

Yb 添加セラミックレーザー材料

柳谷 高公・八木 秀喜

Ytterbium-Doped Ceramic Laser Materials

Takagimi YANAGITANI and Hideki YAGI

Ytterbium-doped ceramic laser materials are promising candidates for a high-power laser or a high-power ultra-short-pulse laser, because they have several advantages, such as broad emission spectrum, highly quantum efficiency, scalability, and so on. In this paper, the optical and laser properties of Yb-doped garnet ceramics and sesquioxide ceramics were reviewed.

Key words: ceramic laser material, Yb lasers, YAG, sesquioxide ceramics, solid-state lasers

固体レーザー材料には、高い熱伝導率や機械的性質、光学的均一性などの基本物性もさることながら、レーザーのさらなる高出力・高効率化、高品質化のため、結晶の大型化やコンポジット化などの材料技術も要求されている。これらの観点から、既存の単結晶もしくはレーザーガラスに代わる素材として、非溶融の焼結法による透明（多結晶）セラミックレーザー材料が近年注目を集め¹⁾、すでに実用材料として認知されつつある。セラミックレーザー材料の開発は、当初レーザー発振の容易さから Nd 系材料、とりわけ Nd:YAG を中心に進められてきたが^{2,3)}、最近では YAG のみならず、同じガーネット系ディスオーダー結晶である YAG (Y₃ScAl₄O₁₂) や⁴⁾、高融点材料であるため既存の単結晶製造技術では良質の大型結晶を作製することが困難な sesquioxide (Y₂O₃, Lu₂O₃) セラミックス^{5,6)} など、結晶構造が立方晶系に限定されてはいるが、新規なセラミックレーザー材料ならびにそれらのレーザー特性が多数報告されている。

一方、Yb 系固体レーザー材料は、従来広く用いられている Nd 系材料と比較して、(1) 量子効率が高い、(2) 発光・吸収スペクトルがブロードである、(3) 蛍光寿命が長くアップコンバージョンがない、などの特徴を有している。Yb 系レーザーは準三準位系であるため、その発振に

は高密度な強励起を必要とするが、近年励起用半導体レーザー (laser diode: LD) の高輝度化技術の進歩に伴い、単に研究用のみならず産業応用を目指した光源開発が盛んに行われるようになってきた^{7,8)}。

Yb 添加セラミックレーザー材料としては、これまでに YAG⁹⁻¹¹⁾、YSAG^{12,13)}、sesquioxide¹⁴⁻¹⁹⁾、yttrium lanthanum oxide ((Y_{0.9}La_{0.1})₂O₃)²⁰⁾ などが開発され、すぐれたレーザー特性が報告されている。本稿では、これらセラミックス材料の製法と特徴を解説し、高出力化、超短パルス化を目指したセラミックレーザー開発の現状について紹介する。

1. Yb 添加セラミックレーザー材料

1.1 セラミックレーザー材料の製法

従来、セラミックスは不透明であると考えられていたが、これはセラミックス内部に気孔や異相、結晶粒界面の偏析層といった光散乱源が存在するためである。したがって、これら光散乱源を極限まで低減することにより、レーザーグレードの光学品質を有する（透明）セラミックレーザー材料の作製が可能となる。これまでにセラミックレーザー材料の作製方法は多数報告されているが、本質的には使用する原料粉末の状態により異なり、固相反応法と湿式

