材料の改善により レーザガラスが主流アプリケーションに

トッド D. イェーガー

希土類添加ガラスは、以前から大規模な国立研究所で基礎研究に利用されているが、材料特性の進歩が医療デバイス、天文や計測、材料加工アプリケーションでその利用を主流に押し上げつつある。

レーザガラス(LG)は、希土類イオンを添加した伝統的なアモルファスガラスで構成されており、LG680、LG750、LG940(**図1、2**)などショット社(SCHOTT)の様々な処方設計で利用できる。処方設計は、その基礎ガラス材料(リン酸塩ガラスまたはケイ酸塩ガラスが多い)、また活性添加イオン、イオンレベルで変わる。レーザガラスをハイパワーレーザシステムの基盤にする同じ特性の多くが、レーザガラスを日常使用の申し分のない材料にしている、材料の均一性、ピークパワー出力、拡張性、コスト効果などである。

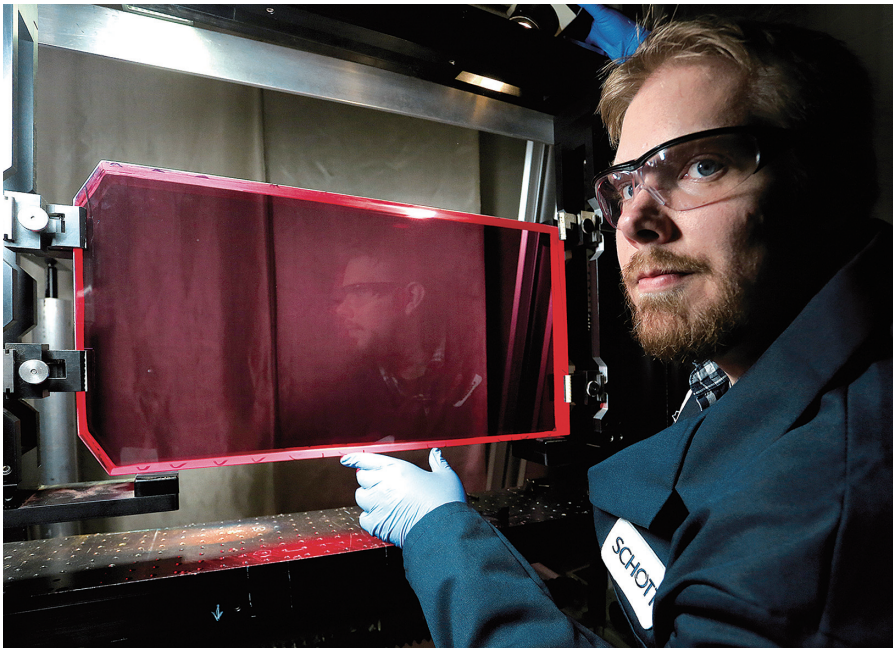

図1　LG760レーザガラススラブに対して、干渉分光法テストを行い、ガラス仕上げの品質を調査する。ショット社は、このカルシウムーバリウムーアルミーリン酸塩ベースのガラスをペンシルベニア州デュリエで生産している。

レーザガラスの特性

ネオジウム添加リン酸塩レーザガラスの高い均質性、メートルクラスのスラブが現在、国立点火施設(NIF)、レーザメガジュールプログラムで使用されている。また全ての市販レーザガラスタイプは大口径レーザシステム用に製造可能である。このようなシステムでは、スラブかロッドを使って、高いピークパワーのレーザパルスを生成する。そのような大口径レーザガラス部品をベースにして成功したプロジェクト例には、エクストリーム・ライト・インフラストラクチャー(ELI)、アポロン、神光(Shenguang)、GIST、ビームレット、メガジュール、VULCANおよびPHELIXがある。

非結晶固体として、ガラスは純度および均一性では非常に高い水準で製造することができる。サイズや形の制約は最小限であり、直ぐに提供できる標準サイズは最大800×400×60mmである。結晶性材料ならばより高い繰り返しレート、一段と高い平均出力をサポートできると言われるが、大口径に成長すると法外に高価になり、またエネルギー蓄積能力はレーザガラスほど大きくはない。

