

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトニクス: 3.4 レーザー装置・材料

2025年3月14日(金) 9:00 ~ 11:45 皿 K309 (講義棟)

[14a-K309-1~10] 3.4 レーザー装置・材料

佐藤 庸一(理研)、野邑 寿仁(日大)

9:00 ~ 9:15

[14a-K309-1]

LD励起QスイッチTm:YLFレーザーの開発

○内山 達士¹、戸倉川 正樹^{1,2} (1.電通大レーザーセンター、2.電通大脳医工学研究センター)

9:15 ~ 9:30

[14a-K309-2]

Ho:YAGセラミックレーザーの開発

○(M1)山岡 徹郎¹、昆野 愛夕¹、高橋 彰人¹、戸倉川 正樹^{1,2} (1.電通大レーザー研、2.電通大脳・医工学研)

◆ 英語発表

9:30 ~ 9:45

[14a-K309-3]

Visible vector vortex lattices from diode end pumped Pr³⁺:LiYF₄ solid-state laser○(PC)Srinivasa Rao Allam¹, Takuya Morohashi¹, Quan Sheng², Takashige Omatsu^{1,2} (1.Chiba Univ., 2.Tianjin Univ.)

9:45 ~ 10:00

[14a-K309-4]

Er-Yb共添加ファイバ増幅器における横モード劣化

○木村 祥太¹、小林 雄太¹、橋本 洋輔¹、荒木 智宏¹ (1.JAXA)

10:00 ~ 10:15

[14a-K309-5]

レーザー加工に向けた最大26 W波長2 μm帯ナノ秒Q-switch Tmファイバーレーザーの開発

○(M1)増永 真輝¹、戸倉川 正樹^{1,2} (1.電通大レーザー研、2.電通大脳・医工研)

10:30 ~ 10:45

[14a-K309-6]

Tm:YAGセラミックレーザーにおける受動モード同期

○(M1)秋山 由洸¹、住谷 大志¹、小林 真隆¹、角田 明博²、中崎 雅人²、秋山 英文¹、小林 洋平¹ (1.東大物性研、2.JX 金属株式会社)

10:45 ~ 11:00

[14a-K309-7]

位相アパーチャーカーレンズモード同期レーザー検討

○戸倉川 正樹^{1,2} (1.電通大レーザー研、2.電通大脳医工センター)

11:00 ~ 11:15

[14a-K309-8]

非線形Yb:YAG再生増幅器によるフェムト秒パルス発生

○棚橋 晃宏¹、宮田 憲太郎¹、坂下 亨男¹、小川 貴代¹、斎藤 徳人¹、和田 智之¹ (1.理化学研究所)

11:15 ~ 11:30

[14a-K309-9]

高出力1300nm帯フェムト秒プラセオジム添加フッ化物ファイバ増幅器

○山田 樹生¹、高野 準也¹、藤 貴夫¹ (1.豊田工大)

11:30 ~ 11:45

[14a-K309-10]

時間伸長分光を用いたYbファイバMamyshev発振器におけるノイズライクパルスの観測

村田 昌聡¹、戸田 裕之¹、○鈴木 将之¹ (1.同志社大学)

LD 励起 Q スイッチ Tm:YLF レーザーの開発

LD-pumped Q-switched Tm:YLF laser

電通大レーザーセンター¹, 電通大脳医工学研究センター² ○(M1)内山 達士¹, 戸倉川 正樹^{1,2}

ILS UEC¹, CNBE UEC², [○]Tatsushi Uchiyama¹, Masaki Tokurakawa^{1,2}

E-mail: 2010090u@ils.uec.ac.jp

1. はじめに

レーザー測距, 材料科学, 表面物理などの分野ではパルス幅や繰り返し周波数が可変であるパルス光源が求められている. 能動 Q スイッチレーザーはトリガーシグナルによって, 容易にパルス光の繰り返し周波数を変化させることが可能であり, また共振器の取り出し効率を変化させることによってパルス幅を操作する手法も報告されている.

本研究ではポッケルスセルを用いた波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯能動 Q スイッチ Tm:YLF レーザーの開発を行い, その印加電圧を変えることによって実効的な取り出し効率を調整し, 繰り返し周波数やパルス幅を調整可能なレーザー開発を目標とした

2. 実験構成

実験構成を図 1 に示す. L 字型共振器であり, 励起光源には $792\ \text{nm}$ ファイバー結合 LD (最大出力: $30\ \text{W}$, $NA=0.22$, コア径: $105\ \mu\text{m}$, $M^2: 46$) を使用し. 励起光の集光系には焦点距離が $24.5\ \text{mm}$ と $150\ \text{mm}$ のレンズペアを使用し, ダイクロイックミラー(DM)を通して利得媒質中でビーム半径 $300\ \mu\text{m}$ に集光した. 利得媒質は AR コーティングされた Tm³⁺:YLF (3%, 20mm) を使用し, これを銅製のホルダーに入れて $18\ ^\circ\text{C}$ に保ち, 励起光に対して垂直に配置した. また共振器内に Q スイッチ動作のために偏光子とポッケルスセル, $1/4$ 波長板を DM と M1 の間に配置している. 偏光子は 56° で配置したとき, 波長 $1940\ \text{nm}$ の p 偏光に対して透過率 99% であり, M1 は曲率半径が $500\ \text{mm}$ の凹面鏡で, 出力鏡(OC)は 10% のものを用いて実験を行った.