神島化学工業(株)セラミックス部 (〒769-1103 三豊市詫間町香田 80) E-mail: yanagitani@konoshima.co.jp

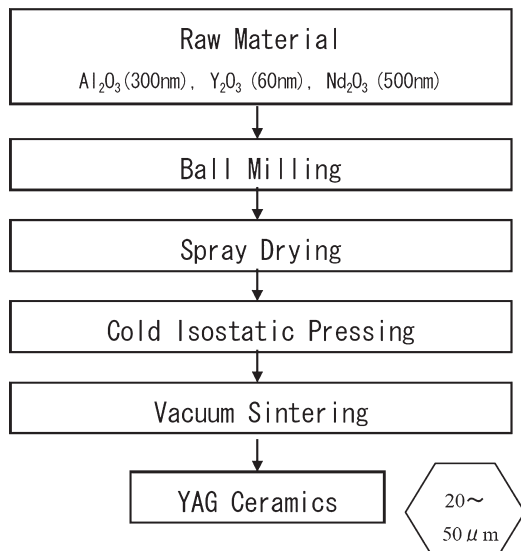


図1 固相反応法による YAG セラミックス製造プロセス。

合成法の2つに分類される。ここでは、代表的なセラミックレーザー材料である YAG セラミックスを例にその概略を紹介する。

1.1.1 固相反応法

固相反応法²⁾によるセラミックス製造プロセスの概略を図1に示す。出発原料としては、YAGを構成する単純酸化物である酸化イットリウム (Y_2O_3) と酸化アルミニウム (Al_2O_3) を用いる。これらの単純酸化物同士を分散剤やバインダーとともにボールミル混合した後、スプレードライヤーを用いてハンドリング性のよい $50\ \mu\text{m}$ 程度の顆粒とし、冷間静水圧プレス (CIP) 法により成形した後、最終的に真空焼結を行うことで YAG セラミックスが作製される。本手法では、焼結と同時に YAG 化合物への反応も進めており、この反応を促進するために Y_2O_3 の超微粉末を用いているが、YAG 単一相とするため、比較的高温で長時間焼結する必要が生じる。そのため、セラミックスを構成する個々の結晶 (グレイン) サイズは、 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ と比較的大きなものとなることが特徴として挙げられる。きわめて簡便な手法であることと新規材料開発への応用が容易に可能であるため、同様の手法により、YSAG^{4,12,13)}, yttrium lanthanum oxide²⁰⁾ セラミックスなどの開発例が多数報告されている。

1.1.2 湿式合成法

湿式合成法では^{1,3)}, YAG 組成の原料微粉末を予め湿式化学的手法により作製しておくことを特徴とする。図2には、筆者らが用いている一連の製造プロセスを示す。具体的には、まず塩化イットリウムおよび塩化アルミニウム水溶液を YAG 組成に混合し、この溶液を重炭酸アンモニウ

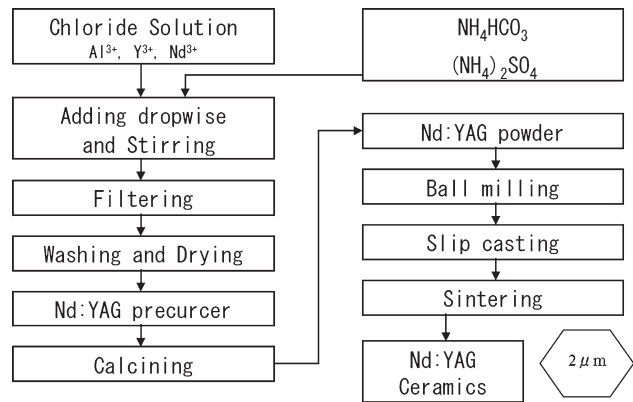


図2 湿式合成法による YAG セラミックス製造プロセス。

ム (NH_4HCO_3) 水溶液に添加して沈殿物を生成させ、ろ過、水洗を数回繰り返した後、 200°C で約2日間乾燥することで YAG 前駆体を作製する。この湿式反応により Y, Al イオンは原子レベルでの均一混合が可能となり、得られる前駆体は粒径の揃ったナノ粒子となる。この前駆体を大気中約 1200°C で仮焼することで、YAG 単一相原料粉末が得られる。得られた YAG 原料粉末は、分散媒、そして分散剤やバインダーとともにボールミル混合され、スラリー (泥漿, スリップともよばれる) とした後、多孔質成形型に流し込まれる。スラリー中の水分は多孔体に吸水されるため、乾燥後は固形分のみの成形体となる。鑄込成形 (スリップキャスト) 法とよばれるこの手法では、スラリー内の粒子は毛管力と重力によって再配列され成形体となるため、一般的なプレス成形と比較して高密度で均質な成形体の作製が可能となる。最後にこの成形体を熱処理による脱脂後、真空中 ($<10^{-3}\ \text{Torr}$) 約 1700°C にて数時間焼成を行うことで、透光性 YAG セラミックスが作製される。図3には、本手法により作成された大口径 ($\phi 110\ \text{mm}$) Yb:YAG セラミックスを示す。また、同様の手法により、高融点材料であるため従来の結晶育成技術では大型かつ良質結晶を作製することが困難であった、 Y_2O_3 , Lu_2O_3 , Sc_2O_3 セラミックレーザー材料も作製可能となっている。

原料粉末として易焼結性 YAG 単一相微粉末を用いる本手法では、緻密化さえ完結すればよいことから、比較的小きなグレインサイズ (数 μm) からなるセラミックスの製造が可能となる。

1.2 Yb 添加セラミックス材料の特性

これまでに報告されている Yb 添加セラミックス材料の各種パラメーターを表1に示す。なお yttrium lanthanum oxide セラミックスに関しては²⁰⁾, Y_2O_3 とほぼ同等であるためここでは割愛した。また、図4には Yb 添加 YAG および sesquioxide (Y_2O_3 , Lu_2O_3 , Sc_2O_3) セラミックス

