

Yb 添加セラミックレーザー発振器の開発

Development of an Yb-doped sesquioxide ceramic oscillator

石川 智啓 (M1)

Tomohiro Ishikawa

Abstract

Yb-doped sesquioxide ceramics are expected as gain materials for high power ultrafast lasers. We developed an Yb-doped sesquioxide ceramic laser oscillator to evaluate the ceramic quality. The ceramic gain medium will be used in a high power mode-locked thin-disk oscillator for intracavity high order harmonic generation.

1. はじめに

高次高調波を得る手法としては、Ti:sapphire レーザー発振器からのフェムト秒レーザーパルス(種光)を増幅し、希ガス媒質に集光するのが一般的であるが、熱の影響により増幅器においてパルスの繰返しが kHz 程度に制限され、それに伴い高次高調波の繰返しも kHz 程度に制限されてしまう。高次高調波を時間分解光電子分光に用いるためには MHz 程度の繰返しが必要とされており[1]、本手法ではそのような応用は難しい。

高次高調波を MHz 程度で発生する有力な手法として2つの手法が提案されている。1つはエンハンスメント共振器によって発振器からのレーザーパルスを重ね合わせ、エンハンスメント共振器内で高次高調波発生を行うもの[2]であり、もう1つは高出力モード同期レーザー発振器内で高次高調波発生を行うもの[1]である。前者の手法ではエンハンスメント共振器に入射するパルスが共振器内に存在するパルスと重なり合うように共振器長を高精度に制御する必要があるが、後者の手法ではそのよ

うな制御の必要はなく、より簡単に高次高調波発生を行うことが可能と考えられる。

我々の研究グループでは MHz 級共振器内高次高調波発生を目標として Yb:YAG 薄ディスクを利得媒質として用いたリング型高出力モード同期レーザー発振器の開発に取り組んでいる。現在、本発振器によって共振器内ピークパワー130 MW、パルス幅 436 fs を達成しているが、高次高調波の発生効率を高めるためにはより高出力で短いパルス幅が必要である。そこで、近年高出力レーザーの利得媒質として注目されている Yb 添加セラミックに着目した。

Yb 添加セラミックの利点としては、結晶材料に比べて熱伝導率が優れていることやスペクトルが広帯域な点、大型化が可能といった点が指摘されている[3]。このような材料は市販されておらず、その特性を調べる必要がある。そこで、本研究では実際に Yb 添加バルクセラミックを用いてレーザー発振器を作製することで、Yb 添加セラミックレーザー発振器の特性評価を行った。

2. 発振器の設計

発振器作製のため、Fig. 1 のような Z 型の共振器を想定し、設計を行った。共振器の構成としては、Yb 添加セラミック ($t=2$ mm) を 2 枚の凹面鏡 ($r=100$ mm) の間に配置し、終端鏡はそれぞれ平面鏡とした。また、アームの長さはともに 300 mm であり、共振器長は 700 mm となる。共振器内損失を低下させるため、ビームをセラミックに対しブリュースタ

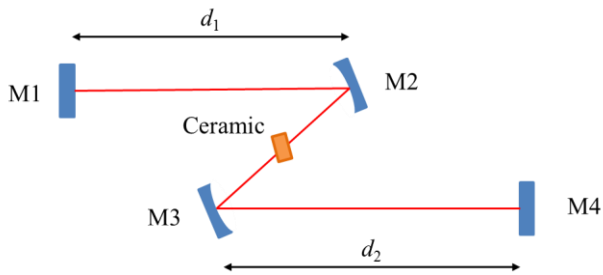


Fig. 1. Z-fold cavity.

一角で入射させるが、その際に非点収差が生じる。そのため、凹面鏡への入射角はセラミックでの非点収差が補償される角度 ($\theta=5.3^\circ$) とした。

本共振器の構成をもとに共振器の安定条件と共振器内モードの計算を $ABCD$ 行列を用いて行った。その結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2(a)に示されるように、2つの安定条件が隣接しているため、実験において発振の条件を探すのが容易となる。これは共振器の2つのアームの長さを同一としたためである。また、Fig. 2(b)に示される共振器内モード半径の計算結果から、共振器内におけるビームの変化を確認できる。集光点におけるモード半径は $33.5 \mu\text{m}$ と計算された。以上の結果を考慮して、Fig. 3 に示すような発振器の設計を行った。本発振器では励起レーザーとしてファイバー結合 (コア径 $100 \mu\text{m}$) のLDを用いた。ファイバーからの出射は、 $f=60 \text{ mm}$ のダ

