

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：74417

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760046

研究課題名（和文）次世代大出力レーザーのためのジグザグアクティブミラー増幅器の開発

研究課題名（英文）Development of Zigzag Active-Mirror amplifier for next generation high power laser systems

研究代表者

古瀬 裕章（FURUSE HIROAKI）

（財）レーザー技術総合研究所・レーザープロセス研究チーム・研究員

研究者番号：50506946

研究成果の概要（和文）：次世代大出力レーザーとなり得るジグザグアクティブミラー増幅器を開発し、レーザー動作の実証とその評価を行った。レーザー試料は Yb:YAG ディスク 3 枚を含むコンポジットセラミックスであり、CW 発振動作において 214 W、スロープ効率 63% を達成した。また Yb 添加濃度 9.8% の YAG セラミックスに関する熱伝導率の温度依存性を測定した。さらに Yb:YAG ディスク 1 枚から成る試料において発熱に伴う熱レンズ効果や波面歪等を実験的に調べた。

研究成果の概要（英文）：We developed a novel ZigZag Active-Mirror laser for next generation high power laser systems and demonstrated the laser operation. The laser material is a compact composite ceramics, in which three Yb:YAG layers are combined in series. Output power of 214 W with a slope efficiency of 63% has been demonstrated for cw operation. We also measured temperature dependence of thermal conductivity for 9.8% doped Yb:YAG ceramics. In addition, thermal lens effect and wavefront distortion due to temperature rise have experimentally studied for a single Yb:YAG sample.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：光学素子・装置・材料、レーザー

1. 研究開始当初の背景

2003 年に大口径化が可能な透過性セラミックスが結晶を上回る性能を発揮して以来、世界中でセラミックスを用いたレーザーの開発が盛んに行われてきた。現在では 10kW 出力を超えるセラミックレーザーが報告されており、今後さらなる高出力化が期待され

る。高出力固体レーザー開発では、レーザー媒質中に発生する温度勾配によるビーム品質の劣化対策が重要な課題となっている。研究代表者はセラミック化が可能な Yb:YAG 材料をレーザー材料に選定し、かつ低温冷却と全反射アクティブミラー型という 2 種類の新しい概念を導入することにより、小型で高出

力と高品質を同時に満たしうる固体レーザーの開発を目指してきた。

Yb:YAG は小型で高出力が可能な固体レーザー媒質として期待されているが、室温動作では強い励起強度が必要であることなどの欠点がある。低温冷却によりこのような欠点が克服できるばかりでなく、低温では熱伝導率が向上するためレーザー媒質自体の温度上昇や温度勾配を大きく低減できる。

一方冷却技術という観点からは、冷媒とレーザー媒質との間の全反射を利用する方式を導入することにより、従来の伝導冷却型アクティブミラー方式で利用されてきた熱伝導の極めて悪い高反射膜を取り除くことが可能となり、発熱特性を大幅に改善できる。

この 2 つの概念を導入したレーザーを TRAM (Total-Reflection Active-Mirror) と命名し、小型のレーザーを試作して発熱特性やレーザー特性を詳細に研究してきた。

2. 研究の目的

(1) 本研究の第一の目的は次世代大出力レーザーとなり得る TRAM 多段増幅方式 (ジグザグアクティブミラー: ZiZa-AM) を開発することである。この方式を用いることで励起光の吸収率をほぼ 100%まで上げることができ 10 kW 以上の出力を高効率かつ良ビーム品質で実現できると考えている。また励起光のパワーを複数の Yb:YAG ディスクに分散させることができ、発熱量も抑えることができる。

(2) 最適な ZiZa-AM を開発するためには、各 Yb:YAG ディスクにおける吸収量と発熱量が一定となるように添加濃度および厚みを調整する必要がある。現在 0.3%~20%の領域において様々な Yb 添加量が利用可能である。しかしながら、Yb:YAG セラミックスの大部分の添加濃度において分光特性、熱特性の温度依存性は明らかになっていない。本研究では数種類の添加濃度における物性値を定量的に調べ、添加濃度によってどのように変化するかを調査する。そして得られたデータに基づいて 10 kW 級出力が可能な ZiZa-AM の概念設計を行う。