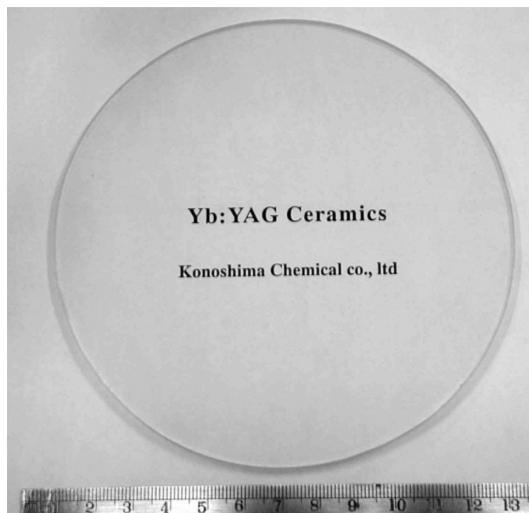


図3 大口径 Yb:YAG セラミックス ($\phi 110$ mm).

の室温での吸収・発光スペクトルを示す。

一般的にレーザー材料には、その高出力高効率化のため高い熱伝導率が要求されている。代表的な Yb 添加レーザー材料としては、KYW, YVO_4 , S-FAP, YLF および YAG が挙げられ、これらの熱伝導率はそれぞれ、3.3, 5.2, 2.0, 6.2, $10 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 程度である²¹⁾。sesquioxide セラミックスは、YAG よりもさらに高い熱伝導率を有する材料であり、とりわけ Lu_2O_3 は、Yb 添加による熱伝導率低下の影響がきわめて少ないため²²⁾、高出力レーザー材料として今後の発展が期待されている。また、sesquioxide セラミックスは、高い屈折率および非線形屈折率もその特徴のひとつとして挙げられる。この高い非線形性は、例えば核融合ドライバーのような大口径大出力レーザーにはビーム自己収束による問題のため不適であるが、モード同期レーザーにおいては、高い非線形屈折率は自己位相変調による発振波長の広帯域化が可能となり、カーレンズ効果が起こりやすくなるため、超短パルスレーザー材料としては有利な特性である。

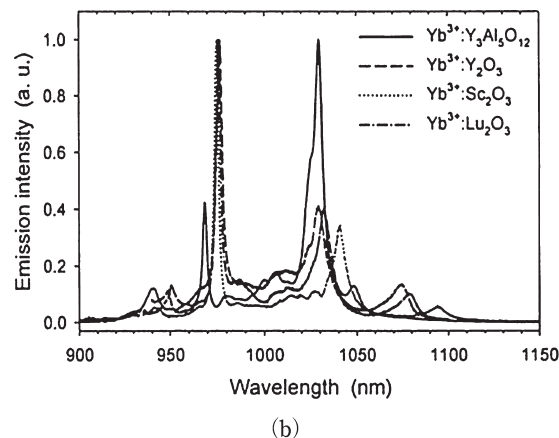
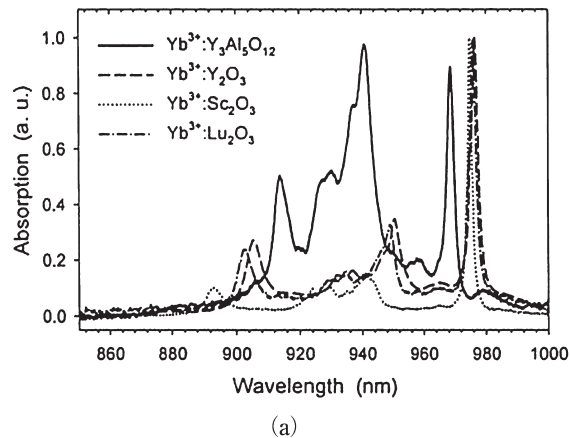


図4 Yb 添加セラミックス材料の吸収・発光スペクトル。(a) 吸収スペクトル, (b) 発光スペクトル。

分光特性としては、 Yb^{3+} イオンは 940 nm 付近に広帯域な吸収を有しており、例えば YAG および YAG の吸収幅はそれぞれ 20 nm, 22 nm である。この値は Nd:YAG の吸収幅 (1.2 nm) の 15 倍以上であり、励起用 LD の波長変動抑制のための温度制御が不要となる。一方、sesquioxide の場合、976 nm 付近に強い吸収ピーク (ゼロフォノン線) を有しているが、その吸収幅は 1.8~3.1 nm と狭く、この吸収ピークを LD 励起する場合にはその温度