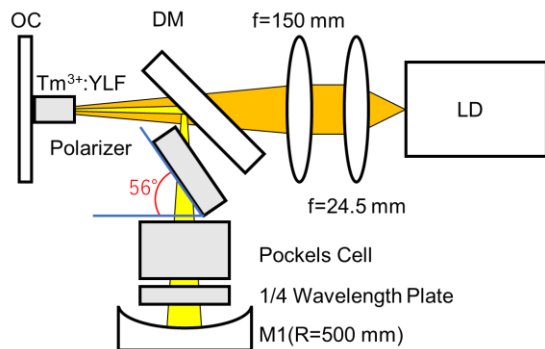


図 1 共振器構成

3. 結果

図 2 に $9.8\ \text{W}$ 励起時, ポッケルスセルに $500\ \text{Hz}$ で $1/4$ 波長板として機能するように電圧加えたときの出力波形を示す. 平均出力は $30\sim 70\ \text{mW}$ ほどで揺れていた. パルス間隔は $2\ \text{ms}$ であり, 実際に $500\ \text{Hz}$ の変調がかかっていることがわかる. また, パルス幅は $800\ \text{ns}$ であった. 励起光を強くすると $39.7\ \text{mJ}$ の出力が得られたが, 共振器内エネルギーでは $100\ \text{mJ}$ レベルとなり OC の破壊が確認され, これ以上の実験が制限されてしまった.

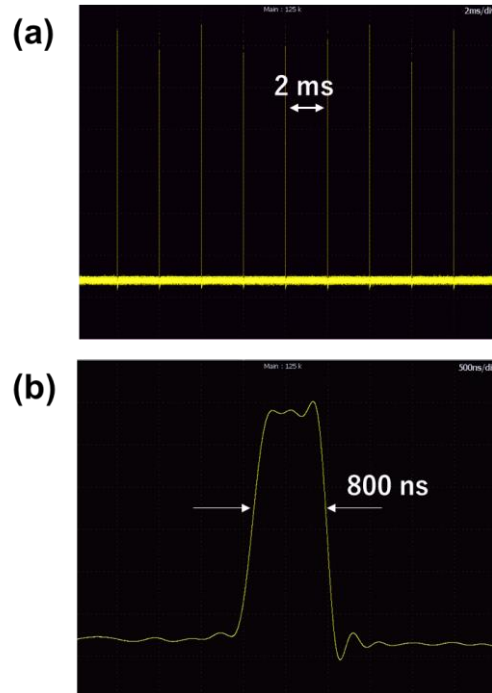


図 2 時間波形(a)パルス列(b)パルス波形

4. まとめ

ポッケルスセルを用いた繰り返し周波数やパルス幅を調整可能な能動 Q スイッチ Tm:YLF レーザーの開発を目指した. 繰り返し周波数 $500\ \text{Hz}$ のとき平均出力 $50\ \text{mW}$ 程度, パルス幅 $800\ \text{ns}$ の Q スイッチ発振を確認したが, OC の破壊が起きてしまった. 当日は OC の透過率を大きくし, 共振器内部のレーザー強度を下げることで破壊を防いだ時の結果についても報告する.

Ho:YAG セラミックレーザーの開発

Development of Ho:YAG Ceramic Laser

電気通信大学, 新世代研究センター¹, 電気通信大学, 脳・医工学研究センター²

○(M1)山岡 徹郎¹, 昆野 愛夕¹, 高橋 彰人¹, 戸倉川 正樹^{1,2}

Institute for Laser Science, UEC¹, Center of Neuroscience and Biomedical Engineering, UEC²

○Tetsuro Yamaoka¹, Ayu Konno¹, Akihito Takahashi¹, Masaki Tokurakawa^{1,2}

E-mail: t_yamaoka@ils.uec.ac.jp

1. はじめに

Ho:YAG は長い蛍光寿命や高い熱伝導率を有し[1]、波長 1.9 μm 帯 Tm レーザーを励起光源として波長 2.1 μm にて高効率かつ高出力なレーザー動作が可能である。レーザーセラミックは単結晶と同等の熱伝導率を有し、単結晶よりも優れた機械的特性や濃度均一性、形状自由度も報告されている。

本研究では異なる添加濃度の Ho:YAG セラミックを用いた CW レーザー特性を報告する。

2. Ho:YAG セラミックレーザー実験構成

図 1 に実験構成を示す。将来的なモード同期実験のため Z 型とした。利得媒質には神島化学工業(株)製の添加濃度が異なる 3 種類(1at.%, 3at.%, 5at.%)の Ho:YAG セラミック(結晶長 5 mm)をブリュースター角で用いた。励起光源は波長 1907 nm Tm ファイバーレーザーを用いた。



図 1 Ho:YAG セラミックレーザー発振器構成

3. 実験結果

図 2(a), (b)に OC の透過率 T_{oc} を変化した時の出力特性を示す。

1at.%添加 Ho:YAG では $T_{oc}=30\%$ の時、波長 2096 nm にて最大スロープ効率 16.2%、最大出力 410 mW を得た。また 3at.%添加 Ho:YAG では $T_{oc}=40\%$ の時、波長 2096 nm にて最大スロープ効率 28.2%、最大出力 620 mW を得た。

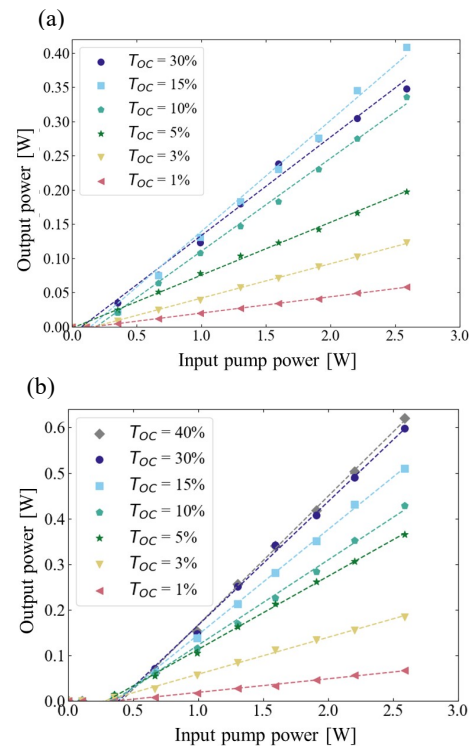


図 2 (a) 1at.% (b) 3at.% 添加 Ho:YAG レーザー出力特性

4. まとめ

1at.%および3at.%添加 Ho:YAG セラミックを用いて CW レーザー発振に成功した。4at.%添加 Ho:YAG を使用した CW レーザーの報告にて、閾値の上昇と急激な効率の低下が見られていたが[2]、本研究の 3at.%添加 Ho:YAG セラミックレーザーではこれらの兆候は見られず、高濃度添加 Ho:YAG セラミックの高効率なレーザー発振の可能性を示した。

