

高レーザー損傷しきい値の超高速コーティング設計と製造の最適化

マティアス・メンデ

レーザーの耐損傷性と群遅延分散の要件との適正なバランスを取る方法とは？

超高速レーザーとそのさまざまな用途のために、高品質な光学系の需要はここ数年で高まっている。連続波(CW)レーザーや長パルスレーザーに適用される光学系とは対照的に、光学系がフェムト秒(fs)範囲のパルス进行处理する必要がある場合、さらに分散仕様を満たす必要がある⁽¹⁾。特に100フェムト秒未満の範囲では、要求されるスペクトル帯域幅が広がるため、コーティングの設計および製造がさらに困難になる。

このようなコーティングのレーザー損傷しきい値(LDT)を最適化するには、通常、すべての光学仕様を満たすよう、コーティング材料の選定と多層膜内の電界分布の調整において妥協点を見出す必要がある。波長920nmを中心とした低群遅延分散広帯域ミラーの例に基づき、有望な3種類の材料によるア

プローチについて考察する。

レーザー光学系は一般的に、コーティング、界面、基板から構成される。レーザービームが光学素子に照射されると、これらの各部分に損傷が生じる可能性がある。薄膜コーティングに注目

表1 低群遅延分散広帯域ミラーの仕様(上)とLDT試験パラメータ(下)

光学仕様	
反射率	99.5%以上
波長範囲	830 ~ 1010nm
入射角	45°
群遅延分散	± 50 fs ² 以下
偏光	垂直
LDT試験パラメータ	
試験プロトコル	100-on-1
パルス幅	25 ± 5 fs ²
繰り返し周波数	5Hz
ビーム径	350 μm (1/e ²)
波長	880nm, 920nm, 940nm

すると、以下の3つの競合する損傷メカニズムが観察される⁽²⁾。

1つ目のメカニズムは熱損傷だ。これは通常、CWレーザーで顕著であり、層膜材料の吸収と熱伝導によって引き起こされる。

2つ目のメカニズムは欠陥誘起損傷だ。これは非超高速パルスレーザーに最も関係しており、粒子や汚染に起因する。

3つ目のメカニズムは電子的損傷だ。これは超高速レーザーで顕著であり、多層膜内の電界分布および層膜材料の紫外線(UV)吸収端に左右される。薄膜のしきい値フルエンス「 F_{th} 」は、パルス幅「 τ_p 」とコーティング材料のUV吸収端「 E_g 」に対して、次の式を適用して導出できる。

$$F_{th}(E_g, \tau_p) = (c_1 + C_2 E_g) \tau_p^k$$

図1は、波長800nmで測定した複数のパルス幅における、一般的な純材

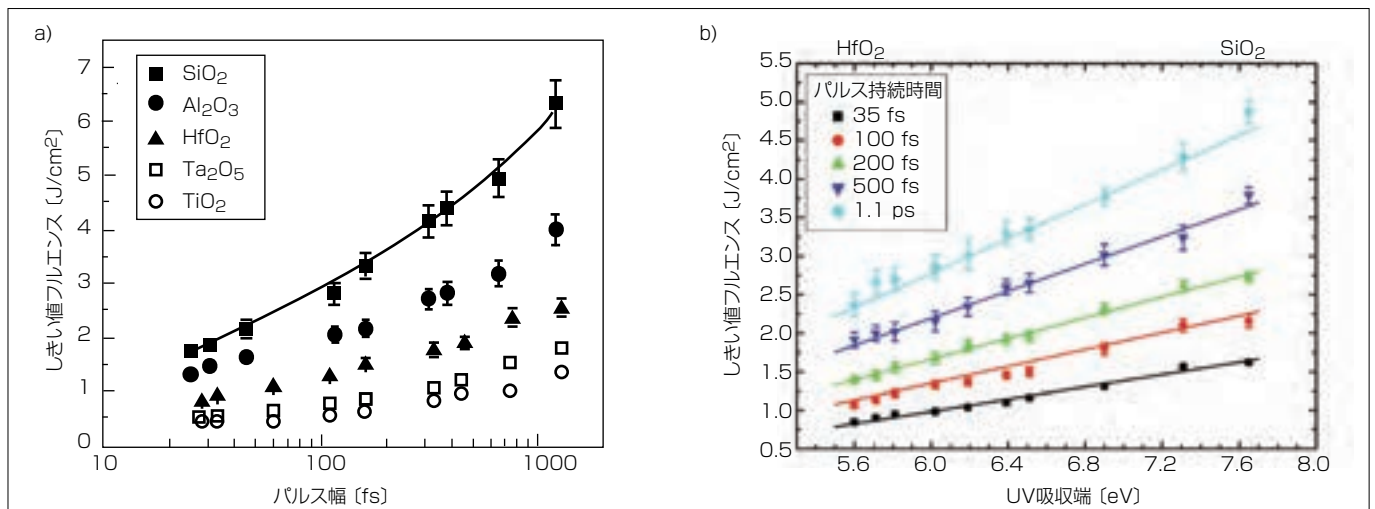


図1 1-on-1試験プロトコルを適用して単層膜で測定した、複数のパルス幅における、(a)異なる純材料⁽³⁾、および(b)HfO₂/SiO₂混合材料⁽⁴⁾のしきい値フルエンス

