

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月21日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760038

研究課題名（和文） 中赤外高出力フッ化物ガラスファイバーレーザーの短パルス高強度化技術の確立

研究課題名（英文） Establishment of technologies to short-pulsed and high-intensified for mid-infrared high-power fluoride fiber lasers

研究代表者

時田 茂樹（TOKITA SHIGEKI）

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：20456825

研究成果の概要（和文）：エルビウムを添加したフッ化物ガラス光ファイバーを用いた波長 2.8  $\mu\text{m}$  帯ファイバーレーザーの高平均出力化および高ピーク出力化に関する実験研究を実施した。平均出力が 10 W を超える波長可変ファイバーレーザーおよび Q スイッチパルスファイバーレーザーを開発し、赤外域レーザー技術を進展させた。

研究成果の概要（英文）：

Experimental studies to increase average-power and peak-power of 2.8- $\mu\text{m}$ -band fiber lasers with erbium doped fluoride glass fibers have been performed. A wavelength-tunable fiber laser and a Q-switched pulsed fiber laser, with average-powers more than 10 W, have been developed. As a result, the infrared laser technology has been advanced.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：レーザー

## 1. 研究開始当初の背景

ファイバーレーザーは信頼性、効率、平均出力、小型性、メンテナンス性など多くの点で従来のバルク固体レーザーを凌駕しており、今後、高出力レーザーの主流になると考えられている。近年、近赤外域 1~2  $\mu\text{m}$  の超短パルスファイバーレーザーの研究開発が国内外で盛んに行われており、これらは一部実用化の段階に入っている。ファイバーレーザー技術は、光通信技術開発により高度化した石英ファイバー技術を基盤として発展してきた。

しかし、現在のファイバーレーザー技術は 2  $\mu\text{m}$  より長い波長域を透過できない石英等の光学材料に特化した技術であるため、中赤外レーザーへは応用できない。すなわち、高出力ファイバーレーザーの波長域を中赤外領域へ広げるには全く新しい要素技術開発が必要である。

## 2. 研究の目的

中赤外域の短パルス・高平均出力・高効率・全固体レーザーの具体化に着手するべく、中赤外 2.8  $\mu\text{m}$  帯でレーザー利得が得られる

Er ドープフッ化物ガラスファイバーの高平均出力発振および高ピーク出力パルス発振に関する要素技術を確立することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

中赤外域の高平均出力超短パルスレーザーを実現するため、Er ドープ ZBLAN 系フッ化物ガラスファイバーに着目した。ZBLAN ガラスはおよそ 4  $\mu\text{m}$  までの透過波長域を有し、Er を添加することでおよそ 2.8  $\mu\text{m}$  を中心とする幅広い帯域でレーザー利得が得られる。また、波長 975 nm の高出力半導体レーザーにより直接励起できるため、レーザーシステム全体として高平均出力・高効率・小型を達成可能である。本研究では、中赤外 Er 添加 ZBLAN ファイバーレーザーを用いた高平均出力ファイバー発振器を開発し、波長可変発振および Q スイッチパルス発振の実証実験を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 高出力広帯域波長可変ファイバーレーザー発振器の開発

超短光パルス発生にはより広い波長帯域で高い光利得が得られることが望ましいが、他の研究グループがこれまでに得た帯域幅は 2800 nm 帯において 130 nm 程度であり、光出力も 2 W 程度に過ぎなかった。本研究で開発した独自の光ファイバー放熱方法により光ファイバーの温度を低く抑えた結果、世界最高値である 170 nm の帯域幅と 11 W の光出力を達成した。

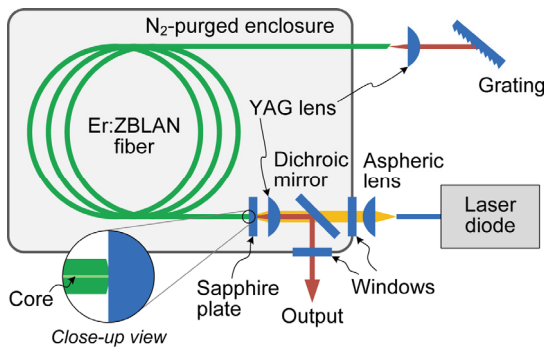


図1 波長可変ファイバーレーザー

装置の概略図を図1に示す。波長 975 nm の高出力半導体レーザーを用いて長さ 3.8 m の Er 添加 ZBLAN ファイバーを励起し、回折格子を用いて発振波長を変化させた。波長同調特性を図2に示す。励起入力が増加とともに発振波長域は長波長側へシフトした。注目すべきは、励起入力 93 W 以上の場合に 2.88  $\mu\text{m}$  の長波長の発振が得られたことである。この結果はこれまでに他のグループで得

