果によって引き起こされることが多く、通常、損傷は根本的な素材の構造の壊滅的な破壊よりも、むしろ素材の表面や体積における欠陥、またはそれに関連して該当箇所の付近で発生する変則的な光場が原因で引き起こされます。Semrock社製フィルターは、それらのほとんどが 1 J/cm^2 オーダーのLDTとなっており、従って「高出力レーザーの品質」を持つ光学素子とみなすことができます。

例えば、10 nsのパルスを10 Hzの繰り返し周波数、1Wの平均出力で発振するNd:YAG倍波レーザーがあるとします。このレーザーのデューティ・サイクルは 1×10^{-7} 、パルスエネルギーは100 mJ、ピーク出力は100 MWです。光学素子の表面の直径100 μ mのスポットへビームが集光照射された場合、パルスのフルエンスは 1.3 kJ/cm^2 となるため、LDTが 1 J/cm^2 の光学素子に対しては、ほぼ間違いなく損傷が発生することになります。しかしながら、スポットの直径が5 mmの場合、パルスのフルエンスはわずか 0.5 J/cm^2 となるため、光学素子に損傷は発生しません。

このほか、覚えておくと役に立つ経験則がいくつかあります。そのうちの一つは、LDTは波長に対応する傾向があるということです。例えば、532 nmにおけるLDTは、1064 nmの際のLDTの約半分になります。なぜなら、532 nmにおける光の光子エネルギーが、1064 nmのときと比べて約2倍となるからです。二つ目は、LDTはパルス幅 τ の平方根に対応する傾向があるということです。例えば、パルス幅20 nsのパルスのLDTは、パルスエネルギーが同じ10 nsのパルスのLDTよりも $\sqrt{2}$ 倍高くなるはずだからです。

CWレーザー：CWレーザーによる損傷は、熱(加熱)効果が原因で生じる傾向があります。これにより、CWレーザーのLDTは照射されるサンプルの材質および構造に依存します。従ってロングパルスレーザーのLDTと異なり、一概に決定することが困難です。現時点において、Semrock社は自社のフィルターについてCWレーザーに対するLDTの試験や特定は行っていません。非常におおまかな経験則としては、誘電体多層膜ミラーやフィルターなど、全てのガラス製のコンポーネントの多くが、ロングパルスレーザーのLDT(フルエンス J/cm^2)と比べて最低でも10倍の対CWレーザー LDT(強度 kW/cm^2)を有しています。

高出力のCWレーザーには、レーザービームの断面に本来の公称値と比べてかなり高い強度を持つ箇所が存在するいわゆる「ホット・スポット」と呼ばれる部分を持つことが多く、経験則からも、レーザースポット強度は名目上の値を最低2倍し、ホットスポット発生の可能性に備えるのが得策です。

準CW(Q-CW)レーザー：準CW(Q-CW)レーザーはパルスレーザーの一種で、パルス幅 τ がフェムト秒(fs)からピコ秒(ps)の範囲にあり、高出力レーザーの場合の繰り返し周波数Rが通常10~100 MHzというものです。これらのレーザーは通常、モードロックされていますので、Rはレーザーキャビティ内の光の往復時間によって決まります。このように高い繰り返し周波数では、パルス間の間隔が短いため、熱緩和は起こりえません。従って、準CW(Q-CW)レーザーのLDTに関しては、CW強度の替わりに平均強度を用いるなど、CWレーザーと同様に扱われることが多いです。

ピコ秒レーザーは、比較的大きなデューティ・サイクル($\sim 10^{-3}$)を持っています。よって、ピーク出力はさほど高くありません。一方、超短パルスレーザー($\tau < 100 \text{ fs}$)は、非常に大きなピーク出力を有することができ、このレーザーが発振するパルスに付随して生じる高い電界が誘電性素材の電子結合を直接攻撃し、非常に興味深い結果をもたらします。しかしながら、通常はピーク強度のLDT値は相当高いものでない限り、大きな損傷を引き起こすことはありません。よって、レーザー損傷の原因は平均強度に関連して生じる熱損傷のメカニズムが大半を占める傾向にあります。