

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17526

研究課題名(和文) In-band励起を用いた高性能2 $\mu$ m帯短パルスTm添加固体レーザー光源の研究研究課題名(英文) In-band pumped mode locked Tm solid state laser at the wavelength range at the wavelength range of 2  $\mu$ m

研究代表者

戸倉川 正樹 (Tokurakawa, Masaki)

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・助教

研究者番号：80728246

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では非線形波長変換を用いない、Tm添加レーザー結晶による高効率な2 $\mu$ m帯超短パルス光の直接発生を目指し、従来と異なる波長~1610 nmの高出力ファイバー光源を利用したin-band励起によるTm添加希土類三酸化物(Re<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Re=Sc, Lu, Y)固体レーザーシステムの開発を行い、Tm添加固体レーザーでは世界で初めての報告となるカーレンズモード同期レーザーを実現した。最短パルス幅115 fs、最大出力1Wを達成した。これはこれまでの研究報告と比較すると、2 $\mu$ m帯超短パルス光源において世界で3番目に短いパルス幅かつ1桁以上大きな出力を達成した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a high power highly efficient Kerr-lens mode-locked Tm doped sesquioxides laser in-band pumped by 1610 nm high power fiber laser. To our knowledge, this is the first report of the Kerr-lens mode-locked solid state laser at the wavelength range of 2 $\mu$ m. The pulses as short as 115 fs and the average power as high as 1 W were achieved. Comparison with prior mode-locked 2  $\mu$ m solid state laser works, it has the third shortest pulse duration and an order higher average power.

研究分野：レーザー工学

キーワード：2 $\mu$ m帯超短パルスレーザー カーレンズモード同期

1. 研究開始当初の背景

(1) 波長 2 $\mu$ m 帯短パルス光源は、例えば (i)OPO などの非線形波長変換による 4~20 $\mu$ m 中赤外光発生、(ii)高次高調波発生による水の窓領域(2~4nm)のアト秒 X 線発生、(iii)超広帯域白色光(2~4 $\mu$ m)発生などの励起用光源として利用可能であり大きな注目を集めていた。しかし従来の Yb レーザーや Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーから得られる波長 1 $\mu$ m 以下の光を基本光とした非線形波長変換による発生方法では、得られる効率や出力はおおよそ 10%以下、10W 以下と制限が大きく、より高効率・高出力化が可能で 2 $\mu$ m 帯超短パルス光源の開発が望まれていた。

(2) Tm 添加固体レーザーは例えば連続発振のスラブレザーにおいてはレーザーダイオード(LD)による直接励起の下、出力 200W、効率 40%程度が達成されており、高出力・高効率なレーザー動作が可能であることが知られていた。しかし超短パルスレーザー動作時には、励起光源には Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーが用いられ、得られるパルス幅は 100s fs、全体の効率は数%、平均出力は 100 mW 程度と大きく制限されており実用的な光源としての性能には達しておらず、いっそうの高性能化が必要とされていた。

2. 研究の目的

(1) 本研究では従来と異なる波長~1600 nm のファイバーレーザーによる in-band 励起を利用した Tm 添加固体レーザーシステムの提案・開発を行い、波長 800 nm 励起時の問題点を抑制するとともに、新材料である Tm 添加希土類三二酸化物の優れた特性をあわせて利用し、従来の波長 2  $\mu$ m 帯 Tm 添加固体レーザーでは得られなかった超短パルス・高効率・高出力特性を有した、Tm 添加固体超短パルス発振器の開発を目指した。

(2) 本研究では Tm 添加超短パルス固体レーザーの性能を向上させ、800nm 帯 LD を用いたより高効率な直接励起型 Tm 増幅器開発のための種光源としての使用できる光源の開発を目指した。増幅器開発のため利得媒質として使用する Tm 添加希土類三二酸化物の特性を明らかにすることも目的とした。

3. 研究の方法

(1) In-band 励起用光源の開発  
In-band 励起用の光源として Er:Yb ファイバー増幅器の開発を行った。励起光源として最適な波長である 1611nm 光は発生が難しく、高出力な光源は既存の製品が存在していなかった。そのため狭線幅で単一偏光、高出力な励起用光源を開発した。開発に関して波長 1611nm は Er ファイバーの利得が小さく、かつ単一偏光・狭線幅が必要であることから、増幅自然放出光(ASE)と誘導ブリルアン散乱(SBS)を抑制する必要があった。そのため

