

# レーザオプティクス被覆が高LIDT達成

ジョン・ウォレス

ハイパワーおよび高エネルギーレーザで使用するオプティクスには、高いレーザ誘起損傷しきい値(LIDT)が極めて重要である。

高出力と高エネルギーレーザは、産業、学術および軍事に数知れないアプリケーションを生み出した。しかし、こうしたアプリケーションを可能にする同じレーザ特性によりこれらのレーザは、ビーム制御に使用するまさにそのオプティクスに損傷を与え、破壊する性質を持つ。それを受けて、光学設計者や制作者は、理論とアプリケーション(後者が特に重要)の両方に基づいて知識を蓄積してきた。これにより、時間経過とともに、着実にオプティクスのレーザ誘起損傷しきい値(LIDT)を上げることができた。これには、高出力および高エネルギーレーザで使用するための、コーティングも含まれる。

高LIDTオプティクスは、一般に、以下の1つまたはそれ以上を必要とする。レーザ波長で高透過性となり、内部欠陥が少なくなるように選択されたガラス。欠陥のサイズや数を最小化するために、特に重要な高品質表面処理(研削や研磨)。高LIDT準拠光学コーティング材料。欠陥を最小化するコーティング堆積技術。(これらLIDTの概念は、オプティクスを超えて、構造やオプトエレクトロニクスにさえ拡張可能といえる)。

LIDTのテーマは非常に広い。Laser Focus Worldは、LIDTを幅広くカバーしてきた(書評を含む)<sup>(1~7)</sup>。結果的に、製品に注力した高LIDT光学コーティングについてのこの短い記事は、これらコーティングの背後の科学や蓄積された英知を掘り下げることにはしない。代わりに、

商用製品の見本抽出を、メーカー提供品の背後にある技術的背景とともに紹介する。以下に市場で入手可能なものの実例をいくつか挙げている。

## 偏光光学コーティング

「ここで取り組んでいる高出力作業は、2つの要素からなる。狭帯域反射防止(AR)コーティングと非接合偏波ビームスプリッタキューブである」と米ソーラボ社(Thorlabs)オプティクス設計エンジニア、マイケル・ガートマン氏(Michael Gartman)は言う。「我々は、ハイパワー部品で清浄度がいかに重要であるかを評価している。したがって我々の部品のすべてが、クラス10,000のクリーンルームで出荷準備され、洗浄され、装荷されている。これらのコーティングは、ハフニアとシリカで構成され、LIDT低下となり得るイオンアシスト蒸着を用いることなく、電子ビーム蒸着されている。我々は、これらのコーティングを内部と外のレーザダメージベンダーの両方で大

規模にテストした」。

ソーラボ社の高LIDTコーティング技術を証明する製品ラインの一例として、ガートマン氏は、同社のハイパワーレーザラインPBSキューブを示す(図1)。キューブは、3つの主要Nd:YAG高調波向けに、また他の通常のハイパワーレーザライン、405nmおよび780~808nmレーザダイオード向けに設計されている。「レーザラインターゲットPBSキューブには、一般入手できるものよりも高い損傷しきい値という顧客要求がある。光学コーティングには幅広い社内知見があり、それにより接着剤なしの接続が実現できるので、そこにチャンスがあると当社は考えた」と同氏は話している。

クリーンルームで洗浄し、準備した後、パーツは同じ部屋で組付けし汚れを防ぐ。アセンブリ後、パーツはレーザ損傷テストを行い、結果がソーラボ社のWebサイトに公表される。「当社は、532nmと1064nmパーツでは、

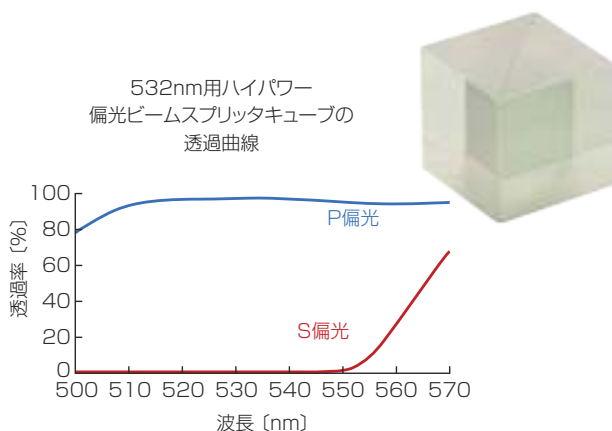


図1 532nm用にソーラボ社が作製した高LIDT偏光ビームスプリッタ(PBS)キューブの分光透過曲線は、偏光選択性を示している。1064nm用に設計された同様のキューブも、挿入図に示した。(提供:ソーラボ社)



図2 オプティマクス社のエンジニアは、光熱共通経路干渉計 (PCI) を使ってコーティングの吸収を計測する。(提供: オプティマクス社)