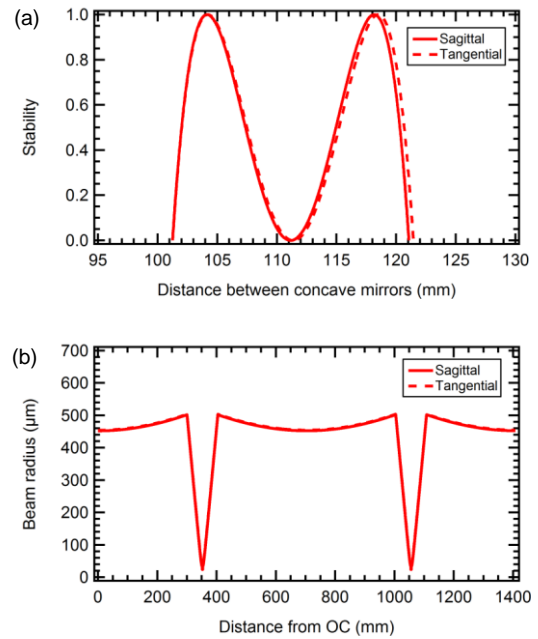


Fig. 2. Solid curves show sagittal and dashed curves show tangential. (a)Stabilities. (b)Mode radii inside the cavity.

レットレンズでコリメートされ、 $f=100 \text{ mm}$ の単レンズでセラミックに集光される。また、共振器を構成する凹面鏡 2 枚はともに $\phi 0.5''$ のもので、曲率は $r=100 \text{ mm}$ である。出力鏡は透過率 $T=5\%$ のものを用いた。

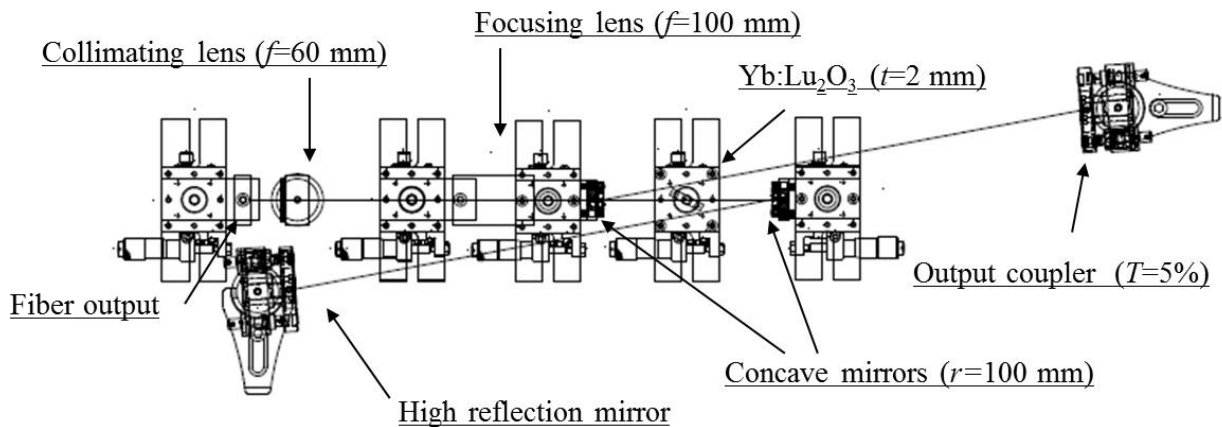


Fig. 3. Schematic of the Yb-doped ceramic oscillator.

3. 発振器の特性評価

本実験は室温 20°C の実験室において行った。まず、励起レーザーとして用いたファイバー結合 LD (LIMO32-F200-DL976(VHG)-LM) の特性について Fig. 4 に示す。Fig. 4(a)に示されるように、発振器の励起として本 LD は十分な出力を持つことがわかる。本研究で用いる Yb 添加セラミックは波長 976 nm に急峻な吸収ピークを持つ[3]。そのため、効率的に励起を行うには励起レーザーのスペクトルは狭帯域でなければならない。本 LD ではスペクトルの安定化、狭帯域化のために Volume holographic grating が用いられており、Fig. 4(b)に示されるようにスペクトル幅 1.2 nm で、出力の増加に伴う波長変化がないことが確認できる。なお、実験において本 LD はペルチェ素子によって 25°C で一定となるようにした。また、励起光学系を通り集光される位置での励起光のビームプロファイルを図 5 に示す。LD に結合しているファイバーはマルチモードファイバーであるため、集光点ではトップハット状のプ