3. 研究の方法

(1) Yb:YAG セラミックスの熱伝導率温度依存性を調べた。熱伝導率の測定には図 1 に示すように片方から定常的に熱を与え、試料に生じた温度勾配を温度センサで測定することにより熱伝導率を求める定常熱流法を採用した。測定試料は $5 \times 5 \times 15 \text{ mm}^3$ と $5 \times 5 \times 20 \text{ mm}^3$ の Yb:YAG (9.8%) であり、試料両端に銅製治具を取り付けた。銅と試料の接着には高伝導度のエポキシ系接着剤、スタイキャストを使用した。試料底面はクライオスタットの治具に設置し、温度制御した。一方、試料上

面にヒーターを設置して、定常的に熱を与えた。試料両端の銅製治具内部に温度センサを取り付け、温度差から熱伝導率を導出した。本測定は自然科学研究機構核融合研究所が所有する測定装置を使用させて頂き、岩本晃史准教授、安原亮助教のご協力を頂いた。

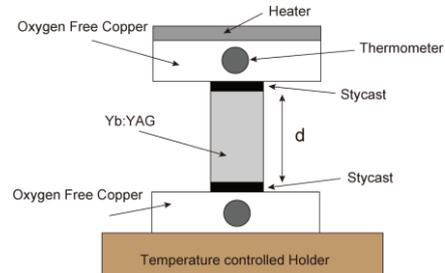


図 1 熱伝導率測定の構成図。

(2) 本研究ではドーパ濃度 9.8% の Yb:YAG ディスク 3 枚から成る ZiZa-AM を先行して開発し、その発振特性および増幅特性を調査した。図 2 に試料の形状を示す。試料は台形柱のアンドープ YAG と 3 枚の Yb:YAG ディスクから構成されるコンポジットセラミックスである。媒質の上面および底面は液体窒素で直接冷却される。レーザー光および励起光は同軸で、斜面に対して垂直に入射する。Yb:YAG と液体窒素の界面で全反射しながら媒質内をジグザグに伝搬するため、本方式をジグザグアクティブミラーと名付けた。各 Yb:YAG のドーパ量を 9.8 atm.% とし、厚みを各媒質での温度上昇が一定となるように設定した。また、合計で励起パワーの 95%以上が吸収されるように調整した。Yb:YAG の厚みは励起される方向から順に 0.1 mm, 0.19 mm, 0.29 mm である。

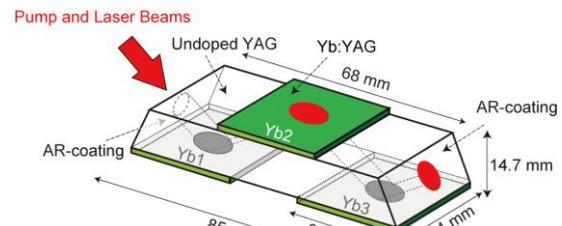


図 2 ジグザグアクティブミラーレーザーの構成図。

図 3 にジグザグアクティブミラーレーザーの発振器の構成を示す。サンプルをクライオスタット内部の液体窒素タンクに取り付けた。CW500 W のファイバー結合型半導体レーザー (LD) を励起光源に用い、中央の Yb:YAG に $\phi 8 \text{ mm}$ に集光した。各 Yb:YAG での励起径はそれぞれ $\phi 9 \text{ mm}$, 8 mm , 9 mm である。また、ダイクロイックミラー、出力ミラー、レンズを用いてキャビティを構成した。反射率の異

なる出力ミラーを用いてレーザー発振させ、レーザー光の出力をパワーメーターで測定した。LDの透過率測定より、本試料のLD吸収率は94%である。最大励起時に合計で431 W吸収されると見積もることができる。

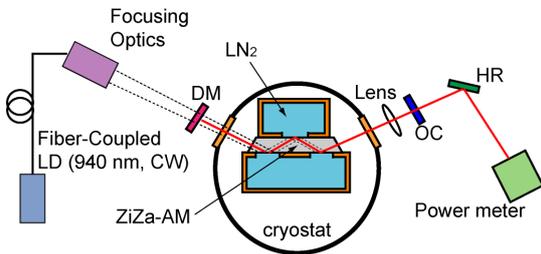


図3 発振実験の構成図.