料および二酸化ハフニウム・二酸化ケイ素 ($\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$) 混合材料のしきい値フルエンスを示している⁽⁴⁾。35フェムト秒のパルス幅では、五酸化タンタル (Ta_2O_5) のしきい値フルエンスは、 $0.5\text{J}/\text{cm}^2$ であるのに対し、 HfO_2 のしきい値フルエンスは $0.8\text{J}/\text{cm}^2$ である (SiO_2 を少量含む混合物では $1.0\text{J}/\text{cm}^2$ に達することもある)。一般的な低屈折率材料である SiO_2 のしきい値は $1.6\text{J}/\text{cm}^2$ であり、これは高屈折率材料である Ta_2O_5 と HfO_2 の結果の2倍以上である。

超高速コーティング設計におけるレーザー損傷しきい値の最適化

これらのしきい値フルエンスの各値は、多層膜コーティングのLDTを推定するために使用できる。この計算は多層膜内の電界分布に基づいており、この分布は独OptiLayer社製「OptiLayer」や独LZH社(Laser Zentrum Hannover)製「Spektrum」のような市販の光学薄膜設計ソフトウェアで算出できる。LDTを最適化するには、 $1/4$ 波長多層薄膜の屈折率プロファイルを変更する。そのためには、図2の赤色で示すように、しきい値フルエンスが高く、かつ屈折率が低い第3の純材料または混合材料を追加する。

この最適化アプローチを、2023年SPIE損傷コンペティションの要件に基づいた低群遅延分散広帯域ミラーの例に、以下のように適用する。表1は、光学素子の仕様とLDT測定パラメータをまとめたものである⁽⁵⁾。

LDTの推定に使用するしきい値フルエンスは、試験条件がわずかに異なる1-on-1測定によるものであるため、実験的な100-on-1の結果は低くなることが予想される。本研究では、米ビーコ社 (Veeco) 製SPECTORイオンビーム

