

レーザーダイオード励起カーレンズモード同期 Yb:Lu₂O₃ セラミック レーザー発振器の開発

Development of a Kerr lens mode-locked Yb:Lu₂O₃ bulk ceramic oscillator
pumped by a multimode laser diode

石川 智啓 (M2)
Tomohiro Ishikawa

Abstract

We developed a Kerr lens mode-locked Yb:Lu₂O₃ bulk ceramic laser oscillator pumped by a multimode laser diode. The oscillator generates an output power of 1.83 W of a pulse duration of 135 fs at a repetition rate of 78 MHz. To the best of our knowledge, the output power is the highest in any other mode-locked Yb:Lu₂O₃ bulk ceramic oscillators.

1. はじめに

我々の研究グループでは、MHz 級の高繰返し高次高調波発生光源の開発を目標とし、現在 Yb:YAG 薄ディスクリング型カーレンズモード同期レーザー発振器の開発に取り組んでいる [1]. この発振器では、今までに繰返し周波数 15.2 MHz, 共振器内パルスエネルギー 57 μ J, パルス幅 436 fs を達成した. しかし, より効率的な高次高調波発生のためには共振器内パルスエネルギー 100 μ J 以上, パルス幅 200 fs 以下が必要であるが, Yb:YAG 材料の熱特性, 利得帯域幅によって性能が制限されている. そのため, 我々は Yb:YAG 材料に代わるレーザー材料として, Yb:Lu₂O₃ セラミックに着目した.

Yb:Lu₂O₃ 結晶は, Yb 添加セスキオキサイドレーザー材料のうちの一つであり, Yb:YAG 結晶より高い熱伝導率と広い利得帯域幅を持つ. 2004 年に U. Griebner ら [2]によって, 出力 266 mW, パルス幅 220 fs, 繰返し周波数 97 MHz のモード同期発振が報告された. しかし, Yb 添加セスキオキサイドは 2400°C を超える融点を持つため, 薄ディスク材料のような大口径のレーザー材料を作製することは困難である. その後, Yb:Lu₂O₃ セラミックによるレーザー発振 [3]が報告され, M. Tokurakawa ら [4]によって, 出力 352 mW, パルス幅 357 fs, 繰返し周波数 97 MHz のモード同期発振が報告された. 結晶材料に比べ, セラミック材料では大口径の材料を作製することが容易であるため, Yb:Lu₂O₃ セラミックによる薄ディスク材料が作製できる.

Yb:Lu₂O₃ セラミックは市販されていないため, 上記のリング型発振器へ搭載する前にその特性を調べる必要がある. そのため, カー

レンズモード同期発振の特性評価およびパワースケーリングを目的として, 高出力マルチモードレーザーダイオード励起カーレンズモード同期 Yb:Lu₂O₃ セラミックレーザー発振器の開発を行った. 本発振器では, 出力 1.83 W, パルス幅 135 fs, 繰返し周波数 78 MHz, パルスエネルギー 23.5 nJ の性能が得られた. 出力 1.83 W は今までに報告されている他のバルク Yb:Lu₂O₃ セラミックモード同期レーザー発振器を大きく超える成果である. Yb:Lu₂O₃ セラミックにより薄ディスク材料を作製し, リング型レーザー発振器に搭載することで, 200 fs 以下のパルス幅が期待できる.

2. 実験方法

一般的に, ビーム品質の悪いマルチモード LD 励起によるカーレンズモード同期発振器の作製は困難である. カーレンズ効果によるレンズの集光距離 f_{Kerr} は以下の式で表される.

$$\frac{1}{f_{\text{Kerr}}} = \frac{4n_2 PL}{w^4}$$

ここで, n_2 は媒質の非線形屈折率, P はピークパワー, L は媒質の厚み, w はビーム半径である. カーレンズ効果の強さはビーム半径の 4 乗に比例するため, 発振光を媒質へ強く集光することで, 強いカーレンズ効果が得られる. しかし, マルチモード光源で励起する場合, 発振光を利得媒質へ強く集光すると, マルチモード発振してしまう. 一方で, 発振光を利得媒質へゆるく集光すると, 強いカーレンズ効果が得られない. マルチモードの光源で励起する場合にはこのような問題があるため, カーレンズモード同期は困難である. そのため, マルチモードの光源を励起に用いる場合には SESAM を用いてモード同期が行われてきた. しかし, SESAM を用いると, 変調深度が小さく, 回復時間が長いいため, カーレンズモード同期と比較してパルス幅の長いパルスが生じる.