またジグザグアクティブミラーレーザーの小信号利得と増幅後のビーム品質を調べた。図4に実験の構成を示す。種光に横単一モードのファイバーレーザー(CW 1 W, $\lambda = 1030$ nm)を用いた。増幅光の出力をパワーメーターで測定した。また増幅後の近視野像および遠視野像をCCDで調べた。

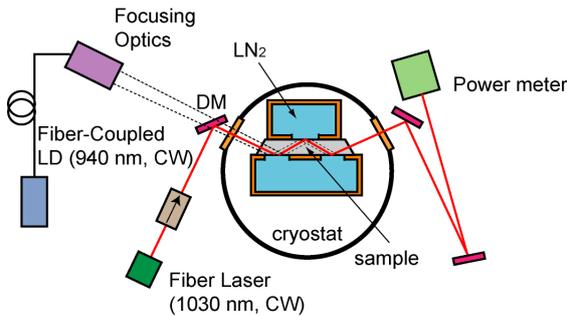


図4 増幅実験の構成図.

(3) 本研究ではより最適なZrZr-AMを設計するために、Yb:YAGディスク1枚から成るTRAM単一における熱効果を調べた。特に各励起強度に対するYb:YAG温度と透過波面歪を調査した。また波面歪から熱レンズ焦点距離を解析した。

測定に用いた試料はYb:YAG厚0.6 mmのTRAM試料であり、波面測定にはシャックハルトマン波面センサを使用した。プローブ光にはYb:YAGで増幅されないNd:YLFレーザーを使用した。CW500Wのファイバー結合型半導体レーザーを励起光源として使用し、Yb:YAGデ

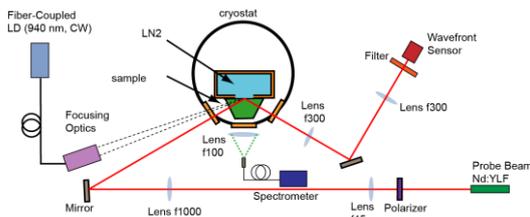


図5 Yb:YAG温度と波面歪の測定構成図.

ィスクで $\phi 2.4, 4, 6$ mmになるように集光した。また、Yb:YAGの温度はYb:YAGから放出される蛍光スペクトル形状から評価した。

(4) 本研究で得られた物性値、レーザー特性、熱効果等を基にして、10 kW級ZrZr-AMレーザーの概念設計を行った。

4. 研究成果

(1) ドープ濃度9.8%のYb:YAGセラミックスの熱伝導率測定結果を図6に示す。熱伝導率は低温になるにしたがって向上することがわかる。100 Kにおける熱伝導率は約13 W/mKであった。長さ15 mmと20 mmの試料に関して若干測定結果に誤差が生じている。我々は、この原因は接着剤スタイキャストの熱抵抗であると考えている。今後、長さ10 mmの試料に関する熱伝導率測定結果から接着剤の熱抵抗を算出し、より正確な熱伝導率を求める予定である。さらに、同様の測定を異なるドープ量のセラミックスに関して行う。

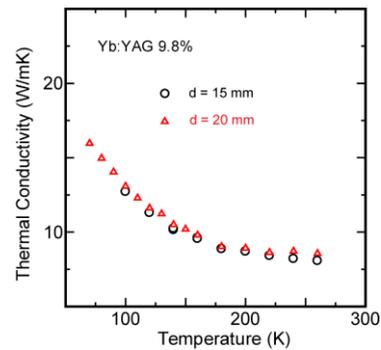


図6 ドープ濃度9.8%のYb:YAGセラミックスの熱伝導率温度依存性測定結果.