今後は比較のために 5at.%添加セラミックと 1at.%添加単結晶を用いた発振実験を行う。

参考文献

- [1] Gaoyou Liu et al, Opt. Lett, **46**, 82-85(2021)
- [2] Ting Zhao et al, Opt. material, **35**, 712-714 (2013)

Visible vector vortex lattices from diode end pumped $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ solid-state laser

Srinivasa Rao Allam^{1,2,3}, Takuya Morohashi¹, Quan Sheng⁴, and Takashige Omatsu^{1,2,4*}

¹Graduate School of Engineering Chiba University Chiba 263-8522, Japan

²Molecular Chirality Research Centre, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan

³Institute for Advanced Academic Research, Chiba University, Chiba, 263-8522, Japan

⁴Institute of Laser and Optoelectronics, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

E-mail: *omatsu@faculty.chiba-u.jp

Optical visible vortex and vector lattice modes, possessing multiple phase and polarization singularities on the wavefront, have been widely studied in a myriad of fundamental sciences and advanced engineering technologies [1,2].

External mode conversion devices, such as computer-controlled spatial light modulators (SLMs) or digital micromirror devices (DMDs) allow the generation of the scalar and vector lattice modes [3], however, these devices typically require rather expensive and complex experimental setup, and they also have major drawbacks in the power scalability of the system owing to their low damage threshold and significant diffraction loss.

Transverse mode-locking technique in the laser systems is an alternative to directly generate scalar vortex lattice modes from the laser cavity [4,5], and it enables the power scaling of the system without any expensive phase modulation devices. In fact, we have successfully demonstrated visible scalar vortex lattices from a diode-pumped $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ (YLF) laser cavity by employing the transverse mode-locking technique [5-7].

In this presentation, we herein report, for the first time to the best of our knowledge, the direct generation of vector vortex lattice modes from an ultra-compact diode end-pumped $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ laser (cavity length $\sim 8\text{mm}$) by the transverse mode locking of two orthogonally linear polarized Hermite-Gaussian (HG) modes.

The schematic diagram of the laser cavity used in this study is shown in Fig. 1(a). An InGaN laser diode (NDB7K75) operating at 442 nm wavelength was used as a pump source, and its output was focused to be an elliptical spot with radii $w_{px}=58\ \mu\text{m}$ and $w_{py}=45\ \mu\text{m}$ in the horizontal and vertical directions, respectively, at the input facet of c -cut Pr:YLF (0.5 at.% Pr^{3+} ions doping, 5 mm long and $3\times 3\ \text{mm}^2$ aperture) crystal using a plano-convex lens with a focal length $f=35\ \text{mm}$. The input facet of Pr:YLF crystal had anti-reflection for 442 nm and high reflection ($R\sim 99.8\%$) for 640 nm. The output facet has an anti-reflection coating for 442 nm and 640 nm, thus enabling the 640 nm laser operation. It is worth noting that the laser crystal temperature was maintained at $12\ ^\circ\text{C}$. We also used a 150 mm concave output coupler (OC) with 98.7% reflection (1.3% transmission loss) for 640 nm. The off-axis displacement of OC led to the phase-locking of orthogonally linear polarized HG modes with different eigen frequencies, thus resulting in the production of vector vortex lattice modes [Fig. 1(b)].

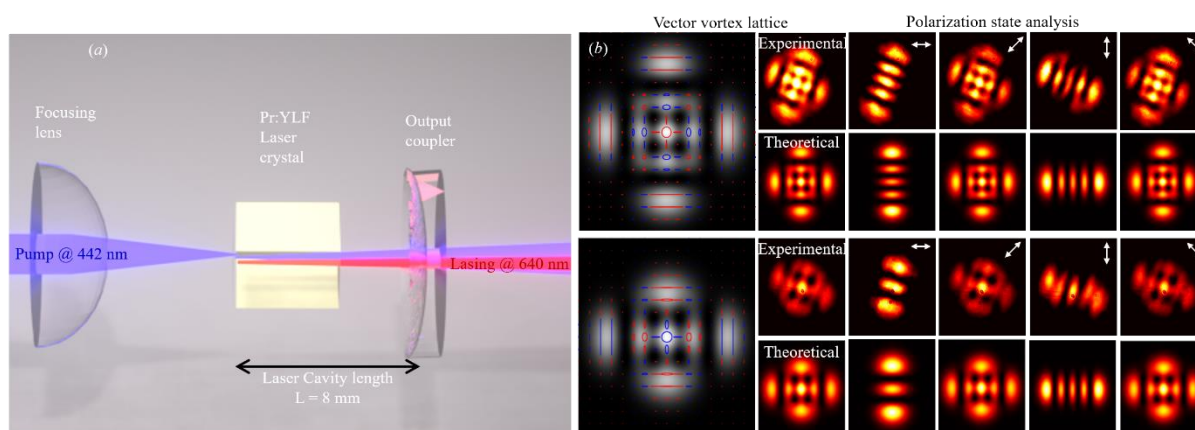


Fig. 1. (a) Laser cavity configuration of Pr:YLF solid-state laser with an off-axis pumping geometry for the generation of vector vortex lattices. (b) Experimental and simulated vector vortex lattices.

