

Yb 添加 Lu₂O₃ セラミックレーザー

白川 晃研究室 松本 昂

1. 序論

レーザーの研究分野の一つに、超短パルスレーザーがある。10⁻¹²秒以下のパルス幅を持つパルス発振レーザーで、レーザー加工、周波数コム、分光、基礎科学等に応用される。レーザー自体の研究としては、短パルス化、高出力化の研究が行われている。

本研究では、3%(at. %)Yb³⁺:Lu₂O₃ セラミックのレーザー利得媒質としての性質を調べた。Lu₂O₃ に含まれる Lu は添加イオンの Yb と原子番号が近いので、高濃度添加時でも熱伝導率の減少が少ない。また、セラミック材料は単結晶材料に比べ機械的特性が高いため、光パワーの励起にも耐えうる。加えて、一般的なレーザー媒質である Yb³⁺:YAG より広い利得スペクトル幅を持つ。これらの特性から、Yb³⁺:Lu₂O₃ セラミックは高出力な超短パルスレーザーとして期待できる。実験内容としては、基本的な光学特性の測定、CW 発振実験、モード同期発振実験を行った。

2. 原理

超短パルス発振を得るためには、媒質の持つ利得スペクトル幅が広いことが求められる。これは、発振スペクトルとパルス幅がフーリエ共役の関係にあるためである。以下に、主な利得媒質の利得スペクトル幅を示す。Yb³⁺:Lu₂O₃ が比較的広いスペクトル幅を持つことがわかる。

表 1 Yb 添加材料の利得スペクトル幅比較(1030nm 帯) [1]

	Lu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃	YAG	LuAG
利得スペクトル幅/nm	13	16	13	9	10

高出力の観点から考えると、利得媒質には熱伝導率が高いことが求められる。これは、光パワーの励起に媒質が耐える必要があるためである。以下

に Yb イオン添加濃度に対する熱伝導率変化の材料毎の比較を示す。今回使用した試料のイオン添加濃度は 3 at.% である。Yb³⁺:Lu₂O₃ は Yb 添加時の熱伝導率が他の材料に比べ高いため、高出力発振を期待できる。

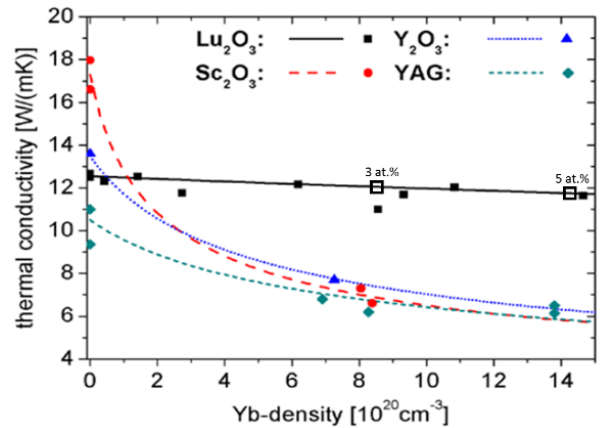


図 1 材料毎の熱伝導率の Yb イオン添加濃度依存性比較 (単結晶) [2]

以上の理由から、Yb³⁺:Lu₂O₃ セラミックは高出力な超短パルスレーザーとして期待できる。超短パルス発振を得るために、今回は受動モード同期の一つであるカーレンズモード同期の手法を用いた。その速い応答速度から、SESAM を利用した場合より短いパルス幅が期待できる。同材料のバルクを用いたカーレンズモード同期の先行研究では、平均出力 1.83W、パルス幅 135fs、繰り返し周波数 78MHz を記録している[3]。この結果は、同材料のバルクでのモード同期において最高出力である。今回の実験では、さらなる高出力化、短パルス化を目指しており、先行研究より強いカーレンズ効果を得るため、先行研究で使用された試料の 2 倍の厚み(4mm)の試料を使用した。

3. 実験・結果

i. 光学的基本特性の測定

光学的基本特性として、吸収・誘導放出断面積、蛍光寿命を測定した。図 2 に吸収・誘導放出断面積の測定結果を示す。ただし、誘導放出断面積は Fuchtbauer-Ladenburg 法[4]により求めた。