本研究では, 利得媒質へ発振光を緩く集光することでシングルモード発振を得て, 共振器内に別の非線形媒質として CaF₂ 結晶を配置

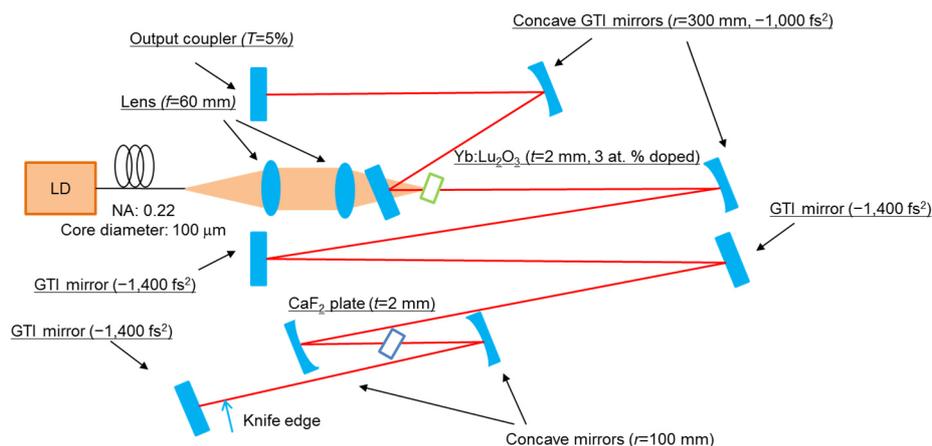


Fig. 1: Schematic of the Kerr lens mode-locked Yb:Lu₂O₃ ceramic oscillator.

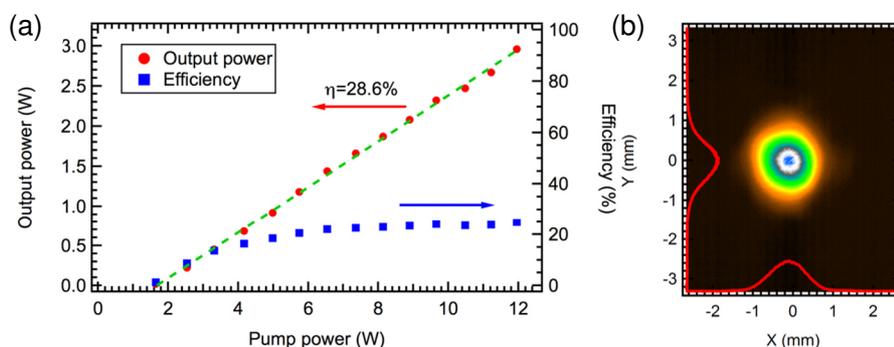


Fig. 2: Characteristics of CW operation. (a) Characteristic of output power. Red circles show output power and blue squares show optical to optical efficiency. (b) Beam profile.

し、そこに発振光を強く集光することでカーレンズ効果を得るという手法を用いてカーレンズモード同期を得た。本手法を用いることで、利得媒質とカーレンズ効果を分離することができ、カーレンズモード同期が可能となる。この手法では、材料による非線形屈折率、材料の厚み、集光度（ビームスポット径）を設計することで、カーレンズ効果の強さを調整できるというメリットがある。また、GDDの量(GTIミラーの枚数)を固定し、非線形材料の位置をビームに沿って変化させることでSPMの量を微調整し、より高精度な分散補償が可能となる。加えて、カーレンズ効果とSPMの調整のために利得媒質を移動する必要がないため、利得媒質において最適なモードマッチングを得ることが容易となる。

本研究では、励起光源として波長 976 nm の VHG による波長安定化ファイバー結合 LD(LIMO32-F200-DL976(VHG)-LM)を使用した。本 LD では、VHG による波長安定化によって、出力の変化に関わらず、 ~ 1 nm の狭帯域なスペクトル幅が得られた。そのため、

Yb:Lu₂O₃ セラミックのゼロフォノンライン励起が可能である。LD にはコア直径 100 μ m のファイバーを結合させた。そのため、強く集光したとしても、励起ビームを小さいスポット径にするのは難しい。