(2) 図7にジグザグアクティブミラーレーザーの発振出力特性を示す。反射率72%の出力ミラーを用いた際に、最大出力214 W、光変換効率50%、スロープ効率62.7%を得た。レーザー出力は励起パワーに対して線形に増加している。各Yb:YAGディスクにおける吸収パワーはそれぞれ180、170、80 Wと見積もっている。したがって、励起密度は141.5、169.1、62.9 W/cm²となる。本実験での励起密度はかなり低く、励起パワーを増加させることで高出力化、高効率化が可能である。

図8に増幅試験の測定結果を示す。点線は計算結果を示している。計算には誘導放出断面積 $\sigma_{\text{emi}} = 1.2 \times 10^{-19}$ cm²、蛍光寿命 $\tau_f = 1$ ms、吸収係数 $\alpha = 12.7$ cm⁻¹を用いた。図8より吸収パワー200 W付近まで実験結果と計算結果は良く合っている。200 W以上で利得が飽和するのは、自然放出光増幅(ASE)か寄生発振による影響と考えている。

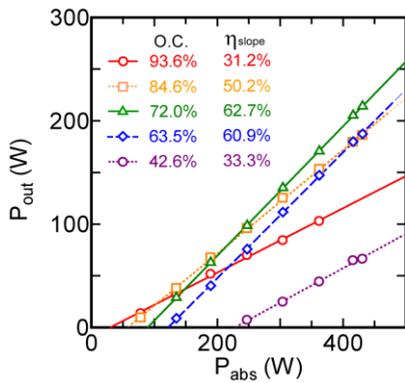


図7 ジグザグアクティブミラーレーザーの発振試験結果.

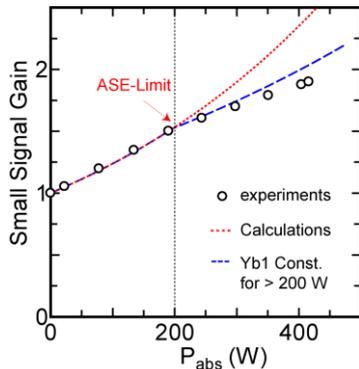


図8 ジグザグアクティブミラーレーザーの増幅試験結果.

図9に最大励起時 ($P_{abs} = 403$ W) の近視野像および遠視野像を示す。この時のビーム品質は $M^2 \sim 1.0$ であり、強励起時でも品質の劣化が生じないことがわかる。

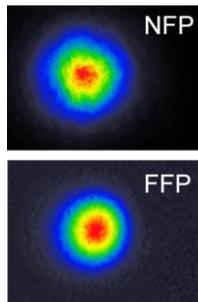


図9 最大励起時の近視野像 (NFP) および遠視野像 (FFP).

(3) Yb:YAG 0.4 mm の単一 TRAM における透過波面歪の結果を図10に示す。図10は励起パワー450 W、励起径 $\phi 4$ mm、非発振時に測定された波面である。測定波面からは Zernike 多項式による解析によって、Tip-Tilt、Defocus、Coma、Astigmatism 等の成分を知ることができる。Defocus 成分から

熱レンズ焦点距離を知ることができ、これはレンズを用いて補償することが可能である。ピーク点における x 方向および y 方向の Peak to Valley (PV) 値では、x y 方向の波面歪はほぼ対象となっており、波面歪の大部分は Defocus 成分によるものと考えられる。波面補償後に残された波面歪には、可変形鏡等による高度な波面補償が必要であると考えている。

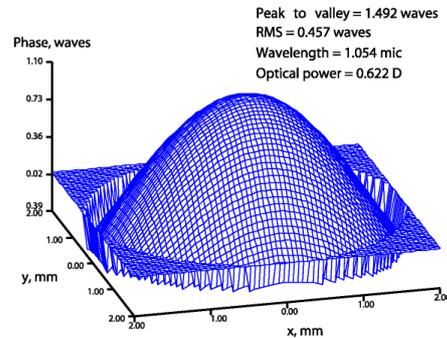


図10 励起パワー450 W時の測定波面.