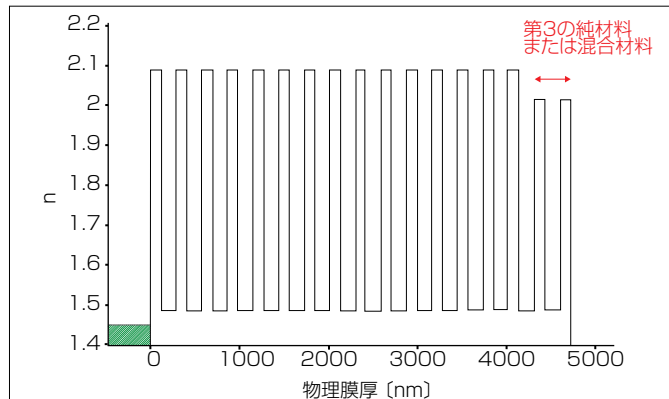


図2 Ta_2O_5 、 HfO_2 、 SiO_2 を用いた3種類の材料コーティングの屈折率プロファイル

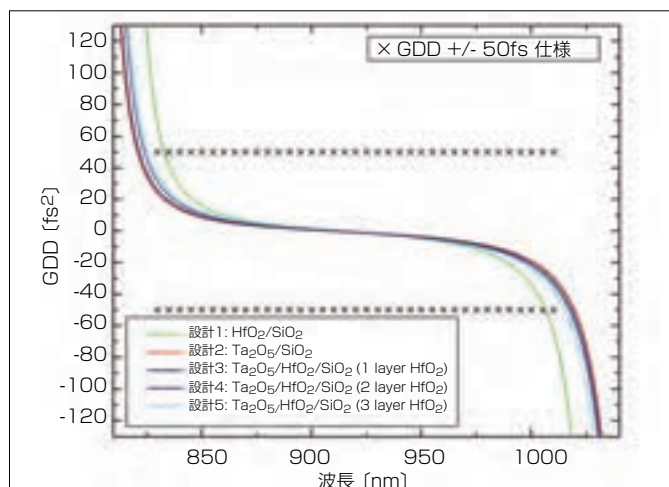


図3 設計1から5のGDD仕様と理論曲線

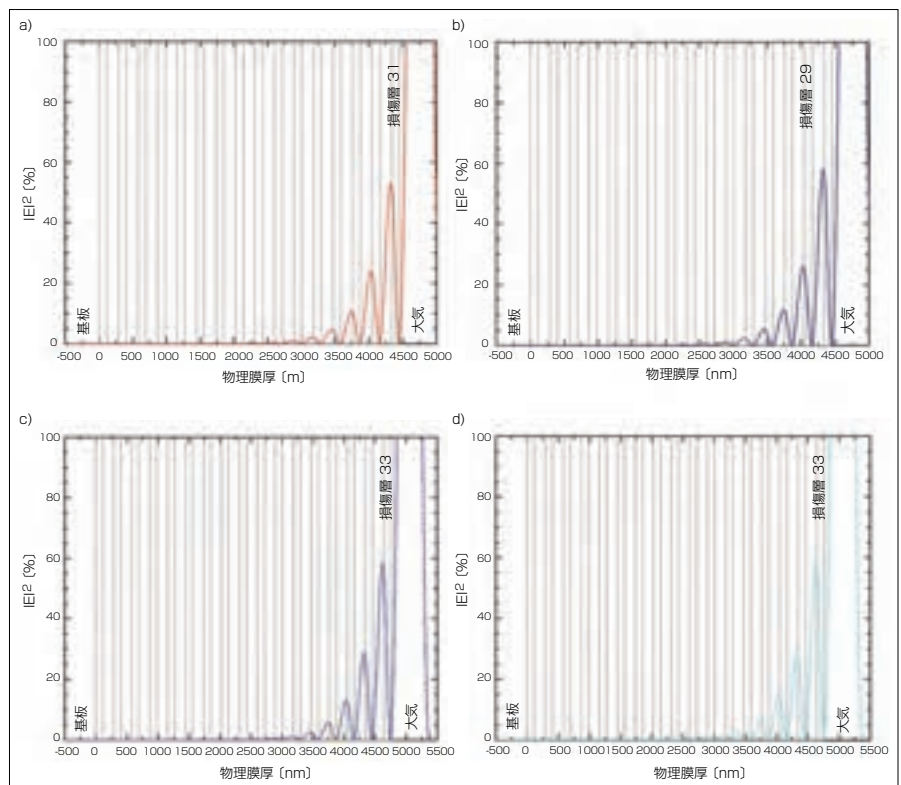


図4 設計1から5のGDD仕様と理論曲線

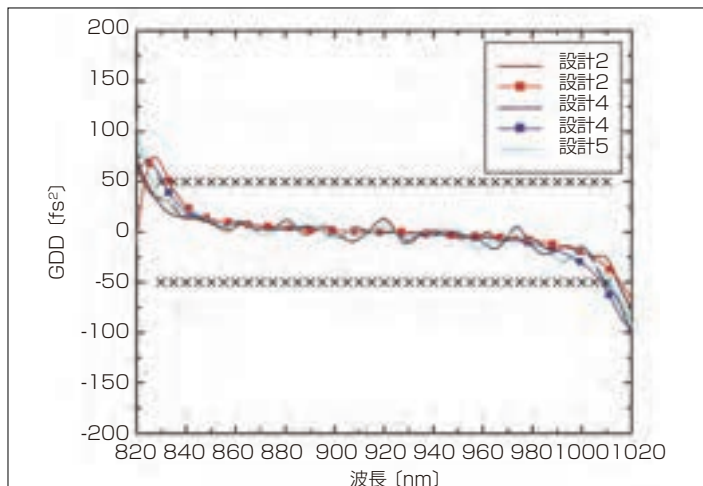


図5 設計2、4、5のコーティングで測定した群遅延分散曲線

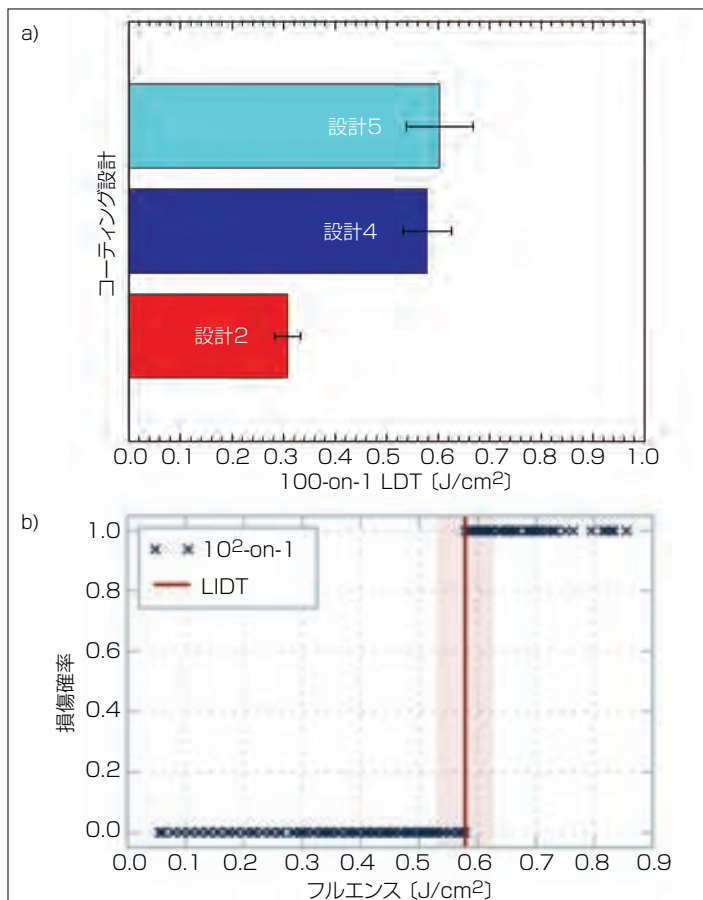


図6 設計2、4、5のIBSコーティングによる100-on-1 LDT結果(a)、および設計4の100-on-1 損傷確率曲線(b)

スパッタリング (IBS) 装置の分散データを使用して、5種類の1/4波長設計を算出した。

設計1および2は、基準設計として2種類のコーティング材料で構成される。設計3から5は、最適化アプローチを実証するために3種類のコーティング材料で算出している。設計3から5の相違点は、 Ta_2O_5/SiO_2 多層膜の上部に、それぞれ1層、2層、3層の HfO_2/SiO_2 層ペアを配置したことだ。図3に示すように、群遅延分散(GDD)