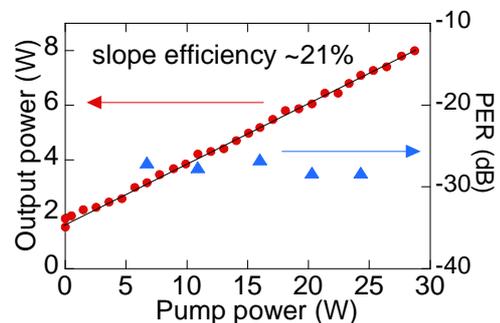
matlab によるシミュレーションコードを作成し、数値計算によって現実に利用できる光ファイバーや ASE フィルター、アイソレーターなどの光学素子を用いて可能となる、最適な共振器の条件を明らかにし、開発を行った。

(2) モード同期 Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーの開発  
開発した励起光源を用いた in-band 励起型のモード同期 Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーの開発を行った。利得媒質の Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は共同研究先ドイツハンブルグ大学より提供を受けた。多様短パルス発振のためキーデバイスである変調方法には、一般的に用いられる半導体可飽和吸収体鏡(SESAM)のかわりに 3 次の非線形効果であるカーレンズ効果を利用して一層の高出力化と短パルス化を目指した。カーレンズ効果の波長依存性を考慮したシミュレーションコードによって共振器設計を行い進めていく。

(3)モード同期 Tm ファイバーレーザーの開発  
固体レーザーとは別に in-band 励起の Tm ファイバーレーザーによる短パルス発振を行った。SESAM を用いた直線型の共振器構成のもと高繰り返しモード同期レーザー動作を目指した。

4. 研究成果

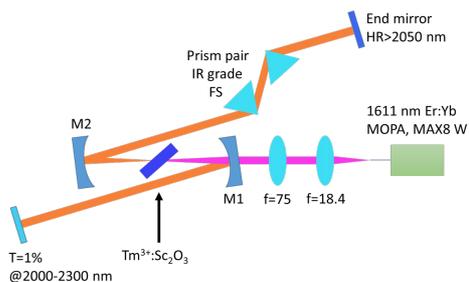
(1) In-band 励起用光源の開発  
計算結果を元に波長 1610 nm の分布帰還形の LD を種光源とし、ASE および SBS を抑制するために 3 種の素材・構造の異なる増幅光ファイバーを利用した全ファイバー型の 3 段階増幅器を構築し、狭線幅(~20 MHz)・単一偏光(>20 dB)・出力 8 W を達成した。これは該当波長における狭線幅光源としては現在までに報告されている最大出力である。種光源の温調によって波長を $\pm$ 1nm 程度は可変である。また開発したシミュレーションコードによる数値計算と解析学的な考察から長波長 Er:Yb ファイバーレーザーのスケーリング考察を行い、現在の構成でも 20 W 程度まではボトルネックとなる SBS による限界は発生しないことがわかった。得られた知識は該当波長以外の Er:Yb ファイバーレーザーの開発にも応用が可能である。



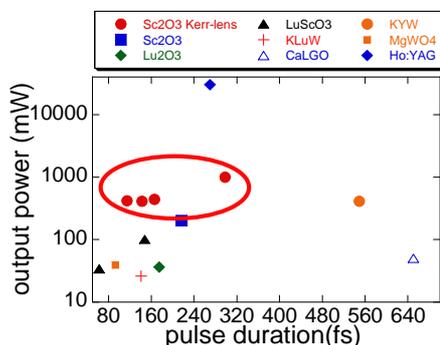
1610 nm 励起光源出力特性

(2) モード同期 Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーの開発  
In-band 励起型のカーレンズモード同期 Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーの開発に成功した。これはファイバーレーザーを用いた in-band Tm 固体レーザーという新しいシステムの実現であると同時に波長 2μm 帯固体レーザー光源における世界で初となるカーレンズモード同期レーザー発振の成功であった。パルス幅 115fs を達成し同結晶を用いた SESAM モード同期と比べ約 2 倍の短パルス化に成功した。このパルス幅は発表当時 Tm 固体レーザーにおいて世界で 3 番目に短い値であった。また出力は最大で 1W に達成しこれは Tm 固体モード同期レーザーの最大出力の報告である。全体効率も 10% 以上であり Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザー励起と比べてはるかに高い値を達成した。パルスエネルギーは約 4.5nJ でありピーク光強度は 40 kW にも達する。この光源は増幅器のための種光源としても有望である。また発振波長について述べると通常の Tm 固体レーザーと比べて 50~100nm 長波長側での動作に成功し、水蒸気による吸収の影響を受けない波長帯でのレーザー動作に成功した。