10nsで10J/cm<sup>2</sup>以上、355nmパーツでも3J/cm<sup>2</sup>を達成している。同時に光透過性と2000:1を上回る消光比を維持している」とガートマン氏は指摘している。「消光比、LIDT、およびパーツの組付の間にある程度の相互作用がでてくる。コーティングが厚くなれば、消光比は高くなるが、組付は難しくなり、LIDTが低下する可能性がある。そこには、ある程度のトレードオフが存在する。基板に石英ガラスを使うことも、結果的にある程度の設計トレードオフになる。PBSキューブに典型的であるが、高屈折率ガラスを使うと、帯域を広げ、消光比を高めることになる。しかし、石英ガラスのコーティングは、他のガラスに堆積したコーティングと比べると、損傷しきい値が高くなりがちである」と同氏は説明している。

PBS上のハイパワーコーティングにより、相対的に複雑な形状の結晶ポラライザに頼ることなく、使いやすいアッテネータが可能になる、とガートマン氏は話している。さらに同氏は、「PBSキューブは、ビームコンバイナとしてよく利用される。つまりサンプルビームを取り出すためである。しかしほとんどの顧客

は、それらをビームアッテネータとして単独または、半波長板の追加と組み合わせる」と話している。

### 慣性核融合のためのコーティング

「当社は、AR、ミラー、フィルタをパルス高エネルギーレーザとCWハイパワーレーザアプリケーションの両方に向けて製造している」と米オプティマクス社の光学コーティングマネージャー、ピート・クピンスキー氏 (Pete Kupinski) は言う。「最も厳しいパルスアプリケーションは、慣性核融合に典型的に見られる。そこではパルス幅がピコ秒からナノ秒であり、波長は深紫外 (DUV) から近赤外 (NIR) である。最も難しい高い平均パワーレーザアプリケーションは、典型的に軍事アプリケーションにある」と同氏は付け加えている。

クピンスキー氏の説明によると、同社が顧客から請け負った困難なプロジェクトはナノ秒範囲211nm波長であった。そのために、顧客は、その波長でのオプティクスとコーティングを要求した。これは、レーザ損傷なしで前例のないフルエンスを乗り切るためである。「このプロジェクトは、複数回の製品開発を必要とし、オプティマクス社と顧客の専門技術者が、その重責を負った。協力し合って、我々はその仕様を満たすプロセスに到達することができた。コーティング性能を継続して改善する作業は、現在進行中である」と同氏は話している。

上に述べたものも含めて、多くの高エネルギーレーザアプリケーションのためにオプティマクス社が認識していることは、クピンスキー氏によると、オプティクス研磨面とコーティングの両方で優れたエンジニアリングコントロールが極めて重要であることである。「最初の150nmガラスメンズ面の欠陥

と汚染の管理は、場合によってはコーティングと同様、極めて重要である。高エネルギーレーザアプリケーションでは、優れた性能は、細部にあることが多い。レンズ製造工程、レンズクリーニング工程、コーティング工程、コーティング設計、すべてのもののパッケージング。これらのアプリケーションで要求された工程管理を維持するために、オプティマクス社は、レーザ・グレード・オプティクス (Laser Grade Optics) グループという、この種のオプティクスを専門とする部門を設置している」と同氏は説明している。

同グループの計測器の1つが、光熱共通経路干渉計 (PCI、図2) である。これは、100万分の1以下までコーティングとガラスの吸収を計測できる。「Optimaxは、UVからNIRまでのアプリケーションで、

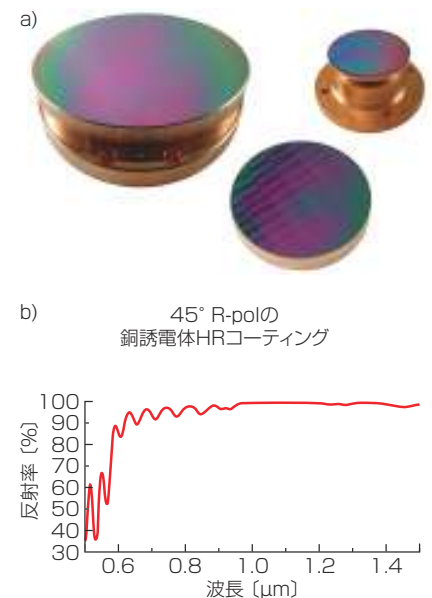


図3 II-VI社は、300mm径までの銅、アルミニウム、真鍮メッキのアルミニウムなど、金属基板向けに高LIDTコーティングを開発した。そのコーティングは、1030~1070nmスペクトル帯域で、表面反射率が $\geq 99.7\%$ 、600~700nm帯域で $\geq 80\%$ である。銅 (b) HRコーティングの反射率プロットは、45° R-polを示している。R-pol=(Rp+Rs)/2、ここではRp=p平面偏光、Rs=s平面偏光。(提供: II-VI社)

これらの計測を実施できる。我々の計測は、この種の計測を専門にする、米国およびヨーロッパの5研究所でベンチマークされている。低吸収は、高平均パワーレーザーアプリケーションでは、優れたレンズ性能にとって極めて重要である。LIDT原因だけでなく、利用する光学部品の加熱と歪を制限するためにも重要である」と同氏は話している。