仕様は、5種類の多層膜コーティングを最適化する上で追加の制約要因となる。 HfO_2 と SiO_2 で構成される設計1は、仕様を満たさないため採用しない。

残りの設計2から5については、880nmにおける電界分布をOptiLayerソフトウェアで計算し、図4に示している。さらにLZH社製Spektrumソフトウェアを用いてLDTを推定し、各設計において損傷が生じる層を図4に示している。

設計2は、 $0.92J/cm^2$ で最上部の Ta_2O_5 層に損傷が生じる。設計3は、しきい値フルエンスが低く、電界強度がかなり高いことより、3層目の Ta_2O_5 層に損傷が生じてしまうため、好ましくない。設計4が最適であり、 $1.42J/cm^2$ で最上部の HfO_2 層に損傷が生じる。設計5も同様に、 $1.42J/cm^2$ で HfO_2 層に損傷が生じるが、これは、層を追加してもさらなるLDTの改善が得られないことを示している。

表2 コーティングされていない基板と比較した、設計2、4、5の表面粗さの値

表面粗さ (Å)	設計2	設計4	設計5	コーティングされていない基板
	Ta_2O_5/SiO_2	$Ta_2O_5/HfO_2/SiO_2$	$Ta_2O_5/HfO_2/SiO_2$	SiO_2
PV	10.959	11.133	13.22	12.698
RMS	0.611	0.588	0.883	0.801
Ra	0.455	0.438	0.683	0.615