図11に測定波面から解析した熱レンズ焦点距離と励起吸収パワー密度の関係を示す。図11より、最大励起時に f2000 mm 以上の強い熱レンズ効果が生じていることがわかる。また図11には蛍光スペクトルから見積もった Yb:YAG 温度も示す。最大励起時には 160K 付近まで温度上昇している可能性がある。

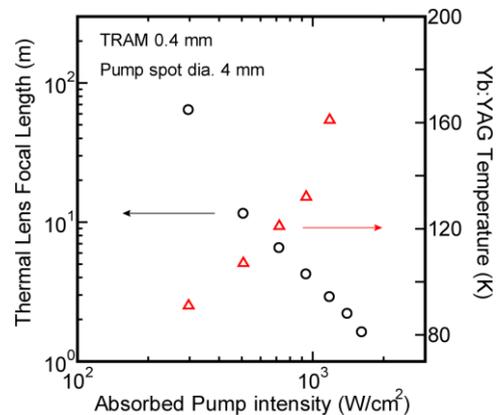


図11 励起パワー450 W時の測定波面.

今後は高出力レーザー開発のために有限要素法を用いた3次元温度分布、屈折率分布等の計算手法を確立し、実験結果と比較する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① J. Kawanaka, Y. Takeuchi, H. Furuse, T. Nakanishi, A. Yoshida, T. Norimatsu, T. Kawashima, and H. Kan, Total-reflection active-mirror amplifier for high pulse energy and

high average power by using a composite ceramics, 査読有
Optical Materials 34, 977-980 (2012).
DOI: 10.1016/j.optmat.2011.05.019

- ② H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, T. Saiki, K. Imasaki, M. Fujita, K. Takeshita, S. Ishii and Y. Izawa, Zig-zag active-mirror laser with cryogenic Yb³⁺:YAG/YAG composite ceramics, 査読有
Optics Express 19, No. 3, 2448-2455 (2011)
DOI: 10.1364/OE.19.002448

[学会発表] (計 7 件)

- ① H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, M. Fujita, S. Ishii, K. Takeshita, and Y. Izawa, Design of 10 kW class Laser System Based on Multiple TRAM Configuration with Cryogenic Yb:YAG Ceramics, *The 1st Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS 2012)* Yokohama, 26-27 April, 2012.
- ② H. Furuse, J. Kawanaka, H. Chosrowjan, N. Miyanaga, T. Sakurai, M. Fujita, S. Ishii, K. Takeshita, and Y. Izawa, Study of wave-front distortion in cryogenic Yb:YAG TRAM laser and a novel Coherent Beam Combining (CBC) technique for ultra-high power laser systems, *Advanced Solid-State Photonics (ASSP 2012)*, San Diego, 29 January -1 February, 2012.
- ③ J. Kawanaka, H. Furuse, D. Albach, Y. Takeuchi, A. Yoshida, T. Kawashima, and H. Kan, Joule-class Picosecond Amplifier by Using Cryogenic Yb:YAG Total Reflection Active Mirror, *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-Pacific Rim 2011)*, Sydney, 28 August -1 September, 2011.
- ④ J. Kawanaka, H. Furuse, D. Albach, A. Yoshida, T. Kawashima, and H. Kan, Cryogenic total-reflection active-mirror laser for high-power ultrafast pulses, *20th International Laser Physics Workshop (LPHYS' 11)* Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 11 -15 July, 2011.
- ⑤ J. Kawanaka, H. Furuse, D. Albach, Y. Takeuchi, A. Yoshida, T. Kawashima, and H. Kan, Cryogenic Yb:YAG Total Reflection Active Mirror Lasers, *The European Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Europe 2011)* Munich, 22-26 May, 2011.

- ⑥ Y. Takeuchi, H. Furuse, A. Yoshida, T. Nakanishi, T. Kawashima, H. Kan, T. Norimatsu, N. Miyanaga, and J. Kawanaka, Chirped-Pulsed Yb³⁺:YAG Regenerative Amplifier Using a Total-Reflection Active-Mirror, *Advanced Solid State Photonics (ASSP 2011)*, Istanbul, 13-16 February, 2011.
- ⑦ H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, M. Fujita, S. Ishii, K. Imasaki, K. Takeshita, and Y. Izawa, Conceptual design for sub-100 kW laser system based on total-reflection active-mirror geometry, *Advanced Solid-State Photonics (ASSP 2011)*, Istanbul, 13-16 February, 2011.

[その他]

ホームページ等
<http://www.ilt.or.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古瀬 裕章 (FURUSE HIROAKI)
(財) レーザー技術総合研究所・
レーザープロセス研究チーム・研究員
研究者番号: 50506946