## HRと他のコーティング

米II-VIレーザーソリューションズ社は、幅広い高LIDTオプティクスを製造している、と同社IRオプティクス担当副社長、スティーブ・ランメル氏(Steve Rummel)は言う。「ハイパワーCW(>10kW)ファイバレーザーアプリケーション向けにII-VI社は、銅またはアルミニウム(図3)などの金属基板用の高反射(HR)コーティングを開発した。このHRコーティングは、1070nm領域において $\geq 200\text{MW}/\text{cm}^2$ でテストされた。極紫外(EUV)リソグラフィなど、ハイパワーCO<sub>2</sub>レーザーアプリケーション向けには、被覆したダイヤモンドオプティクスが使用されている。反射防止(AR)コートダイヤモンドは、パルスLIDT $\geq 25.0\text{J}/\text{cm}^2$ および $2.5\text{MW}/\text{cm}^2$ 以上でCW LIDTを達成している」と同氏は説明している。

II-VI社の他の高LIDTオプティクスに含まれるのは、赤外レーザーアプリケーション用に設計された特注パルスコーティング、例えばAR、部分反射および全反射、ミラー(全反射)、位相シフトコントロール設計である、とランメル氏は指摘している。

「酸化強化高反射(HR)コーティングは、金属ミラー基板上の簡素な、あるいは複雑なダイヤモンド研削光学面を補完するために設計された。ファイバレーザー切断システムや溶接システ

ムの出力が増え続けているので、その種のエネルギーに対処できるコーティングが求められている」とランメル氏は話している。

同氏によると、ハイパワーファイバレーザー切断システムでは、水冷金属ミラーが>10kW範囲では安定性が高い。酸化強化HRコーティングは、ファセットミラーや可変半径ミラー(VRM)などの複雑なミラー形状をサポートする。これらは、こうしたレーザーシステムに柔軟性を付加するものである。このコーティングを持つビーム成形ミラーにより顧客は、複雑な切断アプリケーションの選択肢が得られるということだ。

## 材料加工オプティクス用コーティング

北米イエナオプティック・オプティカル・システム社(Jenoptik Optical Systems)社長、ジェイ・カムラー氏(Jay Kumler)によると、イエナオプティック社は、多くの自社製品向けに高LIDT光学コーティングを設計、製造している。「当社は、UV、可視、近赤外スペクトルバンド用の高LIDT ARコーティングの開発に積極投資してきた。特に高性能の特殊タイプコーティングは、355nmと266nm用のARコーティングである。これらは、Silverline f $\theta$

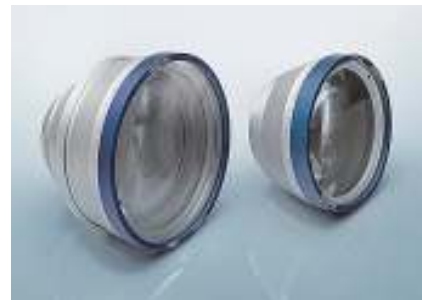


図4 イエナオプティック社製Silverline f $\theta$ レーザー材料加工レンズは、高LIDTコーティングであるので、レンズは、能動冷却なしで4kWまでのビームパワーに対処可能である。(提供:イエナオプティック社)

レーザー材料加工レンズで使われている(図4)。このアプリケーション向けに特に設計された、その高LIDTコーティングは、これらのレンズ寿命を延ばし、ターゲットに対する高均一性、高安定スポットに役立つ」と話している。

高LIDTは、短パルスレーザーを使用するときには特に重要である。高性能コーティングは、レーザー穴開け、穿孔、アニーリングなどのアプリケーションでは極めて重要である。「当社のSilverlineレンズは、能動冷却なしで4kWまでのビームパワーを取り扱える。これらレンズのコーティングが低LIDTであれば、レンズを頻繁に取り替えることになり、メーカーにとってはコストが跳ね上がることになる」とカムラー氏は指摘している。

## 参考文献

- (1) L. Gallais, "Optical materials withstand assault from high-power ultrashort-pulse lasers," Laser Focus World, 50, 6, 25-30 (Jun. 2014).
- (2) J. Wallace, "LIDT wavelength-scaling rule of thumb shown to be inaccurate," Laser Focus World, 51, 8, 9 (Aug. 2015).
- (3) J. Yager, "Advances in Optical Systems: How to apply laser-induced damage threshold (LIDT) test techniques," Laser Focus World, 52, 10, 25-29 (Oct. 2016).
- (4) G. Overton, "Laser Optics: Meter-class, high-LIDT optics meet petawatt, ultrafast requirements," Laser Focus World, 52, 12, 19-21 (Dec. 2016).
- (5) M. Thomas, "New laser-damage evaluation techniques boost testing capabilities," Laser Focus World, 53, 5, 27-30 (May 2017).
- (6) J. Wallace, "Combining optics surface-treatment techniques can boost the laser-induced damage threshold of fused silica," Laser Focus World, 54, 1, 12 (Jan. 2018).
- (7) J. Wallace, "Book Review: Laser-Induced Damage in Optical Materials," Laser Focus World online (Mar. 2015); <http://bit.ly/LIDTbookreview>.