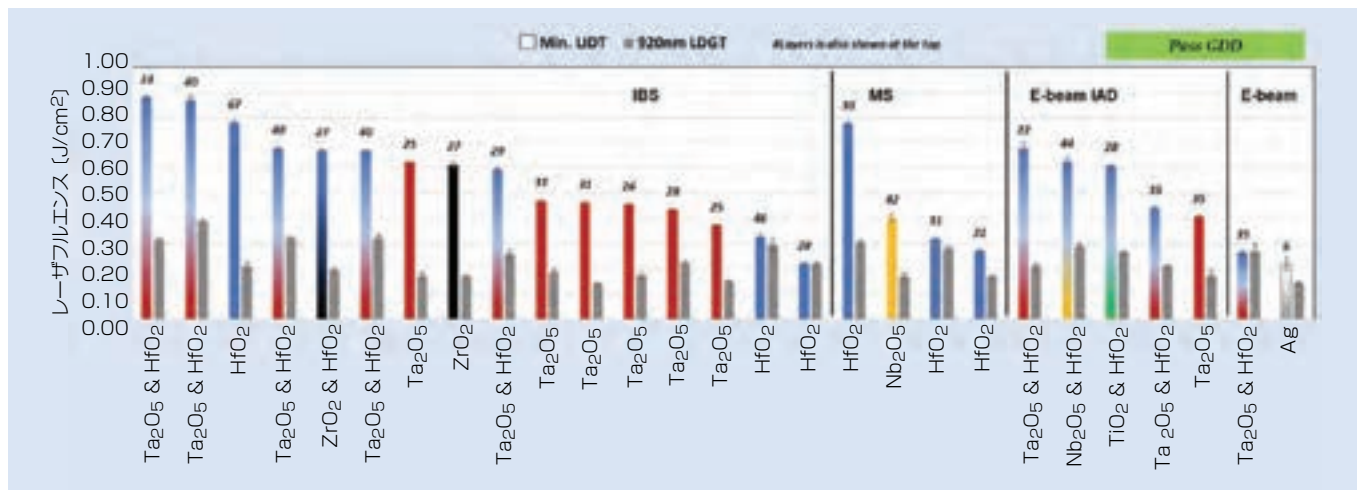


図7 2023年SPIE損傷コンペティションにおける100-on-1 LDT結果

低群遅延分散広帯域ミラーコーティングの実験結果

3種のコーティングは、日本のエドモンド・オプティクス (Edmund Optics) の施設にてイオンビームスパッタリング (IBS) 手法で製造し、その層厚は光ブロードバンドモニタリングにより精密に制御した。図5は、独UltraFast Innovations社製「GOBI」(実線)と米KM Labs社製「Chromatis」(四角形+実線)という2種類の装置で測定した設計2、4、5の群遅延分散 (GDD) 曲線を比較したものである。

3種類の設計には、すべて超研磨基板上にコーティングし、その表面粗さを白色光干渉法で測定した。その結果は表2の比較通りであり、自社製の超研磨基板の表面粗さが3種類の設計すべてで再現されていることは注目に値する。

適用した最適化アプローチを実証するため、3種類のIBSコーティングについて、100-on-1のLDTをリトアニアのリダリス社 (Lidaris) 製「LIDARIS」で測定した。これは、2023年SPIE損傷コンペティションとはわずかに異なるパラメータで行った。

図6は、その測定結果と、設計4の

100-on-1損傷確率曲線を示している。予想通り、測定されたLDTは推定値よりも低くなっており、この結果は、基準設計2と、最適化設計4および5との間で予測された改善を裏付けている。損傷確率曲線は、フェムト秒範囲のパルス幅におけるLDT測定では典型的に見られる非常に急激な遷移領域を示しており、これによって誤差範囲が小さくなっている。測定誤差の範囲内では、HfO₂/SiO₂層ペアを追加しても、さらなる改善が得られないことを示している。

考察した最適化アプローチを確認するため、設計2および4のIBSコーティングを2023年SPIE損傷コンペティションに提出した。図7には、同コンペティションの結果を、使用したコー

ティング材料の関数として、さまざまなコーティング技術ごとにグループ化して示している⁽⁵⁾。

高屈折率層としてTa₂O₅とHfO₂を使用した3種類の材料によるアプローチは、複数の参加者に採用されたため、本アプローチによって(受賞者の匿名性を損なうことなく)最高のLDT結果を達成できたと指摘できる。IBSコーティングの場合、2種類の材料のTa₂O₅/SiO₂基準コーティングと比較して、最大75%のしきい値上昇が観察された。これらの結果は、光学コーティングメーカーが高性能コーティングを開発するための指針として有益である。このようなコーティングにより、超高速レーザーの応用分野がさらに拡大されるだろう。

参考文献

- (1) O. Wheeler, "Basics of ultrafast lasers: Parts 1-3," Laser Focus World (2023); see www.laserfocusworld.com/14291054, www.laserfocusworld.com/14292432, and www.laserfocusworld.com/14294148.
- (2) D. Ristau, M. Jupé, and K. Starke, Thin Solid Films, 518, 1607-1613 (2009).
- (3) M. Mero, J. Liu, W. Rudolph, D. Ristau, and K. Starke, Phys. Rev. B, 71, 115109 (2005).
- (4) L. Jensen et al., Proc. SPIE, 784207 (2010).
- (5) R. Negres et al., Proc. SPIE, 1272606 (2023).

著者紹介

マティアス・メンデ (Mathias Mende) は、独エドモンド・オプティクス社 (Edmund Optics) の光学設計エンジニア。e-mail: mmende@edmundoptics.de URL: www.edmundoptics.de