ネオジウム(Nd)添加リン酸塩と他のタイプの希土類元素を添加したガラスについての研究が、ピークパワーと波長の限界を押し上げつつある。ペタワットパルス出力方法は、過去十年来知られていたが、最先端の開発は現在、エクサワットパルスレーザのソリューションを検討している。このようなアプリケーションには、広い発光域が好まれる、この種の発光域で光パラメトリックチャープパルス増幅(OPCPA)が非常になっているからである。

柔軟なプロトタイピングや製造工程によって、ガラスベースのレーザを使った特殊アプリケーション向けで、コ

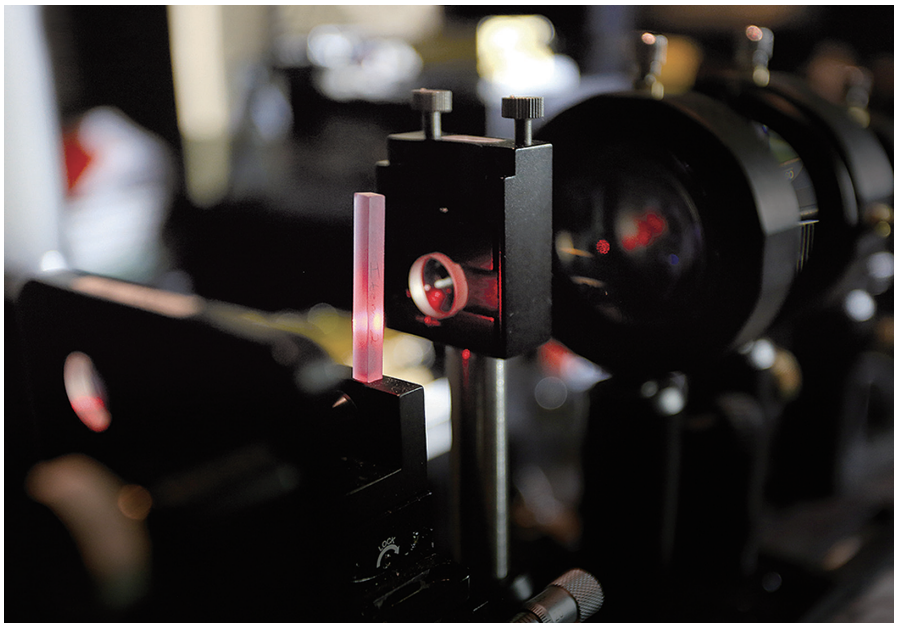

図2　レーザキャビティ性能試験を行うリン酸塩レーザガラスを示している。

スト効果の優れたカスタムレーザガラスやコンポーネントの製造が可能になる。それに対し結晶では、イオン添加で均一な濃度プロファイルを得ること、高レベルドーピングを達成することは非常に難しい。例えば、結晶性材料で>15×10^{20} Yb^{3+}ions/cm^3のドーピングレベル達成は難しい。

歴史的に、ガラスの欠点の1つは希土類添加結晶に比べて低い熱伝導性であったが、温度の関数として低屈折率変化（低dn/dT）のガラス開発で飛躍的な進歩があった。これによって熱レンズが避けられ、全般的に優れた熱機械性能指数が得られる。例えば、APG-1ガラス、$dn_{rel}/dT_{(20-40)}=1.2\times10^{-6}$/Kが達成可能である。

新しいガラス母材、コスト効果の優れた小ロットの溶融量で活性ドーパントの組合せを利用することで、潜在的なレーザガラスアプリケーションの範囲が近年飛躍的に広がった。それはもはや単にエクサワットレーザではなく、実際、レーザガラスは大規模アプリケーションを超えて、日常利用に入ってきている。

ハイパワーレーザ研究を超えて

LG680とLG7xxファミリなどの特殊タイプのレーザガラスは、相対的に発光帯域幅が広くエネルギー蓄積が効率的であることから、ペタワットのピークレーザパルスをサポートする（**図3**）。製造プロセスは完全スケーラブルであり、結果として得られるガラスは従来の光学加工を使用して仕上げることができるので、上述のようにNIF、レーザメガジュール、ELIピラーのような極端に大きなシステムでの利用に最適の材料である。これらは、これまでに導入された中で最高出力システムであり、次世代には10～20PWのオーダーになる。