表1 Yb 添加セラミックス材料の物性値。

	YAG	Y_2O_3	Lu_2O_3	Sc_2O_3	YSAG
融点 (°C)	1930	2430	2450	2430	—
熱伝導率* ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	11	14	12	17	—
発光ピーク波長 (nm)	1030	1031	1032	1041	1031
蛍光幅 (nm)	8	15	13	11.5	12.5
誘導放出断面積 (10^{-20} cm^2)	2.1	1	0.93	1.3	1.4
吸収ピーク波長 (nm)	941	976	976	975	942
吸収幅 (nm)	20	3.1	3	1.8	22
吸収断面積 (10^{-20} cm^2)	0.7	3.5	3.2	8.3	0.67
屈折率* (@532 nm)	1.83	1.92	1.93	2.01	—
非線形屈折率*	2.49 ± 0.70	5.79 ± 1.45	3.96 ± 1.77	5.32 ± 1.33	—

*undoped material. YSAG: $Y_3ScAl_4O_{12}$.

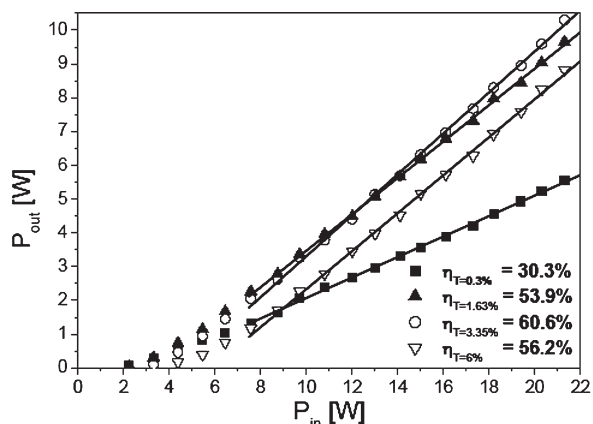


図5 20% Yb:YAG セラミックスの thin-disk laser 発振特性.

調節が必要となる。しかしながら、940 nm 帯よりも数倍大きな吸収であるため、976 nm 励起では、940 nm 励起よりも弱い励起強度で吸収を飽和させることが可能であり、理論上は 94% 以上の高い量子効率、高効率動作も可能となる。

Yb 系材料のレーザー発振波長はおおむね 1030 nm であり、吸収特性同様広帯域な発光特性を有している。例えば Yb:YAG の蛍光幅は、Nd:YAG のそれと比較して約 10 倍程度広く、さらに Yb:Y₂O₃ では YAG の約 2 倍の蛍光幅を有している。そのため、超短パルスレーザーへの応用以外にも、例えば波長可変動作への応用が期待され、sesquioxide セラミックスの波長可変特性がすでに報告されている^{23,24)}。

2. Yb 添加セラミックレーザー

2.1 Yb:YAG セラミックス

Yb:YAG レーザーは、励起波長が 940 nm に対し発振波長が 1030 nm であるためその量子効率は 91.4% となり、理論上 Nd:YAG と比較して高効率レーザーの実現が可能となる。そのため 1991 年の Fan らによる室温での発振報告²⁵⁾以降盛んに開発が行われ⁷⁾、高性能励起用 LD の普及も相まって現在では基礎研究用のみならず一般産業用レーザーにまで広く応用されている。一方、Yb:YAG セラミックレーザーは、2003 年高市らが 1% Yb:YAG セラミックスを用いたレーザー発振試験を行い、レーザー出力 345 mW、スロープ効率 26%⁹⁾をはじめ報告している。これ以後、高出力・高効率化を目指した Yb:YAG セラミックレーザー開発が現在まで盛んに行われている。

Dong らは、9.8% Yb:YAG セラミックスを用いたマイクロチップレーザーを報告している¹⁰⁾。詳細は以下の通りである。セラミック試料(試料厚み 1 mm)の片面には

AR@940/HR@1030 nm, 反対面には AR コートを施し、透過率 10% の O.C にて共振器を構成した。励起源には fiber coupled LD (@940 nm, コア径 100 μm, NA 0.22) を用い、焦点距離 8 mm のレンズ 2 枚によりセラミック端面に励起光を集光した。その結果、最大 1.73 W ($M^2 \sim 1.1$) の CW 出力がスロープ効率約 79% の高効率で実現された。これは、空冷式室温発振としては非常に良好な結果であり、Yb:YAG セラミックスのポテンシャルの高さを示唆している。