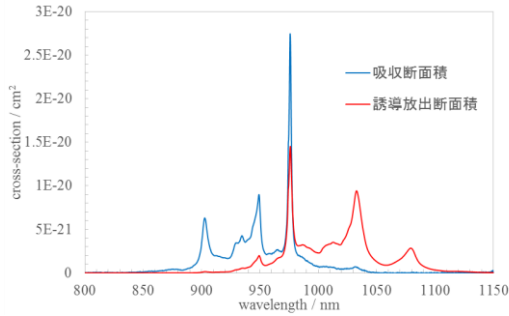


図 2 3%(at. %)Yb³⁺:Lu₂O₃ セラミックの吸収・誘導放出断面積の測定結果

910, 940, 975nm に強い吸収のピーク、975, 1030, 1080nm に強い蛍光のピークが存在している。975nm 帯の蛍光ピークには、吸収のピークも重なっているため、発振実験では、1030nm 帯を利用した。

蛍光寿命の測定結果については、 $\tau=0.835\text{ms}$ であった。なお、この蛍光寿命の測定結果は上の誘導放出断面積の導出にも用いた。

ii. CW 発振実験

CW 発振の実験系を図 1、パルス発振の実験系を図 3 に示す。なお、試料が熱を持つことによる試料破壊等を防ぐため、試料は 18°C に水冷された銅のホルダーに固定してある。

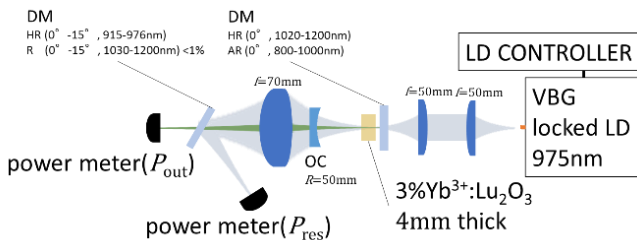


図 3 CW 発振の実験系

975nm の LD を LD Controller で制御し、共振器へ励起光として入射させる。 $R=50\text{mm}$ の OC から発振光と励起光が射出される。OC は 3 種類用いて測定しており、それぞれ透過率は 2%, 5%,

10% である。射出した光を集光し、DM を使うことで残留励起光と発振光に分けた。それぞれのパワーをパワーメーターで測定した。また、試料の吸収パワー (P_{abs}) を導出するため、試料を挿入しない場合の P_{res} (P_{res} 試料なし) の測定と、試料への入射光のパワー (P_{in}) の測定も行った。試料の吸収パワーの導出の式を以下に示す。

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{in}} \left(1 - \frac{P_{\text{res}} \text{ 試料あり}}{P_{\text{res}} \text{ 試料なし}} \right) \quad (1)$$

これは、試料からの射出光が P_{res} を測定する PM へ入射するまでの、OC 等によるパワーの減衰を考慮するためである。

図 4 に測定結果を示す。

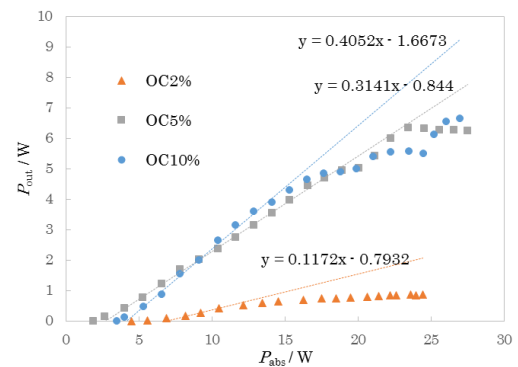


図 4 3%Yb³⁺:Lu₂O₃ セラミックを用いた CW 発振における $P_{\text{out}}-P_{\text{abs}}$ 効率 ($T_{\text{oc}}=2\%, 5\%, 10\%$)