それほど大きなパワーを用いると、中性子、陽子、X線を効率的に生成できる。例えば、チェコのELIホワイトブック（参照 http://bit.ly/1cLZqjp）に記載されているように、その構造はプラズマ生成や自由電子加速（ウェイクフィールド）に関係している。

このようなシステムの最終目標は単なる基礎研究ではない。例えば、微細な亜原子粒子の流れはガン腫瘍に焦点を合わせることができるので、放射線障害を最小に抑えることができる。中性子あるいはX線ビームは車輌をスキャンし、亜原子粒子とオンボードの材料との相互作用を分析することで核爆発装置や他の有害なものを検出することができる。また、ハイパワーレーザビームは、ダイレクトドライブと慣性核融合の両方で三重水素ターゲットに作

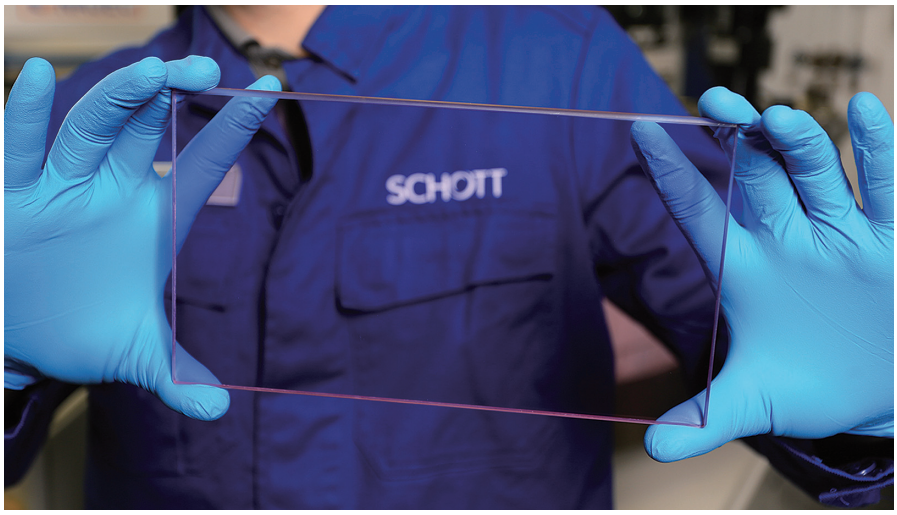

図3　LG760リン酸塩ベースレーザガラスの完成精密部品は、一般に高エネルギーアプリケーションで使用される。

用して非常に大きな圧力を加え、ターゲットが崩壊し、水素が溶けてヘリウムになり膨大な量のエネルギーを放出するようにすることができる。

とは言えこのように明確な高エネルギーアプリケーションだけでなく、2、3例を挙げると、レーザガラスは今では、材料加工、医療、R&Dで多くの本流の応用に役立っている。

レーザ衝撃ピーニング

鍛冶屋が鋼鉄を加熱して刀を造る場合を考えると、ハンマーで鋼鉄を打ち、水に入れて冷却し、さらにその工程を反復する。この方法は、ピーニングと言い、鋼鉄に応力を加え、脆弱な箇所を除去し最終製品を強化する。レーザ衝撃ピーニングは同じプロセスであり、ハイパワーネオジウムレーザで金属をうち、同時に水などの液体でそれを冷却する。

このプロセスは、応力と力を材料に加え、早期故障の原因となる疲労を防ぐ。その結果、パーツは長期にわたり確実に使え、コスト節約に寄与し、作業環境がより安全になる。例えば、ボーイング747航空機の翼は、レーザ衝撃ピーニングプロセスを使って造られている。

翼は金属薄板として始まり、パルスレーザが特殊パターンで金属表面全体をラスタスキャンし、材料の片側に応力を与え曲げる。このプロセスは、ジェットエンジンタービンの特殊箇所にも適用され、高応力箇所での故障を防ぎ、そのようなエンジンとジェネレータの寿命を何千時間も延ばす。

美容医療

スピード、パワー、利用可能な豊富な波長により、レーザシステムは美容と外科的処置の両方の診療機関に入って来た。かつて必要とされていた、入院手術、高コスト、長期の快復時間、感染リスクは、診療所で経済的に、短時間ですませ、自宅療養できるようになっている。

様々な美容アプリケーションで効果を決めるには、レーザの波長が重要な要素である。例えば、1μmレーザシステムは皮膚を焼き、瘢痕化し、快復期間が長引く。また、人の網膜にも障害をもたらす。