本研究で用いた発振器の構成を Fig. 1 に示す。マルチモードファイバー結合 LD からのビームを $f=60$ mm のレンズでコリメートし、 $f=60$ mm のレンズでダイクロミックミラーの後ろから Yb:Lu₂O₃ セラミックへ集光した。空气中で測定した集光点におけるスポット径は 100 μ m であり、プロファイルはトップ・ハット型であった。Yb:Lu₂O₃ セラミックは厚み 2 mm、Yb 添加濃度は 3 at. % であり、ブリュスター角で銅製のヒートシンクに固定し、水温 18°C で水冷を行った。10 W の励起パワーに対して 86% の吸収を示した。また、Yb:Lu₂O₃ セラミックは $r=300$ mm 凹面ミラーペアにより挟まれ、CaF₂ 結晶は $r=100$ mm 凹面ミラーペアにより挟まれる。共振器内の負分散は GTI ミラーにより与えられ、共振器長 1.92 m の共振器一周分の負分散の合計は波長 1030

nm において $-11,000 \text{ fs}^2$ である。Yb:Lu₂O₃ セラミックでは、透過率の低いアウトプットカップラーを用いると、長波長側の帯域で発振してしまうため、透過率 5% のアウトプットカップラーを用いた。また、モード同期の実験の際には、CW 成分に損失を与えるため、エンドミラーの前方でナイフエッジを用いた。

ABCD 行列による共振器内のモード径の計算から、Yb:Lu₂O₃ 内における CW 発振時の sagittal 面のビームスポット直径は 130 μm であり、 $\sim 65\%$ のモードマッチング効率が求められた。また、モード同期時におけるビームスポット直径は 123 μm であるため、CW に比べて小さくなり、ソフトアパーチャー効果によるカーレンズモード同期発振が期待できる。

3. 実験結果

Fig. 2 に本発振器の CW 発振の特性について述べる。Fig. 2(a) に示されるように、励起出力の増加にともない、発振器の出力は線形に増加し、スロープ効率 28.6% が得られた。CaF₂ 結晶をブリュースター角で配置したため、挿入にともなう出力の低下は確認されなかった。最大出力は励起パワー 12 W 時における 2.96 W であり、これは変換効率 24.7% に相当する。ここまでの励起パワーではビームプロファイルはガウス型であり、シングルモード発振が確認された。12 W 以上の励起出力に対しては、マルチモード発振が確認された。これは熱レンズによると考えられる。また、発振閾値は 1.65 W であり、フルーエンス 11.0 kW/cm² に相当する。Fig. 2(b) に励起パワー 9.66 W 時における CW 発振のビームプロファイルを示す。ビーム半径はそれぞれ水平(X)方向で 0.89 mm、垂直方向(Y)で 1.01 mm であった。ビームプロファイルはガウス型であり、横シングルモード発振が確認された。