ファイバーレーザーによる in-band 励起のカーレンズモード同期発振によって短パルス性、高出力性、効率性に優れた、安定なモード同期動作を実現し、新しいハイブリッドなレーザーシステムとして 2μm 帯 Tm 固体モード同期レーザーの開発において非常に大きなインパクトを与えた。研究成果は海外 web 雑誌の Laser Focus World にも掲載されている。Tm 固体レーザーによる超短パルス発生の大きな可能性を示し、今後の LD 励起発振器や増幅器の開発、(例えば mJ パルスエネルギーのサブ 200fs、GW ピーク光強度増幅器)を行う上でも意味がある結果を得られた。

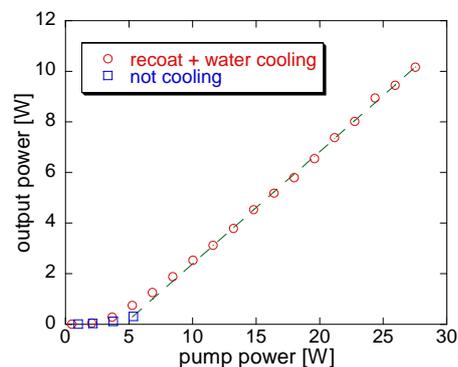


モード同期 Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザー実験図



モード同期 Tm 固体レーザー特性比較  
○で囲まれた丸印が今回の結果である

(3) モード同期 Tm ファイバーレーザーの開発  
当初は高繰り返しでのモード同期発振を目指したが、実験中にノイズライクパルス発振といわれる状態でのパルス発振に成功した。この状態ではソリトンモード同期とはことなりバンチ状に連なるパルスが発生し実効的なパルスエネルギーが 2 桁以上高いパルス発振動作が可能となる。またレンズの色収差を利用した新しい波長可変機構を考案しノイズライクパルス発振動作時での 50nm 近い波長可変動作に成功した。また増幅器を追加することにより、全ファイバー型でパルス幅 5.5ns の 10W 以上の平均出力動作に成功した。これらの結果は ns パルス幅の高エネルギーパルス動作を可能としレーザー加工応用を行う上で重要と考えられる。



ns パルスファイバー増幅出力特性

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1) M. Tokurakawa, E. Fujita, C.Kränkel, “Kerr-lens mode-locked Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystal laser in-band pumped by an Er:Yb fiber MOPA at 1611 nm,” Optics Letters, **42**, 3185-3188, (2017). 査読有

<https://doi.org/10.1364/OL.42.003185>

2) Y. Mashiko, E. Fujita, and M. Tokurakawa, “Tunable noise-like pulse generation in mode-locked Tm fiber laser with a SESAM,” Optics Express, **24**, 26515-26520, (2016). 査読有

<https://doi.org/10.1364/OE.24.026515>

3) E. Fujita, Y. Mashiko, S. Asaya, M. Musha, and M. Tokurakawa, “High power narrow-linewidth linearly-polarized 1610 nm Er:Yb all-fiber MOPA,” Optics Express, **24**, 26255-26260, (2016). 査読有

<https://doi.org/10.1364/OE.24.026255>

4) 戸倉川 正樹, 益子裕, 波長 2μm 帯 Tm 添加固体・ファイバーレーザー、日本工業出版(株)「光アライアンス」依頼論文 2016 年 10 号, 45-49 (2016). 査読有

[http://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product\\_id=3912](http://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product_id=3912)

〔学会発表〕(計 16 件)