多くの医療機器メーカーが現在、エルビウム・イッテルビウム添加ガラスで作成したアイセーフ1.5μmガラスレーザを供給している。このLG940アイセーフレーザガラスは、エルビウム・イッテルビウム・クロム・セリウム添加リン酸塩ベースレーザガラスで、フラッシュランプ励起およびダイオード励起固体（DPSS）レーザシステムで使われている。リン酸塩ガラスでは一般に希土類ドーパントの溶解性が高いので、活性イオンの量を大幅に増やすことができる。また、波長が長くなるほど、皮膚の若返り術で、浸透の深さが大きく、より制御性の高い切除プロセスが可能になる。さらに、これは角膜にしか損傷を与えないので、人の目に安全である。角膜は必要なら手術で元に戻すことができる。

1.5μmレーザは、部分的な皮膚アブレーションや静脈瘤、ニキビの跡を除去する皮膚再生で特に成功を見いだしつつある。レーザを単一の焦点に集中するのではなく、ビーム（一般的なパルス幅10～20ms、パルスエネルギー5～100mJ）が、レーザを複数点に広げるマイクロレンズアレイを透過する。このビームアレイは、次に皮膚表面をラスタスキャンし、特定光波長の吸収に基づいて皮膚を処理する。1540nm、および、アプリケーションによって、2940nmまたは532nmをサポートしている。これによって皮膚の最上層をアブレーションする。皮膚の治癒にともない、患者は損傷や変色のない滑らかな皮膚を取り戻す。

これは、皮膚剥離や短波長レーザなどの競合技術とは対照的である。競合技術では、苦痛が増し、感染リスクがある。1.5μmレーザの利用により治癒が速くなり、感染リスクが減り、医師にも看護師にも患者にとっても安全である。

関連するアプリケーションとしてはレーザタトゥー除去がある。タトゥーには多くの多様な色が使われているので、様々なインクの色に存在するナノスケールの金属粒子を破壊するには多様な光波長が必要になる。現在、タトゥー除去に使われるレーザシステムは、1台のレーザシステムに組み込まれた複数の利得材料を使用する。そのようなシステムは、オールインワンレーザと言えるが、実際には532、755、1064nmの波長しか使っていない。

ショット社の新しいブロードバンドレーザガラス（BLG）は、1μm波長周囲の80nm帯域でチューナブルである。結晶材料でできた従来のYAGシステムは、基本モードとその高調波でせいぜい5～10nmの帯域に対応しているが、このリン酸塩ベースのレーザガラスからの光は赤外の80nmが提供できる。これは、さらに周波数逓倍で広帯域グリーン、また周波数3逓倍で近紫外光を出せる。

BLGをアレクサンドライトレーザで励起すると、残留励起ビームが基本モード、高調波ビームと結合して多波長をカバーするシステムが実現する。したがって、そのレーザシステムはタトゥーの色にカスタマイズできるので、より実用的なツールとなる。また、（願わくば）迅速かつ苦痛の少ないタトゥー

除去が可能になる。

眼科

BLGのもう1つのアプリケーションは放射状角膜切除術（RK）である。これは、近視矯正に使用する医療処置で、極短パルスレーザを必要とする。物理法則によると、極短パルス光を生成するには、かなり広い帯域を必要とする。これら2つは相互に反比例するので、帯域が広いほど、パルスは短くなる。

BLGにより、極めて複雑なシステムと比べて、レーザメーカーは簡素なレーザアーキテクチュアを設計することができる。複雑なシステムでは、1つのレーザシステムが別のシステムを励起することが必要になるが、簡素なシステムはBLG利得材料のダイレクトダイオードあるいはフラッシュランプ励起でよい。150～100fsのパルス幅が可能で、これは熱エネルギー転移時間よりも遙かに短い。これにより、そのレーザを使って、組織に損傷を与えることなく角膜を切除することができる。

レーザ測距

過去においてレーザ測距（光検出とライダシステム）、飛行時間システムはダイオードもしくはYAG結晶レーザシステムを使用していた。これらはそれぞれ欠点がある。ダイオードシステムではビームの開きが大きくなり、ビームプロファイルが劣化して測定精度に影響する。またYAGベースのシステムは、目に損傷を与える波長で動作するので、開放環境での利用は危険である。加えて、能動冷却して温度に関連するビーム不安定性を緩和する必要があり、レーザシステム全体のサイズと重量が大きくなる。