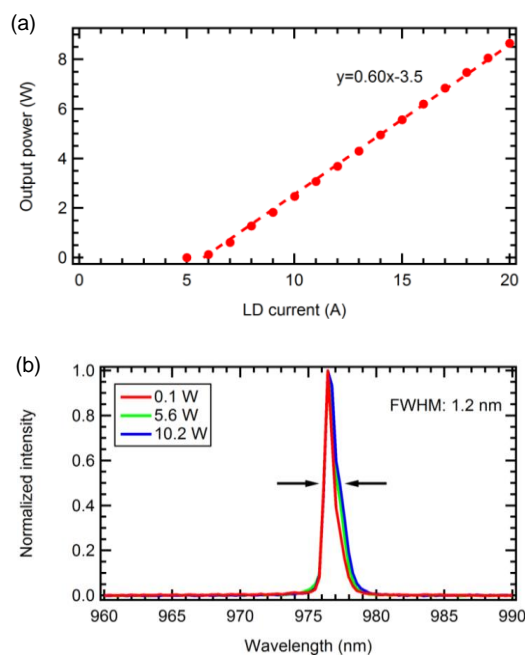


Fig. 4. Characteristics of fiber coupled LD.

(a)Output power. (b)Spectral stability.

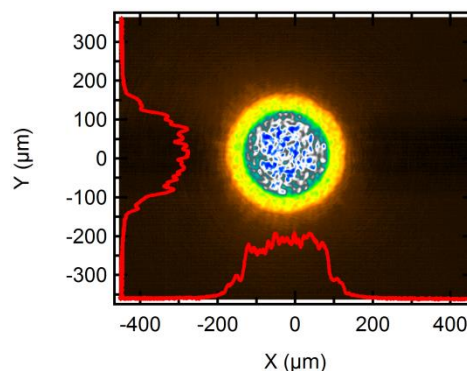


Fig. 5. Pump beam profile at focusing point. Red curves show the horizontal and vertical beam profiles. The diameter of the beam spot is ~220 μm.

ロファイルとなっている。プロファイルの周囲にリング上の分布が見えるのは、本 LD は本来コア径 200 μm のファイバーを用いる必要があるが、より小さいビーム径を得るためにコア径 100 μm のファイバーを用いたためである。

次に本実験で使用したセラミックについて述べる。使用した Yb 添加セラミックは Yb:Lu₂O₃ と Yb:Y₂O₃ であり、ともにドープ濃度は 3 at. %, 厚みは $t=2$ mm である。吸収特性を計測した結果を図 6 に示す。本計測は発振器の励起光学系及び励起用ファイバー結合 LD を用いて、セラミックへの入射パワーと透過パワー、反射パワーを計測して行った。本計測においてセラミックはブリュースター角となるように配置したが、励起光の偏光がランダムであり、セラミック表面での s 偏光成分の反射を防ぐことができない。そのため、Fig. 6 における Incident power は入射パワーから反射パワーを差し引いた値とした。Fig. 6 に示されるように、Yb:Lu₂O₃ の方が吸収効率が高く、6 W 励起で 96% 吸収した。また、Yb:Y₂O₃ では 93% 吸収した。

発振器を作製し、CW 発振を行った結果を以下に述べる。なお、本実験ではセラミックを銅製のヒートシンクに固定し、チラーによって冷却を行った。水温は 18°C、流量は 1.5 l/min とした。Yb:Lu₂O₃ を

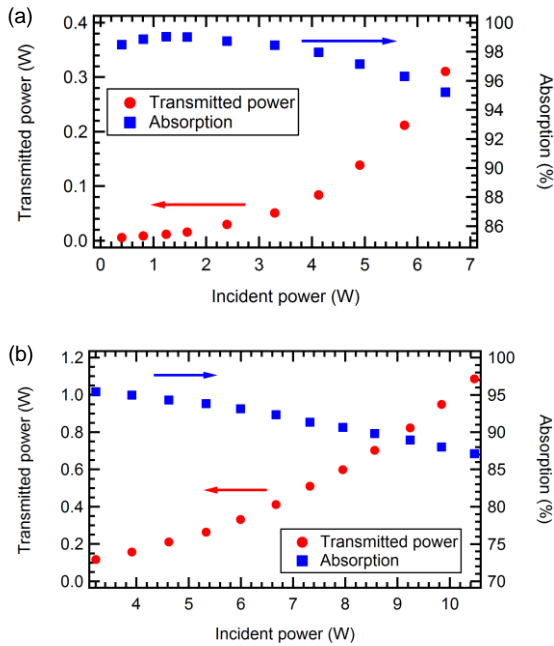


Fig. 6. Absorption characteristics. Red closed circles show transmitted power and blue closed squares show absorption efficiency. (a) Yb:Lu₂O₃ ceramic (b) Yb:Y₂O₃ ceramic