最大出力 6.64W, 最大スロープ効率 40.5% ($T_{\text{oc}}=10\%$) であった。25W の高パワー吸収に対して試料の破損が起こっていない。材料の持つ高い熱伝導率と機械的強度によるものと言える。今回はバルク試料により実験を行ったが、CW 発振でより高い出力を得るためには、熱伝導率と機械的強度の特性がより活きる thin-disk laser が適していると言える。より薄い試料であれば、熱による温度上昇のほか、熱レンズ効果や再吸収の影響を抑えることが可能なためである。先行研究では、同材料での thin-disk laser において最高出力 301W、スロープ効率 85% の結果が報告されている[5]。また、バルク材料においてより高い出力を得るためには、発振波長におけるフレネルロスを軽減するための AR コートも効果的であると考えられる。

iii. モード同期発振実験

測定に使用した実験系を図 5 に示す。試料は 18°C に水冷された銅のホルダーに固定してある。また、Knife edge は発振波長を 1030nm 帯に制限するために、aperture は、損失変調を与えるために挿入してある。

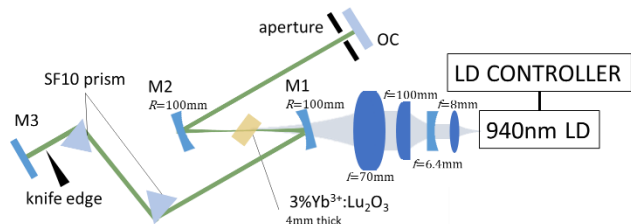


図 5 カーレンズモード同期によるパルス発振の実験系 ($T_{oc}=5\%$)

はじめに、プリズム対を挿入せず Z 型共振器を構成し、CW 発振を得た。CW 発振が起こっていることを確認した後、分散補償のための SF10 プリズム対を挿入した。M3 の透過光の強度分布を測定しながらモード同期がなされるようプリズム対間隔を調整し、オシロスコープで出射光がパルス発振していることを確認した。その後、OSA により発振スペクトルを、自己相関計により自己相関波形を測定した。

パルス発振時のオシロスコープの波形を図 6、図 7 に示す。

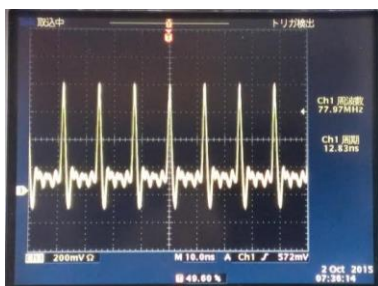


図 6 パルス発振時のオシロスコープの波形 (10.0ns/div)

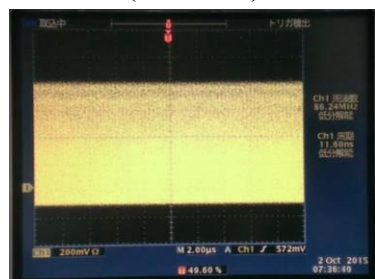


図 7 パルス発振時のオシロスコープの波形 (2.00µs/div)