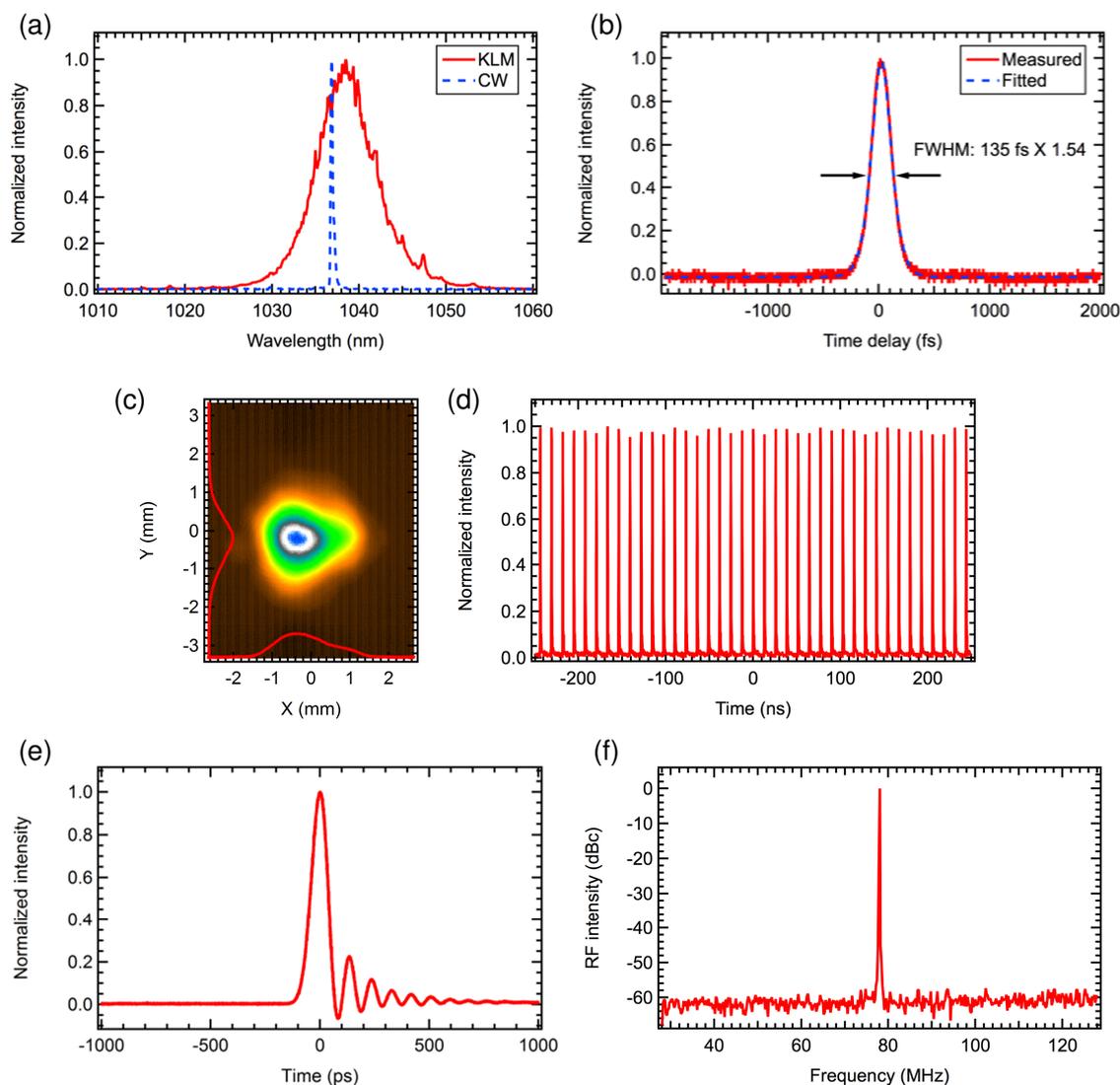


Fig. 3: Characteristics of mode-locked operation. (a) Broadband spectrum obtained under KLM operation (red solid curve) and sharp spectrum obtained at CW operation (blue dashed curve). (b) Autocorrelation trace (red solid curve) fitted by sech^2 shape (blue dashed curve). (c) Beam profile. (d) Pulse trains (e) Pulse trains measured by sampling oscilloscope. (f) RF spectrum.

次に、モード同期の特性について示す。 $r=100\text{ mm}$ の凹面ミラーの片方を、CW発振で最も出力が得られる位置から前方に移動して安定条件の端に持っていき、セラミック材料でできたナイフエッジをエンドミラー前方に挿入し、光学定盤をロックすることでモード同期がスタートできる。モード同期発振の出力特性をFig. 3に示す。Fig. 3(a)に示されるように、CW発振では1036 nmをピークに発振していたが、モード同期が生じることでスペクトルが広がり、中心波長1038.6 nm、スペクトル幅7.3 nmのスペクトル特性が取得された。この時、励起パワーは8.9 Wであり、平均出力は1.83 Wで、変換効率は20.6%である。CW発振に比べて中心波長が長波長側にシフトし

たのは、分散補償の不足のためであり、分散補償の最適化によってより広帯域なスペクトルが得られると考えられる。また、パルス幅を強度自己相関計測によって測定した結果をFig. 3(b)に示す。 sech^2 を想定してフィッティングを行った結果、 $135 \pm 7\text{ fs}$ のパルス幅が得られた。また、スペクトル幅から計算されるフーリエ限界のパルス幅は125 fsである。共振器外部での分散保障は行わなかったため、少しチャープが乗っている。ビームプロファイルはCW発振時に比べてわずかに変化し、ビーム半径はX方向、Y方向でそれぞれ1.41 mm、1.37 mmであった(Fig. 3(c))。発振器から出射されたパルス列をフォトダイオードを用いて測定して得られたパルス列をFig. 3(d)に示す。