References

- [1] K. Dholakia, P. Reece, and M. Gu, *Chem. Soc. Rev.* **37**(1), 42-55 (2008).
- [2] T. Omatsu, and A. S. Rao, *Photonics Rev.* **2024**, 240208 (2024).
- [3] S. N. Khonina, and A. P. Porfirev, *Nanophotonics* **11**(4), 697-712 (2022).
- [4] X. Wang, Z. Zhang, X. Fu, A. Khan, S. Zhao, Y. Gao, Y. Jie, W. He, X. Li, Q. Liu, and C. Zhao, *Adv. Photonics Nexus* **2**(2), 024001-024001 (2023).
- [5] A. S. Rao, T. Miike, K. Miyamoto, and T. Omatsu, *J. Opt.* **23**(7), 075502 (2021).
- [6] Y. Yoneda, S. R. Allam, W. R. Kerridge-Johns, Y. Fujimoto, and T. Omatsu, *Laser Photonics Rev.* 2401403 (2024).
- [7] T. Morohashi, A. S. Rao, and T. Omatsu, *Appl. Opt.* **62**(34), 9183-9187 (2023).

Er-Yb 共添加ファイバ増幅器における横モード劣化

Transverse mode degradation in an erbium–ytterbium co-doped fiber amplifier

宇宙航空研究開発機構 ○木村 祥太, 小林雄太, 橋本洋輔, 荒木智宏

JAXA, °Shota Kimura, Yuta Kobayashi, Yosuke Hashimoto, Tomohiro Araki

E-mail: kimura.shota@jaxa.jp

宇宙空間における高速な光通信網の構築のためには高出力の光増幅器が不可欠である。特に光通信網を長期間運用するためには高出力光増幅器の長寿命化が必要となる。近年、波長 $1\mu\text{m}$ 帯の高出力 Yb ファイバ増幅器において、出力の横モードが数時間かけて準静的に劣化する現象が発見された[1]。この原因は Yb のフォトダークニングに起因した横モード間のエネルギー移動と考えられている。我々は宇宙通信に使用される波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯の Er-Yb 共添加ファイバ増幅器においても同様の現象を観測した[2]。本発表ではこの詳細について報告する。

図 1(a)に横モード不安定性の評価系を示す。波長可変光源の出力をプリアンプで 50mW まで増幅し、EYDF に投入した。EYDF はダブルクラッド構造であり、コアは複数モードが伝搬する設計である。EYDF で増幅された基本モードの出力はパワーメータで計測した。EYDF 中のコアを伝搬する高次モードは融着点にてダブルクラッドファイバの第一クラッドに投入され、この一部がポンプコンバイナのマルチモードファイバに接続されたパワーメータに投入される。

図 1(b)(c)に 300 時間動作時の基本モードと高次モードの出力の波長依存性を示す。各信号光の波長において基本モードの低下と高次モードの増加が観測されており、基本モードと高次モード間のエネルギー移動が生じていると考えられる。講演ではこの詳細について議論する。

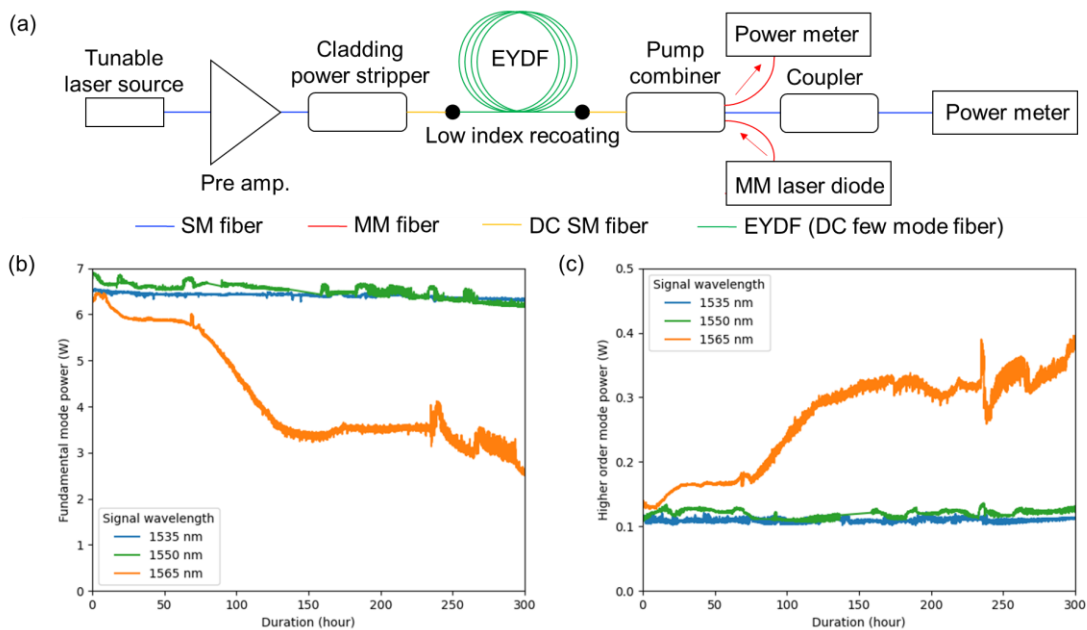


Fig. 1 (a) Experimental configuration. SM; single-mode, MM; multi-mode, DC; double clad. (b)(c) Time variation of fundamental mode and higher-order mode power at various signal wavelengths.