用いた発振器を CW 発振させ、出力をパワーメーターと分光器で計測した結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7(a) に示されるように、本発振器では 1.5 W の最大出力が確認された。スロープ効率は 21.6%、発振閾値は 4.5 W であった。本計測において Pump power は吸収特性を計測した時と同じように、入射パワーから反射パワーを差し引いたものである。また、Fig. 7(b) に示されるようにスペクトルは中心波長 1036.7 nm、スペクトル幅は 0.4 nm であった。次に Yb:Y₂O₃ を用いた発振器を CW 発振させて得られた結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) に示されるように最大で 0.74 W の出力が確認された。スロープ効率は 17.8%、発振閾値は 4.3 W であった。スペクトルは Fig. 8(b) に示されるように中心波長 1034.4 nm、スペクトル幅は 0.7 nm であった。

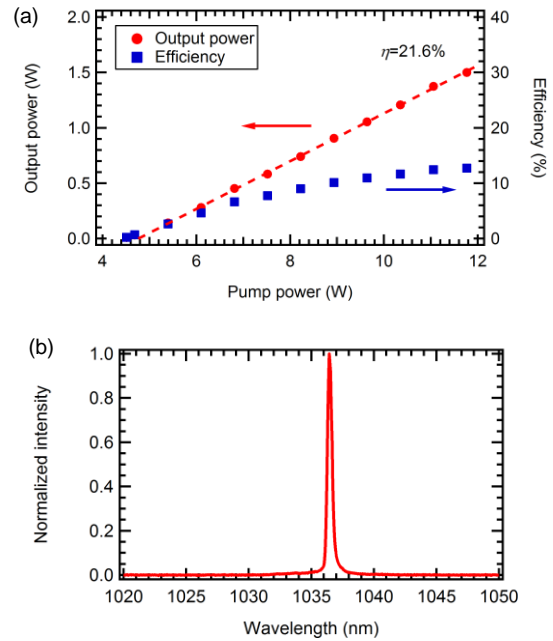


Fig. 7. Characteristics of Yb:Lu₂O₃ oscillator. (a) Output power measurement. Red closed circles show output power and blue closed squares show optical-to-optical efficiency. (b) Spectrum of CW operation.

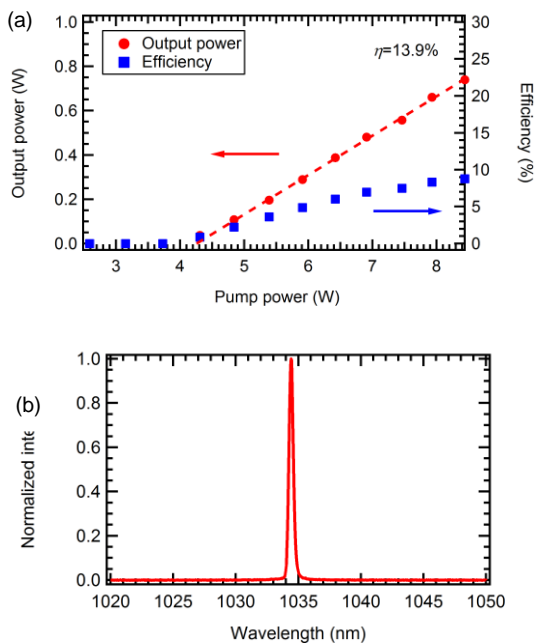
本実験により、以上の結果が得られた。

4. まとめ

Yb 添加レーザーセラミックを用いて発振器を製作し、CW 発振の特性評価を行った。結果からは、励起光の吸収特性及び出力特性において Yb:Y₂O₃ に比べ、Yb:Lu₂O₃ の方がよい結果が得られた。薄ディスク高出力モード同期レーザーへの応用に向けては、本発振器におけるモード同期発振での特性を評価する必要がある、今後取り組む考えである。

謝辞

本研究は理化学研究所緑川レーザー物理工学研究室主任研究員緑川克美博士に実験環境を提供して頂き、研究員鍋川康夫博士とアマニ・イランル博士の指導を受けて行われました。厚く御礼申し上げます。



Yb³⁺:Lu₂O₃ and nondoped Y₂O₃ combined ceramic laser.” *Opt. Lett.* **33**, 1380–1382 (2008).

Fig. 8. Characteristics of Yb:Y₂O₃ oscillator.

(a) Output power measurement. Red closed circles show output power and blue closed squares show optical-to-optical efficiency. (b) Spectrum of CW operation.

References

- [1] E. Seres, J. Seres, and C. Spielmann “Extreme ultraviolet light source based on intracavity high harmonic generation in a mode locked Ti:sapphire oscillator with 9.4 MHz repetition rate.” *Opt. Express* **20**, 6185–90 (2012).
- [2] R. J. Jones, K. D. Moll, M. J. Thorpe, & J. Ye, “Phase-Coherent Frequency Combs in the Vacuum Ultraviolet via High-Harmonic Generation inside a Femtosecond Enhancement Cavity.” *Phys. Rev. Lett.* **94**, 193201 (2005).
- [3] M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, S. Hosokawa, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii “Diode-pumped 65 fs Kerr-lens mode-locked