現在盛んに開発が行われている Yb:YAG を用いた thin-disk レーザーの高出力・高効率化のためには、励起光を十分吸収させると同時に発生する熱を排除するためレーザー媒質をできるだけ薄くする必要がある。Yb:YAG の場合、Yb³⁺ のイオン半径が Y³⁺ のそれと近いため、Nd³⁺ 添加の場合とは異なり理論上は 100% 置換した YbAG の製造も可能であり、さらに Yb³⁺ の高濃度添加による濃度消光が起こりにくい。しかしながら、現実には光学特性にすぐれた良質の高濃度 Yb 添加 YAG 単結晶を作製することは容易ではないため、高濃度 Yb 添加 YAG セラミックの開発が強く求められている。

これまでに 20% Yb:YAG セラミックスが試作され、thin-disk laser によるレーザー特性が報告されている²⁶⁾。厚さ 100 μm で研磨・コーティングを施した 20% Yb:YAG セラミックスに波長 940 nm の fiber coupled LD (コア径 400 μm, NA 0.22) で励起 (spot size 800 μm, 24 pump passes) した場合のレーザー特性を図 5 に示す。約 10 W のレーザー出力が 60% 以上の高いスロープ効率で実現されている。一方、比較のため高濃度 Yb (16.5%) : YAG 単結晶を用いた発振試験では、最大で 38.1% のスロープ効率しか得られておらず、セラミックの優位性が実証されている。

高濃度 Yb 添加セラミックと単結晶のレーザー特性の差については今後詳細な検討が必要ではあるが、単結晶は融液を急冷して育成されていることと関連しているものと考えている。ごく最近、筆者らは 10% Yb:YAG 単結晶数本を真空下、1800°C に加熱する機会を得た。加熱後の単結晶は、その程度は異なるが、すべての結晶内部に光散乱源が発生し、失透していた。この原因に関しては、今後詳細に検討を行いたいと考えている。

高ピークパワー化を目指した自己 Q スイッチレーザー用としては、これまでに Cr⁴⁺:YAG/Yb:YAG コンポジットセラミックが開発され、ピーク出力 0.7 MW が $M^2 < 1.09$ の高ビーム品質で実現されている²⁷⁾。コンポジット化はセラミックの特徴のひとつでもあり、エッジ励

起マイクロチップレーザー用に YAG/Yb:YAG コンポジットセラミックスなども開発され、そのすぐれたレーザー特性が報告されている²⁸⁾。

ところで、YAG 以外のガーネット系材料として、YAG の Al の一部を Sc に置換した Yb:YSAG ($Y_3AlSc_4O_{12}$) セラミックスも開発されている^{12,13)}。いわゆる disordered (混合系) 結晶とよばれるものであり、その組成比により吸収・発光スペクトルを調整することが可能である。齋川らは、Ti:sapphire レーザーを励起源として用いた Yb:YSAG セラミックレーザー発振試験を行い、最大出力 600 mW、スロープ効率 72% を報告している。また同時に、モード同期発振試験も行われ、最短パルス幅 380 fs の短パルスレーザーが報告されている。

2.2 sesquioxide セラミックス

sesquioxide 結晶は YAG をしのぐ高い熱伝導率を有するため、ハイパワーレーザー結晶として古くから注目されているが、その融点が 2400°C 以上ときわめて高温であるため、良質かつ大型単結晶を作製することは困難であった。一方、セラミックスは、融点以下の低温で焼結することにより作製されるため、近年の透明セラミックス製造技術の進歩により、実用的な sesquioxide セラミックレーザー材料およびその特性が多数報告されている。

Yb 系セラミックレーザーとしては、Yb:Y₂O₃ セラミックレーザーおよびその特性が、2002 年 Lu らによりはじめて報告されている²⁹⁾。当初 400 mW 程度であったレーザー出力も次第に向上し、厚さ 3 mm の 8% Yb:Y₂O₃ セラミックスを用いた室温での LD 励起 (@937 nm) 発振試験では、9.2 W のレーザー出力が 41% のスロープ効率で実現されている¹⁴⁾。同様に、Yb:Lu₂O₃¹⁵⁾、Yb:Sc₂O₃¹⁶⁾ セラミックスにおいても、そのレーザー発振がすでに報告されている。特に Yb:Lu₂O₃ セラミックレーザーでは、Yb 添加濃度が 3% と比較的低濃度であるにもかかわらず、室温 LD 励起 (@976 nm) にて 50% 以上のスロープ効率を達成している。