[1] L. Xie *et al.*, *Opt. Express* **29**(6), 7986 (2021) [2] S. Kimura *et al.*, *Opt. Express* **32**(26), 45679 (2024)

レーザー加工に向けた最大 26 W 波長 2 μm 帯ナノ秒 Q-switch Tm ファイバーレーザーの開発

Development of AOM Q-switched Tm fiber laser for Processing

○(M1) 増永 真輝¹, 戸倉川 正樹^{1,2}(電通大レーザー研¹, 電通大脳・医工研²)

○Masaki Masunaga¹, Masaki Tokurakawa^{1,2}(ILS UEC¹, CNBE UEC²)

1. はじめに

波長 2 μm 帯レーザーはポリマー材料の加工や中赤外領域への波長変換のために注目を集めている[1]。我々はレーザー加工への応用を目指し、音響光学変調器(AOM)を用いた Q スイッチ法による波長 2 μm 帯 Tm ファイバーレーザー発振器を開発してきた。

本研究ではレーザー加工のスループット向上のために増幅を行い、平均出力を上げることを目標とした。

2. 実験構成

実験構成を Fig. 1 に示す。利得媒質にはコア径 25 μm の Tm 添加ダブルクラッドファイバー (LMA-TDF-25P/250-HE, Nufern) を使用し、793 nm のレーザーダイオード(LD)励起でのクロス緩和過程を用いた高出力動作を目指した。種光源は FBG にて波長選択をした AOM-Q スイッチ Tm ファイバーレーザーを用いており、繰り返し周波数 100kHz と 70kHz においてそれぞれパルス幅~100 ns, 90 ns となっている。増幅器利得ファイバーはペルチェ素子を用いた冷却システムにより、0°Cに保った。

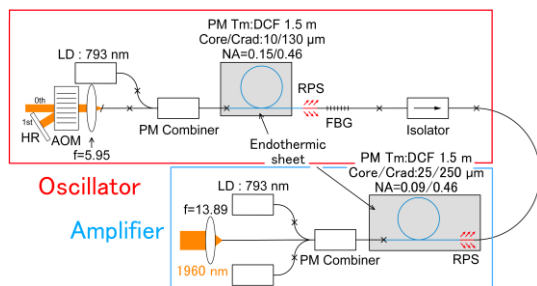


Fig. 1. Experimental Setup

3. 増幅実験結果と考察

パルスの繰り返し周波数が 100 kHz、70 kHz のときの増幅特性の比較を Fig. 2 に示す。スロープ効率はいずれも 43%であり、70 kHz では最大 60 W 励起で 26.6 W の平均出力を達成した。

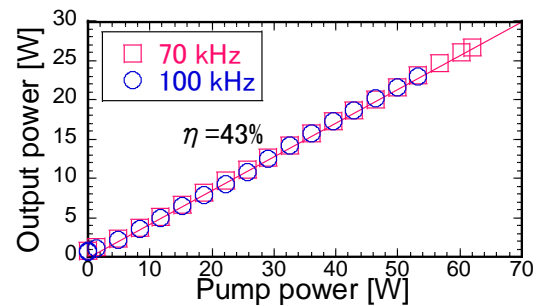


Fig. 2. Measured output power at amplifier with respect of pump power

Fig. 3 にパルスの時間波形を示す。増幅によるパルス幅の変化はほぼ観測されず、70 kHz でパルス幅 90 ns、4 kW 程度のピーク光強度を得た。

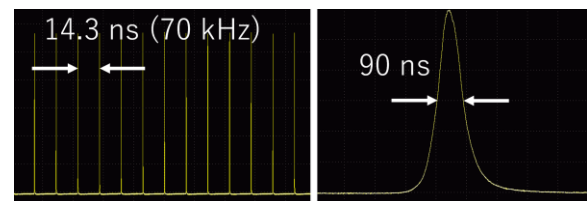


Fig. 3. Time waveform of the amplifier output at 70 kHz operation

4. まとめ

Q スイッチ Tm ファイバーレーザーを種光とし、コア系の 25 μm のファイバー増幅器にて繰り返し 70 kHz 時に最大平均出力 26 W、パルスエネルギー 370 μJ 約 4 kW のピーク光強度を達成した。

参考文献

[1] Ilya Mingareev, et al. Optics & Laser Technology, 44, 2095–2099(2012)

Tm:YAG セラミックレーザーにおける受動モード同期

Passive Mode Locking in Tm:YAG Ceramic Laser

東大物性研¹ JX 金属株式会社² ○秋山 由洸¹, 住谷 大志¹, 小林 真隆¹, 角田 明博², 中崎 雅人², 秋山 英文¹, 小林 洋平¹

ISSP, Univ. Tokyo.¹, JX Advanced Metals Co. ², ○Yukihiro Akiyama¹, Taishi Sumiya¹, Masataka Kobayashi¹, Akihiro Tsunoda², Masato Nakazaki², Hidefumi Akiyama¹ and Yohei Kobayashi¹

E-mail: akiyuki@issp.u-tokyo.ac.jp

波長 2 μm の短パルスレーザーはポリマーの材料加工や中赤外分光への応用が期待されている。この波長はアイセーフであり安全性も高い。Tm³⁺は 2 μm に広い利得帯域を有し、この波長の超短パルスを生成しうる利得媒質である。Tm 添加固体レーザーでは、2017 年に Tm: Sc₂O₃ で Kerr-Lens モード同期が実証されて以降[1]、いくつかの母材で Kerr-Lens モード同期が報告されている [2, 3]。しかし熱的に優れた特性を持ち、高い量産性を持つ母材である YAG(Yttrium Aluminum Garnet)セラミックスにおいては、カーレンズモード同期は実証されていない。セラミックスは単結晶と比較して製造コストが安い、大型化が容易という利点がある。我々は高品位な Tm:YAG セラミックスを開発し、Kerr Lens モード同期レーザーの実現を目指している。今回はその前段階として、狭帯域ではあるが Tm:YAG セラミックレーザーにおける受動モード同期と見られる特徴を観測したので報告する。

実験構成を Fig.1 に示す。励起光には波長 785 nm の CW 光の Ti:Sapphire レーザーを使用した。共振器はビーム径を調整しやすい x-fold cavity を構成した。利得媒質には厚さ 10 mm, Tm 添加濃度 3 at% の Tm:YAG を使用し、媒質は励起光が Brewster 角で入射するように配置した。共振器全体での GDD はおよそ -1000 fs^2 である。

Fig.2 にフォトダイオードから得られた繰り返し周波数付近の RF スペクトルおよび時間波形と、光スペクトラムアナライザで取得した発振スペクトルにおける CW 時とモード同期時の比較を示す。RF スペクトルでピークが一本になった際に時間波形はパルス的になった (Fig.2 の青線)。また、この時発振スペクトルのピークは三つに分裂していた。これらの特徴は受動モード同期の挙動であるが、光スペクトルの大きな広がりは見られず、Kerr-Lens モード同期とは考えにくい。講演では実験、データの詳細を報告する。