こうした理由から、レーザ測距用の利得材料としてアイセーフレーザガラスを採用する動きがある（**図4**）。例えば、1.5μmで発振するエルビウム・イッテルビウム（Er-Yb）リン酸塩ガラスは、目のレンズを透過できないので、網膜に損傷を与えることはない。以前は、Nd:YAGレーザが使われることが多かった。これは目に悪影響を与える1064nm波長で動作する。それに対し、1540nmの光は、その吸収特性により人の目に到達することはないので、網膜にとって安全、つまりアイセーフである。

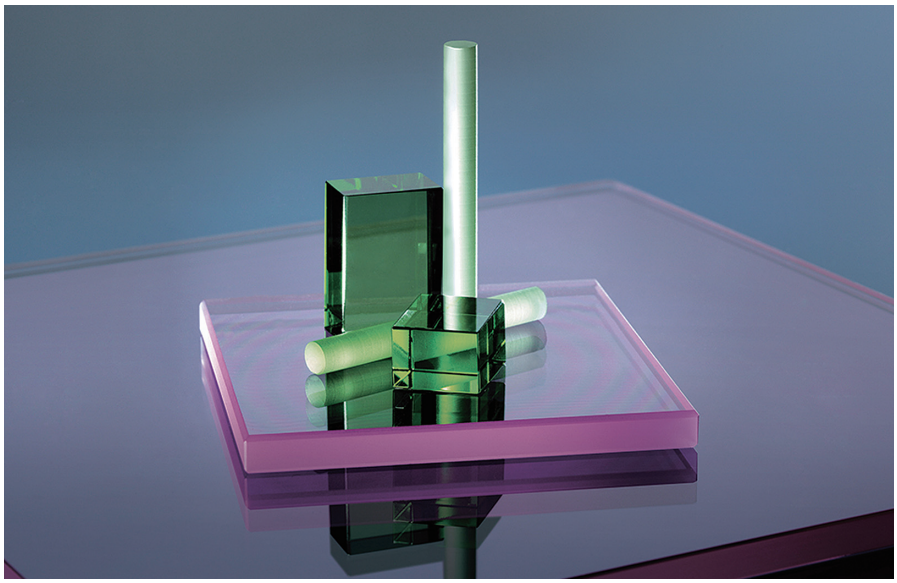

図4　ショット社は、レーザ測距や医療アプリケーション用のハイパワー、超短レーザパルス向けにアクティブおよびパッシブレーザガラスを提供している。これらの材料は、アクティブレーザ媒質および診断フィルタとして使うネオジウム添加レーザガラスと特殊フィルタガラスから、最高精度を必要とするレーザアプリケーション用の超安定ガラスセラミックまでの幅がある。

このようなアイセーフガラスシステムは、安全なオプションであり、これらは効率、ビーム品質、たとえ数マイルでも精度の点で最高パフォーマンスを提供するので、道路建設、建築、天文学では月レーザ測距、大気センシング、2Dおよび3Dマッピングアプリケーションでは、洞窟の地図作製、史跡やビルの地図作製などのアプリケーションに対して完璧である。

Er-Yb添加リン酸塩ガラスを使用する距離計は、キャビティデザインに能動温度安定機構を付けなくても−30～80℃まで安定したパフォーマンスを実証している。パッシブQスイッチベースのデザインで、こうしたシステムは超コンパクトに、大抵の場合、米国の25セント硬貨程度にできる。高精度仕上げのマイクロサイズチップは一般に、特殊レーザデザインに最適化された、希土類不純物プロファイルとともに用いられる。

レーザガラスが、非常に大きなレーザシステムでできることの限界を押し上げることは確実であり、また日常的なアプリケーションでも利用が増加している。これは、そうしたレーザガラスが結晶媒質に対する明確な利点があるからである。例えば、製造工程が容易、ドーピングレベルが高い、均質性レベルが高いなどである。

著者紹介
トッドD. イェーガー博士は、北米ショット社のレーザと光学コンポーネントの先端開発販売マネージャー。e-mail: todd.jaeger@us.schott.com　URL: www.us.schott.com

LFWJ