- 1) M. Tokurakawa, Y. Mashiko, E. Fujita, A. Suzuki, and C. Kränkel, “Kerr-lens Mode-locked  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  laser at 2.1  $\mu\text{m}$  wavelength range,” ASSL2017, ATH3A.2 Nagoya, Japan, (2017).
- 2) E. Fujita, Y. Mashiko, M. Tokurakawa, “8 W Narrow-Linewidth Linearly-Polarized 1610 nm Er:Yb All Fiber MOPA,” CLEO/Europe-EQEC 2017, CJ-P.20 Munich Germany, (2017).
- 3) M. Tokurakawa, Y. Mashiko, E. Fujita, C. Kränkel, “Kerr-lens Mode-locked  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  Single Crystal Laser In-band Pumped by a 1611nm Er:Yb Fiber MOPA,” CLEO/Europe-EQEC 2017, CA-5.3, Munich Germany, (2017).
- 4) Y. Mashiko, and M. Tokurakawa, “All fiberized mode-locked Tm fiber oscillator above 100 nJ pulse energy and amplifier above 10 W average power with  $\sim 6 \mu\text{J}$  pulse energy,”ALPS’17 ALPS14-22, Yokohama Japan April (2017).
- 5) H. Sagara, E. Fujita, Y. Mashiko, and M. Tokurakawa, “High power nonlinear polarization rotation soliton mode-locked Tm fiber laser with huge sideband spectral structure,”ALPS’17 ALPS14p-20, Yokohama Japan, April (2017).
- 6) M. Tokurakawa, Y. Mashiko, Fujita, and C. Kränkel, “Sub 200 fs Kerr-lens Mode-locked  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  Laser In-band Pumped by a 1611nm Er:Yb Fiber MOPA,” ALPS’17 ALPS4-8 Yokohama Japan, April (2017).
- 7) Y. Mashiko, E. Fujita, M. Tokurakawa, “Tunable SESAM mode-locked Tm fiber laser at the wavelength range of two micron,” CLEO2016, STu3P.5. SanJose USA, (2016).
- 8) E. Fujita, Y. Mashiko, and M. Tokurakawa, “High power narrow-linewidth linearly-polarized 1610 nm Er:Yb all-fiber MOPA,” ALPS’16, ALPSp14-24, Yokohama Japan, (2016).
- 9) Y. Mashiko, E. Fujita, M. Tokurakawa, “Tunable SESAM mode-locked Tm fiber laser at the wavelength range of two micron,” ALPS’16, ALPS4-6, Yokohama Japan, (2016).
- 10) 戸倉川 正樹, 「高効率・高出力波長 2 $\mu\text{m}$  帯超短パルス光源の研究」光拠点シンポジウム、京都大学吉田キャンパス 1 月 23 日 2018 年 依頼講演
- 11) 戸倉川 正樹, 「波長 2 $\mu\text{m}$  帯 Tm 添加固体・ファイバーレーザーの開発 In band 励起を用いたカーレンズモード同期  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  レーザーの開発 電子・情報・システム部門 光・量子デバイス技術委員会/研究会奨励賞 記念講演会 依頼講演 2017 年 9 月 東京
- 12) 戸倉川 正樹, 藤田 慧祐, 益子 裕, クラウケル クリスティアン 「サブ 200 fs カーレンズモード同期  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  レーザー」第 64 回応用物理学会春季学術講演会、東京 2017 年 3 月
- 13) 相楽 啓, 藤田 慧祐, 戸倉川 正樹 「非線形偏波回転を用いた Tm ファイバーモード

同期レーザーの開発」第 64 回応用物理学会春季学術講演会、東京 2017 年 3 月

14) 益子裕, 藤田慧祐, 戸倉川 正樹 「全ファイバー型 2  $\mu\text{m}$  帯 Tm ファイバーノイズライクパルス発振器 及び増幅器の開発」第 64 回応用物理学会春季学術講演会 東京 2017 年 3 月

15) 益子 裕, 藤田 慧祐, 戸倉川 正樹 「Tm ファイバーを用いた波長 2 $\mu\text{m}$  帯パルスレーザーの増幅器の開発」第 37 回レーザー学会年次大会、徳島 2017 年 1 月

16) 藤田 慧祐, 益子 裕, 戸倉川 正樹 「波長 1610 nm・狭線幅・単一偏光・Er:Yb 全ファイバー-MOPA の開発」第 37 回レーザー学会年次大会、徳島 2017 年 1 月

〔その他〕

ホームページ等

1. Web 雑誌 Laser Focus world に掲載”Fiber-laser in-band pumping enables novel 2  $\mu\text{m}$  high-power short-pulse laser”

<https://www.laserfocusworld.com/articles/2018/01/fiber-laser-in-band-pumping-enables-novel-2-m-high-power-short-pulse-laser.html>

2. UEC e-Bulletin

<http://www.ru.uec.ac.jp/e-bulletin/research-highlights/2017/kerr-lens-mode-locked-tm-doped-sesquioxides-laser-in-band-pumped-by-an-er.html>

3. レーザー学会 業績賞・奨励賞 受賞

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

戸倉川 正樹 (Tokurakawa Masaki)

電気通信大学・

レーザー新世代研究センター・助教

研究者番号：80728246