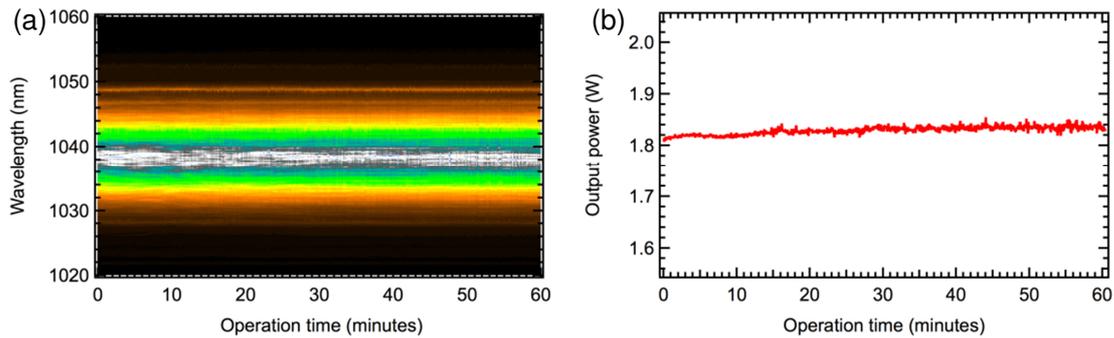


Fig. 4: Stability characteristics of mode-locked operation. (a) Spectrogram. (b) Output power.

パルスごとの強度変調は小さく、パルスの時間間隔は 12.8 ns で、これは共振器長に対応した時間間隔と一致し、パルスエネルギーは 23.5 nJ と計算される。また、より長時間のスケールでもパルス列を確認したが、Q-switch の包絡線は観測されなかった。シングルパルス発振、CW モード同期発振を確かめるために、サンプリングオシロスコープによるパルスの測定とスペクトルアナライザによる RF スペクトルの測定を行った。Fig. 3(e)に示されるように、パルス列中の一つのパルスについて、2 ns のレンジにわたり観測したが、サブパルスは観測されなかった。また、次のパルスが観測される 20 ns のレンジでも観測したが、サブパルスは観測されなかった。Fig. 3(f) はスペクトルアナライザによって測定した RF スペクトルであり、繰返し周波数は 78 MHz であることが確認された。消光比は 60 dBc である。この時、RBW は 30 kHz である。繰返し周波数の付近にはサイドピークは観測されなかった。これらの測定から、シングルパルス発振、CW モード同期発振が確かめられた。

Fig. 4 に本発振器のカーレンズモード同期の安定性を示す。発振器はハウジングを施され、外部のエアフローの影響が小さくなるようになっている。Fig. 4(a)はモード同期スペクトルを 5 秒ごとに取得したものをつなげて作成したスペクトログラムであり、1 時間以上にわたって安定的にスペクトルの広がりが続き、連続的にモード同期発振したことがわかる。また、スペクトルのドリフトや大きな変化は確認されなかった。Fig. 4(b)はこの時の出力特性を 1 時間にわたって測定したものである。出力は安定しており、標準偏差は 7.3 mW であった。ただし、時間の経過に伴い出力がわずかに

上昇しているのは、使用した熱式のパワーメーターを冷却しなかったため、熱が蓄積する事によって生じた誤差だと考えられる。

4. まとめ

利得媒質へゆるく集光することでシングルモード発振を得て、別の非線形媒質(CaF₂結晶)へ強く集光することでカーレンズ効果を得るという共振器の構成によって、1.83 W の平均出力で 135 fs のパルス幅のパルスが 78 MHz で得られた。本研究で得られた平均出力 1.83 W は、今まで報告されている Yb:Lu₂O₃ バルクセラミックレーザー発振器を大きく超えている。

References

- [1] A. A. Eilanlou, Y. Nabekawa, M. Kuwata-Gonokami, and K. Midorikawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 082701 (2014).
- [2] U. Griebner, V. Petrov, K. Petermann, and V. Peters, *Opt. Express* **12**, 3125 (2004).
- [3] K. Takaichi, H. Yagi, A. Shirakawa, K. Ueda, S. Hosokawa, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii, *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.* **202**, R1 (2005).
- [4] M. Tokurakawa, K. Takaichi, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, S. Hosokawa, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii, *Opt. Express* **14**, 12832 (2006).