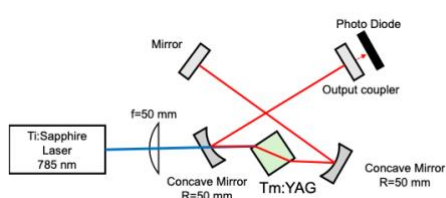


Fig. 1 Tm:YAG laser cavity

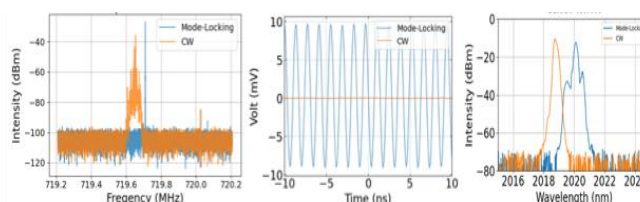


Fig. 2 (left) RF spectrum, (middle) temporal waveform, (right) laser spectrum

[1] M. Tokurakawa, *et al.*, *Opt. Lett.* **42**, 3185-3188 (2017).

[2] A. Suzuki, *et al.*, *Opt. Express* **29**, 19465-19471 (2021).

[3] Y. Zhao, *et al.*, *Opt. Lett.* **46**, 3428-3431 (2021).

位相アパーチャーカーレンズモード同期レーザー検討

Proposal of phase aperture Kerr-lens mode locked laser

電通大レーザー研¹, 電通大脳医工学研究センター² ○戸倉川 正樹^{1,2}

ILS, UEC¹, CNBE UEC², Masaki Tokurakawa^{1,2}

E-mail: tokura@ils.uec.ac.jp

カーレンズモード同期とは3次の非線形光学効果である光カー効果によって高い瞬時光強度を有する超短パルス発振時のみ大きなレンズ効果が媒質中に発生し、レーザー共振器中の空間光強度分布を変化させ、高速広帯域かつ深い変調効果を実現し超短パルス発振を可能とする。このとき光を遮るピンホールなど用いて透過率(損失)に変調を与える手法をハードアパーチャー(HA)カーレンズモード同期(図 1a), 利得媒質中での励起光分布とレーザー光分布の空間整合性(利得)に変調を与える手法をソフトアパーチャー(SA)カーレンズモード同期 (図 1b) と呼ぶ。本発表では新たに共振器内で2次元空間位相分布を制御しその干渉効果を利用する、位相アパーチャーカーレンズモード同期法 (図 1c) の検討について発表を行う。

上記 HA(図 1a)では光を遮り0として損失効果が発生させていたが、本提案手法 PA(図 1c)ではその中心部と外周部の位相を反転させて干渉の効果を利用する。光の干渉効果は非常に大きく、例えば空間の広がりを見捨てて簡易的に計算すると1%のエネルギーは電界振幅では10%の大きさを有し、これを干渉させると $(1-0.1)^2$ の2乗、即ち0.81となり19%の変調効果が発生する。これはHAでは1%の変調効果であったものが19%の変調効果を生み出すことを意味している。

【数値計算】 現実では光はガウス分布のような2次元分布を有している。カーレンズ効果によって共振器中の遠視野領域にてビーム径が変化するとし、アパーチャーのホールサイズに対するビーム径の大きさを Normalized beam size と定義して、HA と PA の両方で共振器中集光部での光強度がどのように変化するかを回折積分により計算した結果を図2に示す。PAは干渉の効果によってHAに比べてより強度変調効果が得られることが分かった。これは干渉の効果によって外周部にサイドローブが発生していることによる。これより集光部分においてSAやHAを併用することによって、HAカーレンズモード同期に比べより大きな変調効果を示しうることが分かった。

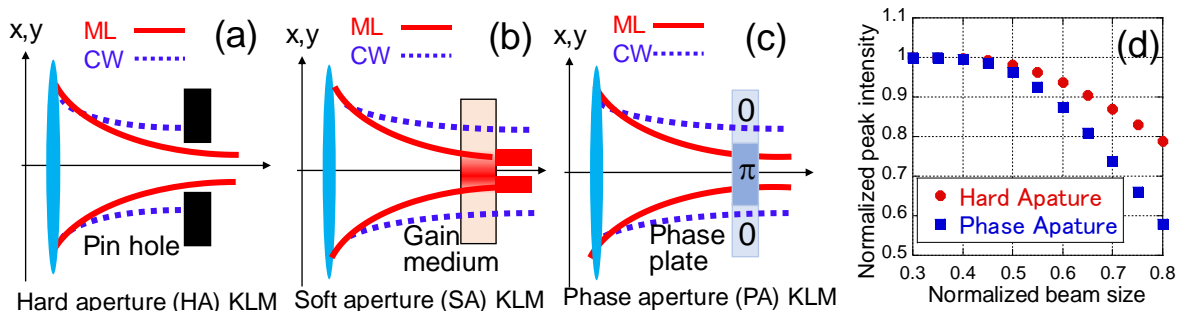


Fig.1 Schematic pictures of (a)Hard aperture Kerr-lens mode-locking, (b) Soft aperture Kerr-lens mode-locking and (c)Phase aperture Kerr-lens mode-locking. (d) Calculated Normalized peak intensity (peakintensity with Aperture/Peak intensity WO aperture) of HA and PA as a function of normalized beam size (beam size/hole size of aperture).