これらのセラミックレーザーはまだ開発の途についたばかりであり、今後セラミックス材料のさらなる高品質化、レーザー設計の最適化などによる高出力化が期待される。

2.3 超短パルスセラミックレーザー

2003 年、白川らによる LD および半導体可飽和吸収ミラー (SESAM) を用いた Yb:Y₂O₃ セラミック超短パルスレーザーの報告以降³⁰⁾、Yb 添加セラミックレーザー材料の超短パルスレーザーへの応用研究が盛んに行われるようになってきた。特に sesquioxide セラミックスは、その結晶場の特徴からスペクトルのエネルギーシフト、分裂が

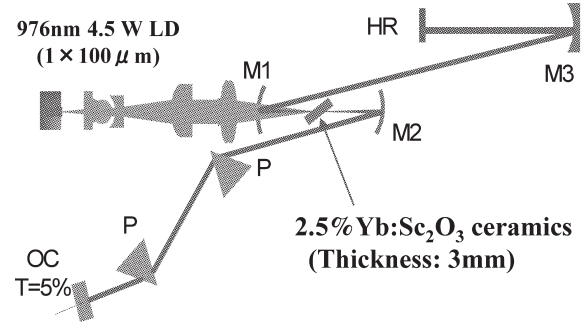


図6 カーレンズモード同期 Yb:Sc₂O₃ セラミックレーザーの実験配置図。

大きいという特徴をもっており、既存の Yb:YAG の数分の 1 の超短パルスを発生しうる能力を有している³¹⁾。またさらに、セラミックスは単結晶と比較して強励起に耐えうる機械的性質を有しているため、高輝度 LD の技術的進歩に伴い、LD で直接励起可能な高平均出力フェムト秒セラミックレーザー光源の開発が期待されている。

SESAM を用いたモード同期超短パルスセラミックレーザーとしては、Yb:Y₂O₃ および Yb:Lu₂O₃ セラミックスにより、パルス幅ならびに最大出力がそれぞれ、188 fs・220 mW、357 fs・357 mW の超短パルス化がこれまでに実証されている^{17,32)}。

また最近では、さらなる超短パルス発生を目指して、カーレンズモード同期³³⁾によるセラミックレーザーの開発も進められている^{18,19)}。この手法は、レーザー媒質中のレーザー光強度が大きくなるとレーザー光の自己収束が生じるという、光カーレンズ効果を利用したものであり、非常に高い応答速度と緩和時間をもち、より短パルス化が可能となる。そのため、LD 直接励起で 100 fs 以下の超短パルスセラミックレーザーがすでに実現されている^{18,19)}。

図6は、2.5% Yb:Sc₂O₃ セラミックス (厚さ 3 mm) によるカーレンズモード同期発振試験の構成を示す¹⁸⁾。共振器は超短パルスレーザー発振器としては典型的な Z 型構成とし、励起源には発振波長 976 nm の LD を用いた。セラミックス試料は、曲率 100 mm のミラー M1, M2 の間にブルースター角で配置した。ビームはミラー M3 (曲率 400 mm) を介して HR ミラーに集光 (180×230 μm) されている。フェムト秒発生のため SF10 ブルースタープリズム対 (P) を 70 cm 間隔で配置し、OC は透過率 5% のものを使用した。その結果、最大 3.89 W 励起時、波長 1042 nm で 850 mW の平均出力が、パルス幅 92 fs、光-光効率 21.9% で得られた。図7には、モード同期発振パルスおよびレーザー入出力特性を示す。この結果は、Yb 添加超短パルス固体レーザーとしてこれまでに報告されている

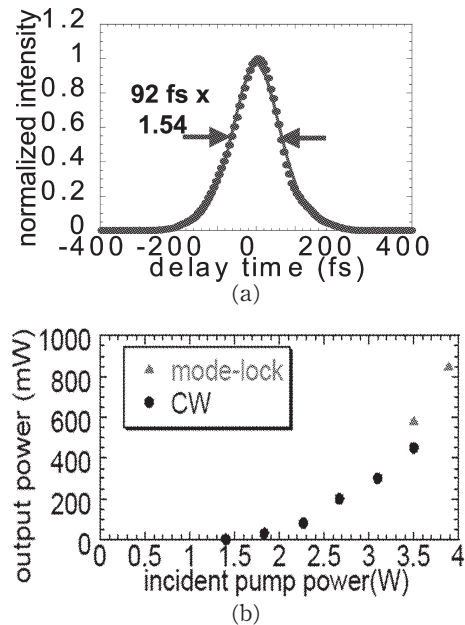


図7 カーレンズモード同期 Yb:Sc₂O₃ セラミックレーザーの特性. (a) 発振パルス, (b) 入出力特性.