図 7 より、パルスの高さ (強度) が安定していることから、安定したパルス発振を得ることができたとと言える。

発振スペクトルと自己相関波形(sech²型)をそれぞれ図 8、図 9 に示す。

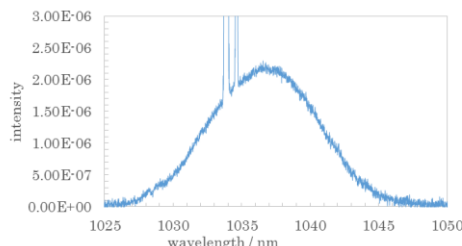


図 8 カーレンズモード同期時の発振スペクトル
スペクトル幅 9.3 nm, 中心波長 1038 nm

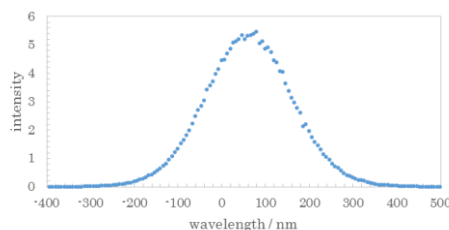


図 9 カーレンズモード同期発振時の自己相関波形図
パルス幅 144 fs, 時間帯域幅積 0.370

測定条件と結果を表 2 にまとめた。

表 2 カーレンズモード同期発振の実験条件と結果

プリズム 間距離/cm	平均出 力/W	パルス 幅/fs	時間帯 域幅積	パルスエネ ルギー/nW
70	1.12	144	0.370	15

時間帯域幅積が sech² 型の 0.315 に近いことから、ソリトンモード同期が得られていると言える。このスペクトル幅におけるフーリエ限界パルス幅は、123fs であり、ある程度近い値が得られたと言える。しかし、CW 発振成分が出ているため、その分のエネルギーロスがあることや、はじめに測定した蛍光スペクトルから導かれるフーリエ限界パルス幅が 75fs (スペクトル幅 13nm) であることから、アライメントの再考や、プリズム間距離を変えるなど、改良の余地がある。

結果として、今回の実験では、同材料のバルクにおけるカーレンズモード同期の先行実験の結果を

上回ることができなかつた。先に述べた中にもあるように、アライメントの改善が大きな要因として考えられる。

先行研究において、同材料を用いたモード同期レーザーの最大平均出力は thin-disk laser による 141W であり、パルス幅は 783fs, ピークパワーは 2.8MW である[6]。材料の性質に加え、共振器の構造が大きく結果に影響すると言える。

4.まとめ

Yb³⁺:Lu₂O₃ セラミック材料は、その高い熱伝導率から CW 発振における高出力が期待されたが、最高出力 6.64W という結果となった。スロープ効率に関しては、再吸収や熱レンズ効果の影響、フレネル反射といったことから 40.5%と比較的低い結果となってしまった。

モード同期レーザーは、カーレンズ効果や、分散補償など、さまざまな要素が関係しているため、考慮の余地が多分にあると考えられる。広い蛍光スペクトル幅から導出される短パルスを得られることを実証するためにも、共振器の構成をよく検討する必要があると考える。

最後に、本研究では一つの材料についての性質を評価してきたが、より高出力、短パルスのレーザー発振は、一つの種類の材料だけでなく、複数の種類の材料を組み合わせることで可能な場合もある。カーレンズ効果により広がったスペクトルを効率よく増幅するために Y₂O₃ を接合する方法が過去に行われている[7]。ただ、現段階ではアライメントの技術の向上と発振に関する知識の理解をまず優先し、その上で別の方法を模索するべきと考える。

参考文献

- [1] K. Petermann, G. Huber, L. Fornasiero, S. Kuch, E. Mix, V. Peters, S.A. Basun
(2000) *Journal of Luminescence*, **87-89**, p973-975
- [2] R. Peters, C. Kränkel, S.T. Fredrich-Thornton, K. Beil, K. Petermann, G. Huber, O.H. Heckl, C.R.E. Baer, C.J. Saraceno, T. Südmeyer, U. Keller
(2011) *Appl Phys B* **102**, p509–514
- [3] Tomohiro Ishikawa, A. Amani Eilanlou, Yasuo Nabekawa, Yoshihiko Fujihira, Tomohiro Imahoko, Tetsumi Sumiyoshi, Fumihiko Kannari, Makoto Kuwata-Gonokami, and Katsumi Midorikawa
(2015) *Japanese Journal of Applied Physics* **54**, 072703
- [4] W. F. Krupke, M. D. Shinn, J. E. Marion, J. A. Caird, and S. E. Stokowski J.
(1986) *Opt. Soc. Am. B*, **Vol. 3**, No. 1, January, p102-114
- [5] B. Weichelt, K.S. Wentsch, A. Voss, M. Abdou Ahmed, and Th. Graf
(2012) *Laser Phys. Lett.* **9**, No. 2, p110–115
- [6] Cyrill Roman Emmanuel Baer, Christian Kränkel, Clara Jody Saraceno, Oliver Hubert Heckl, Matthias Golling, Rigo Peters, Klaus Petermann, Thomas Südmeyer, Günter Huber, and Ursula Keller
(2010) *Optics Letters*, **Vol. 35**, No. 13, p2302-2304
- [7] Masaki Tokurakawa, Akira Shirakawa, Ken-ichi Ueda, Hideki Yagi, Syunsuke Hosokawa, Takagimi Yanagitani, and Alexander A. Kaminskii
(2008) *Optics Letters*, **Vol. 33**, No. 12, p1380-1382