非線形 Yb:YAG 再生増幅器によるフェムト秒パルス発生

Compact Nonlinear Yb:YAG Regenerative Amplifier

理研・光量子工学研究センター

〇棚橋 晃宏, 宮田 憲太郎, 坂下 亨男, 小川 貴代, 斎藤 徳人, 和田 智之

RIKEN Center for Advanced Photonics, RIKEN

A. Tanabashi, K. Miyata, M. Sakashita, T. Ogawa, N. Saito and S. Wada

E-mail: akihiro.tanabashi@riken.jp

様々な科学領域やレーザー加工などの産業応用において超短パルス特性を持つ高出力レーザーは広く利用されている。小型で効率の良いシステムの構築のためには LD 直接励起が可能な Yb 系の材料を媒質としたものが有望である。その中で Yb:YAG は高いゲインと熱伝導特性に優れ高出力動作に向いている。一方で Yb:YAG の増幅帯域は他の Yb 系媒質と比べて狭く、さらにゲインナローイング (GN) によるスペクトル狭窄化で 10^5 以上の増幅率ではフェムト秒パルスを得ることは難しい。Yb:CALGO、Yb:KYW 等がより広い増幅帯域を持つが、その代償として低いゲイン、或いは低い熱伝導率となる。またこれらは高品質の結晶を得るのが難しく、いまだ高出力領域では Yb:YAG に実績がある。2010 年代中頃に GN によるスペクトル狭窄化を克服し高エネルギーのフェムト秒パルスを得る手法として増幅器内の透過材料による自己位相変調 (SPM) を利用することが提案された[1]。この非線形効果を利用した増幅は薄ディスク[2]やファイバー形状[3]の媒質への適用例はあるが、バルクへの適用は多くない。我々は Yb:YAG のバルク結晶に同手法を適用することで、シンプル且つコンパクトな構成を維持したままフェムト秒領域に十分圧縮可能な帯域幅を持つ再生増幅器を構築した。

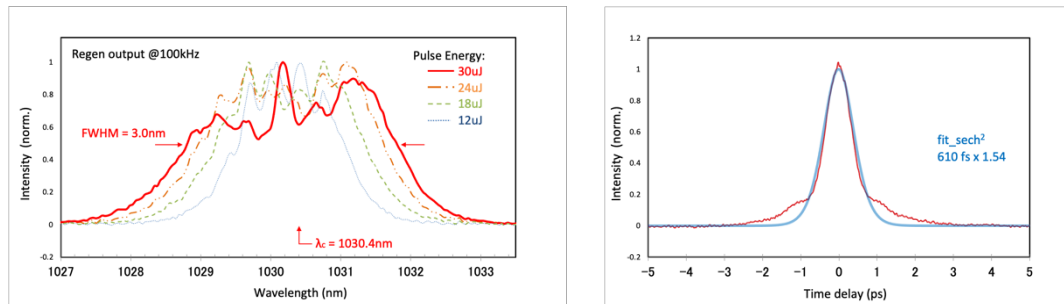


Fig. 1. Measured spectra (left) and an autocorrelation (right) of the nonlinear Yb:YAG regenerative amplifier.

シード光は 1030nm 帯ファイバーモードロックレーザー (帯域幅 10nm [FWHM]、時間幅 10ps、繰返し周波数 10MHz、平均出力 10mW) を用いた。励起は InGaAs の 940nm 帯 LD を使い、ファイバー結合により Yb:YAG 結晶 (Yb:0.7at.%, 30mmL, 1.7mmφ) の両側端面から行った。通常のチャープパルス増幅では、30μJ のパルスエネルギーのとき帯域幅 1nm 未満となり圧縮後パルス幅は 2ps 以上となる。一方、シードレーザーの出力に II-VI 社製のプログラマブル光フィルターを用いて通常とは反対の負にチャープ (GDD $\sim 0.3\text{ps}^2$) をかけた条件でパルスを増幅すると、その過程で一旦縮小した帯域幅が SPM の効果により増加に転じ 30μJ のエネルギーの時、帯域幅 3nm まで再拡張された。これを透過型回折格子対で圧縮することでパルス幅 610fs が得られた。Fig.1 に増幅後スペクトルと圧縮後の自己相関波形を示す。さらにエネルギーを高めたい場合は次段のマルチパスアンプにより 1mJ 以上に増幅できることを確認している。この段では再度 GN によりスペクトル帯域が狭まり、圧縮後パルス幅は sech^2 のパルス形状を仮定した時 900fs となった。この時のピークパワーは 1GW と見積られる。このフェムト秒パルス光源は精密な加工やアブレーションをコンパクトなシステムで実現するための重要な構成要素となると期待される。

謝辞

本研究は防衛装備庁安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

[1] J. Pouysegur *et al.*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **21**, 212–219 (2015).[2] M. Ueffing *et al.*, Opt. Lett. **41**, 3840–3843 (2016).[3] W. Liu *et al.*, Opt. Lett. **40**, 151–154 (2015).

高出力 1300nm 帯フェムト秒プラセオジウム添加フッ化物ファイバ増幅器

High power femtosecond praseodymium-doped fluoride fiber amplifier at 1300nm

豊田工大¹ ○(B)山田 樹生¹, (M1)高野 準也¹, 藤 貴夫¹

Toyota Technological Institute¹ ○Tatsuki Yamada¹, Junya Takano¹ and Takao Fuji¹

Email: sd21097@toyota-ti.ac.jp

1. 背景

多光子顕微鏡は生きたマウスの脳を非破壊的に観察することができるので、多光子顕微鏡の普及は、記憶創成のメカニズムの解明の重要な足掛かりとなる[1]. 多光子顕微鏡に最適な光源の一つに、波長 1300nm 帯超短パルスレーザーが挙げられる. 先行研究[2]では、光パラメトリック増幅 (OPA) による波長変換で波長 1300nm 帯超短パルスレーザーを生成している. OPA を用いた波長 1300nm 帯超短パルスレーザーは既に市販されているが、大型かつ調整が困難である. そこで本研究では、OPA による波長変換を必要としない、分散波による波長 1300nm 光源とプラセオジウム添加フッ化物ファイバ増幅器を用いたシステムで開発を行った.

2. 実験方法

システムの全体図を Fig.1 に示す. 中心波長 1560nm の Er 添加ファイバレーザーと高非線形ファイバ (HNLF) による分散波光源を種光源とし、チャープパルス増幅で高出力化を行う.