KYW, YVO₄, KluW, CaGdAlO₄などの結晶を用いたものと比較しても、きわめて良好な特性である。

また、低出力ながら Yb:Lu₂O₃ セラミックスと non-doped Y₂O₃ セラミックスを張り合わせた複合利得媒質では 65 fs の短パルス化にも成功しており¹⁹⁾、今後セラミックスを用いた LD 直接励起光源の高出力・超短パルス化に向けた開発が進むものと期待される。

本稿では、これまでに報告されている内容を中心に Yb 添加セラミックレーザー材料の特性と、それらを用いた光源開発の現状を紹介した。セラミックレーザー材料は、その大型化・複合化が比較的容易であるため、一般産業用光源としてのみならず、例えばレーザー核融合用など大出力レーザーへの応用も世界各国で検討が行われはじめた³⁴⁾。セラミックレーザーは日本発の世界に誇るすぐれた技術であり、今後さらなる発展が期待されている。

本解説で紹介した内容は、電気通信大学レーザー新世代研究センターの植田憲一教授をはじめ、白川晃氏、戸倉川正樹氏、高市和則氏、J. Dong 氏、Susanne T. Fredrich-Thornton ら植田研究室メンバーとの協同研究の成果であり、ここに深く感謝致します。

文 献

- 1) 植田憲一, J. Lu, 高市和則, 八木秀喜, 柳谷高公, A. A. Kaminskii: "Nd: YAG セラミックレーザーの現状と将来," レーザー研究, **31** (2003) 465-470.
- 2) A. Ikesue, T. Kinoshima, K. Kamata and K. Yoshida:

- "Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid-state lasers," J. Am. Ceram. Soc., **78** (1995) 1033-1037.
- 3) H. Yagi, T. Yanagitani, K. Takaichi, K. Ueda and A. A. Kaminskii: "Characterizations and laser performance of Nd: Y₃Al₅O₁₂ laser ceramics," OPTMAT, **29** (2007) 1258-1262.
- 4) Y. Sato, I. Shoji, T. Taira and A. Ikesue: "The spectroscopic properties and laser characteristics of polycrystalline Nd:Y₃Sc_xAl_(6-x)O₁₂ laser media," OSA Trends in Optics and Photonics (TOPS) on Advanced Solid State Photonics, **83** (2003) 444-450.
- 5) J. Lu, J. Lu, T. Murai, T. Takaichi, T. Uematsu, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. Kaminskii: "Nd³⁺:Y₂O₃ ceramic laser," Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) L1277-L1279.
- 6) J. Lu, K. Takaichi, T. Uematsu, A. Shirakawa, M. Musha, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Promising ceramic laser material: Highly transparent Nd³⁺:Lu₂O₃ ceramic," Appl. Phys. Lett., **81** (2002) 4324-4326.
- 7) A. Giesen: "Results and scaling laws of thin disk lasers," SPIE Proc., **5332** (2004) 212-227.
- 8) F. Druon, F. Balembois and P. Georges: "Ultra-short-pulsed highly-efficient diode-pumped Yb:SYS mode-locked oscillators," Opt. Express, **12** (2004) 5005-5012.
- 9) K. Takaichi, H. Yagi, J. Lu, A. Shirakawa, K. Ueda, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Yb-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramics: A new solid-state laser material," Phys. Stat. Sol. (a), **200** (2003) R5-R7.
- 10) J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Efficient Yb:Y₃Al₅O₁₂ ceramic microchip lasers," Appl. Phys. Lett., **89** (2006) 091114.
- 11) J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Laser-diode pumped heavy-doped Yb:YAG ceramic lasers," Opt. Lett., **32** (2007) 1890-1892.
- 12) J. Saikawa, Y. Sato, T. Taira and A. Ikesue: "Absorption, emission spectrum properties, and efficient laser performances of Yb:Y₃ScAl₄O₁₂ ceramics," Appl. Phys. Lett., **85** (2004) 1898-1900.
- 13) J. Saikawa, Y. Sato, T. Taira and A. Ikesue: "Passive mode locking of a mixed garnet Yb:Y₃ScAl₄O₁₂ ceramic laser," Appl. Phys. Lett., **85** (2004) 5845-5847.
- 14) J. Kong, D. Y. Tang, B. Zhao, J. Lu, K. Ueda, H. Yagi and T. Yanagitani: "9.2-W diode-end-pumped Yb:Y₂O₃ ceramic laser," Appl. Phys. Lett., **86** (2005) 161116.
- 15) K. Takaichi, H. Yagi, A. Shirakawa, K. Ueda, S. Hosokawa, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Lu₂O₃:Yb ceramics: A novel gain material for high-power solid-state lasers," Phys. Stat. Sol. (a), **202** (2005) R1-R3.
- 16) J. Lu, J. F. Bisson, K. Takaichi, T. Uematsu, A. Shirakawa, M. Musha, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Yb:Sc₂O₃ ceramic laser," Appl. Phys. Lett., **83** (2003) 1101-1103.
- 17) M. Tokurakawa, K. Takaichi, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Diode-pumped 188 fs mode-locked Yb:Y₂O₃ ceramic laser," Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 071101.
- 18) M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Diode-pumped sub-100 fs Kerr-lens mode-locked Yb:Sc₂O₃ ceramic laser," Opt. Lett., **32** (2007) 3382-3384.
- 19) M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, S. Hosokawa, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Diode-pumped 65 fs Kerr-lens mode-locked Yb:Lu₂O₃ and nondoped

- Y₂O₃ combined ceramic laser,” *Opt. Lett.*, **33** (2008) 1380-1382.
- 20) Q. Hao, W. Li, H. Zeng, Q. Yang, C. Dou, H. Zhou and W. Lu: “Low-threshold and broadly tunable lasers of Yb-doped yttrium lanthanum oxide ceramic,” *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 211106.
 - 21) 河仲準二: “低温冷却型 Yb 系固体レーザー”, *レーザー研究*, **33** (2005) 243-248.
 - 22) U. Griebner, V. Petrov, K. Petermann and V. Peters: “Passively mode-locked Yb:Lu₂O₃ laser,” *Opt. Express*, **12** (2004) 3125-3130.
 - 23) A. A. Kaminskii, S. N. Bagayev, K. Ueda, T. Takaichi, A. Shirakawa, S. N. Ivanov, E. N. Khazanov, A. V. Taranov, H. Yagi and T. Yanagitani: “New results on characterization of highly transparent C-modification Lu₂O₃ nanocrystalline ceramics,” *Laser Phys. Lett.*, **3** (2006) 375-379.
 - 24) K. Takaichi, H. Yagi, P. Becker, A. Shirakawa, K. Ueda, L. Bohaty, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: “New data on investigation of novel laser ceramic on the base of cubic scandium sesquioxide,” *Laser Phys. Lett.*, **4** (2007) 507-510.
 - 25) P. Lacovara, H. K. Coi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal and T. Y. Fan: *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1089.
 - 26) S. T. Fredrich-Thornton, C. Hirt, F. Tellkamp, K. Petermann, G. Huber, K. Ueda and H. Yagi: “Highly doped Yb:YAG thin-disk lasers,” *Advanced Solid-State Photonics 2008*, WB13 (Nara, Japan, 2008).
 - 27) J. Dong, K. Ueda, A. Shirakawa, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: “Composite Yb:YAG/Cr³⁺:YAG ceramics picosecond microchip lasers,” *Opt. Express*, **15** (2007) 14516-14523.
 - 28) M. Tsunekane and T. Taira: “High-power operation of diode edge-pumped, glue-bonded composite Yb:YAG microchip laser with ceramic undoped YAG pump light-guide,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) L1164-L1167.
 - 29) J. Lu, K. Takaichi, T. Uematsu, A. Shirakawa, M. Musha, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: “Yb³⁺:Y₂O₃ ceramics: A novel solid-state laser material,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) L1373-L1375.
 - 30) A. Shirakawa, T. Takaichi, H. Yagi, J.-F. Bisson, J. Lu, M. Musha, K. Ueda, T. Yanagitani, T. S. Petrov and A. A. Kaminskii: “Diode-pumped mode-locked Yb:Y₂O₃ ceramic laser,” *Opt. Express*, **11** (2003) 2911-2916.
 - 31) レーザー学会編: レーザーハンドブック第2版 (オーム社, 2005) p. 195.
 - 32) M. Tokurakawa, K. Takaichi, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, S. Hosokawa, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: “Diode-pumped mode-locked Yb:Lu₂O₃ ceramic laser,” *Opt. Express*, **14** (2006) 12832-12838.
 - 33) D. E. Spence, P. N. Kean and W. Sibbett: “60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser,” *Opt. Lett.*, **16** (1991) 42-44.
 - 34) 河仲準二, 時田茂樹, 西岡 一, 宮永憲明, 植田憲一: “セラミック材料を用いた新しい炉用レーザー”, *日本光学会年次学術講演会予稿集*, 10aAS3 (2006) pp. 456-457.

(2008年8月18日受理)