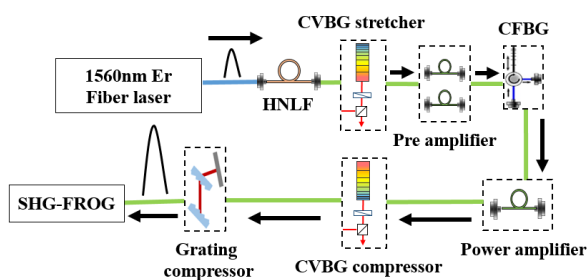


Fig 1. Diagram of the whole laser system

パルス伸長・圧縮には CVBG (Chirped Volume Bragg Grating), 増幅にはプラセオジウム添加フ

ァイバ増幅器(PDFA)を用いる. 本研究室では、過去に二段の増幅器による増幅を行い、平均出力 120[mW]を得た. 本研究では平均出力 1W を実現するため、三段目の増幅器を導入し、増幅および圧縮実験を行った.

3. 結果

三段目増幅のスロープ効率は 14.7[%], 最大平均出力は 1.33[W]となった. 波長 1300nm 帯のレーザーで 1W 以上の平均出力は、PDFA では CW レーザでもこれまでに達成されていない.

FROG トレースから再現したグラフを下図に示す. 9W 励起時で、パルス幅 367[fs], フーリエ限界パルス幅 301[fs]を得た.

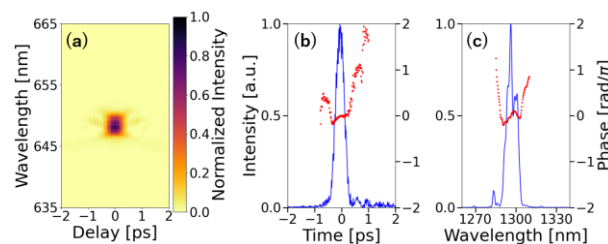


Fig 2. (a)SHG-FROG trace

(b)The time dependence of the power (blue line)

and the phase (red dots) .

(c)The power spectrum (blue line) and the spectral phase (red dots) .

参考文献

- [1] Denk W., Helmchen F. "Deep tissue two-photon microscopy." Nature Method, 2(12):932-940,(2005)
 [2] Wang, T., Xu, C. Optica,7(8):947-960

時間伸長分光を用いた Yb ファイバ Mamyshev 発振器における ノイズライクパルスの観測

Observation of Noise-Like Pulse in Yb fiber Mamyshev Oscillator using Time Stretch Spectroscopy

同志社大学 村田 昌聡, 戸田 裕之, ◯鈴木 将之

Doshisha Univ. Atsutoshi Murata, Hiroyuki Toda, and ◯Masayuki Suzuki

E-mail: masuzuki@mail.doshisha.ac.jp

Mamyshev 信号再生法を用いた Mamyshev 発振器は大口径 Yb 添加偏波保持ダブルクラッドファイバ(Yb-PM DCF)を用いて構築できるため、高い耐環境性を有しながら大出力な光パルス生成が可能である [1]. 特に自己相似パルス増幅に基づいた Gain Managed Nonlinear Amplification (GMNA)を Mamyshev 発振器に組み合わせることで、従来の Yb-PM DCF の利得を超えた広帯域増幅を実現することができる [2]. 我々のグループでは、GMNA を利用した Yb-PM DCF Mamyshev 発振器の開発を進めており、これまでに平均出力 1.0 W, パルス幅 31 fs, 繰り返し周波数~20 MHz, 出力パルスのピークパワーは 1.5 MW を得ることに成功している [3]. 一方で、ファイバレーザー共振器において、共振器内の条件を制御することで安定したパルス生成とは異なるノイズ状パルス生成 (NLP) が観測されることが報告されている[4]. そこで本研究では、時間伸長分光による連続したシングルショットスペクトル計測を用いて、Mamyshev 発振器において安定したモード同期パルス生成と NLP が観測される条件を確認したため、これについて報告を行う.

Fig. 1 に時間伸長分光を用いた連続したシングルショットスペクトルの二次元カラープロット図を示す. Fig. 1 (a)は安定したモード同期動作におけるショットごとのスペクトルであり、ショットごとのスペクトルは同じである. 一方、共振器内に設置した Yb-PM DCF を励起する LD または 1/2 波長板を制御して、共振器内にエネルギーが蓄えられる条件としたときに Fig. 1 (b)に示すようなショットごとに異なるスペクトル特性を有する NLP が観測された. これらが得られる詳細な条件については、講演の際に報告を行う.

参考文献

1. 鹿嶋凌駆, 桂山景伍, 谷村実紅, 戸田裕之, 鈴木将之, レーザー研究 52 (2), pp. 74-78 (2024).
2. P. Sidorenko, W. Fu, and F. Wise, Optica 6 (10), pp. 1328-1333 (2019).
3. K. Katsurayama, A. Murata, H. Toda, and M. Suzuki, Opt. Commun. to be submitted.
4. S. Kobtsev and A. Komarov, J. Opt. Soc. Am. B 41(5), pp. 1116-1127 (2024).

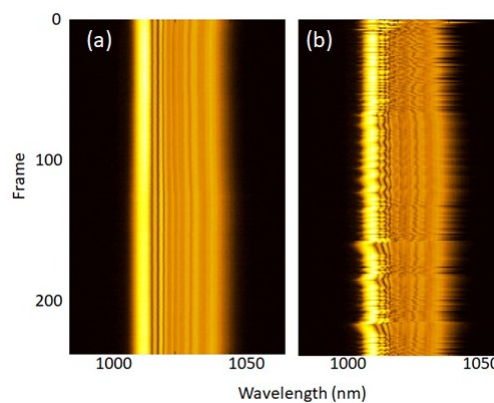


Fig. 1. Single-shot spectra of 232 consecutive pulses (a) stable and (b) NLP.