られた最大波長 2.82  $\mu\text{m}$  よりも大幅に広く、全体の波長同調域は 170 nm まで拡大した。また、本装置では金属ヒートシンクによる伝導冷却でファイバーの温度上昇を抑制し、我々が以前開発した液体冷却 [Opt. Lett. **34**, 3062 (2009)] と比べ簡便な装置で、11 W の高い出力と 0.13% rms の高い出力安定性 (図3) を得ることに成功した。

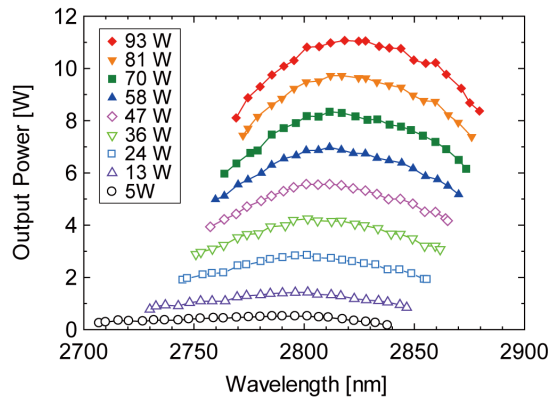


図2 波長同調特性

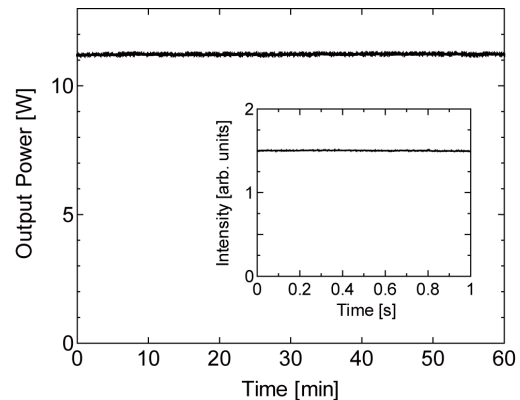


図3 1時間の光出力変動

#### (2) 高ピーク出力パルスファイバーレーザー発振器の開発

共振器のQ値を高速に変化させることによりジャイアントパルスを発生させ高いピーク出力を得る技術は一般的であるが、2800 nm 帯の中赤外ファイバーレーザーでは実証例が少ない。音響光学変調器 (AOM) を用いたパルス発振ファイバーレーザー発振器を開発し、世界最高となる 12 W 以上の平均出力と約 0.9 kW ピーク出力を得た。パルス幅は最短で 90 ns、パルスエネルギーは約 100  $\mu\text{J}$  である。

装置の概略図を図4に示す。波長 975 nm の高出力半導体レーザーを用いて長さ 2.1 m の Er: 添加 ZBLAN ファイバーを励起し、レーザー共振器内に AOM を挿入して Q スイッチ発振させた。AOM の変調周波数が 120 kHz

のときの出力光パルス波形を図5に示す。パルス幅はパルス毎におよそ80~100 nsの間で変動し、平均的なパルス幅は約90 nsであった。このときの平均出力は12.4 Wであったため、1パルス当たりのエネルギーは103  $\mu\text{J}$ と算出される。また、パルス波形からピーク出力は約0.9 kWと算出される。分光器による測定の結果、中心波長は約2800 nmであった。AOMの変調周波数を変化させると、平均出力はほぼ変化せず、発振の繰り返し周波数が変化した。繰り返し周波数120 kHz~300 kHzにおける平均出力、パルスエネルギー、パルス幅を図6に示す。120 kHz以下ではQスイッチング前に発振が生じることによるダブルパルス発振が生じ、300 kHz以上では発振Qスイッチング後に発振が生じるまでの時間が繰り返し周期を超え、発振が生じない周期が現れる現象が生じた。本実験において、最大ピーク出力は励起レーザーの限界出力およびAOMの変調深さにより制限された。したがって、今後さらなる高出力化が期待できる。

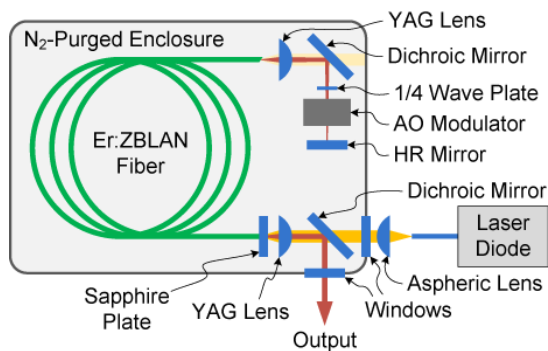


図4 Qスイッチパルスファイバーレーザー

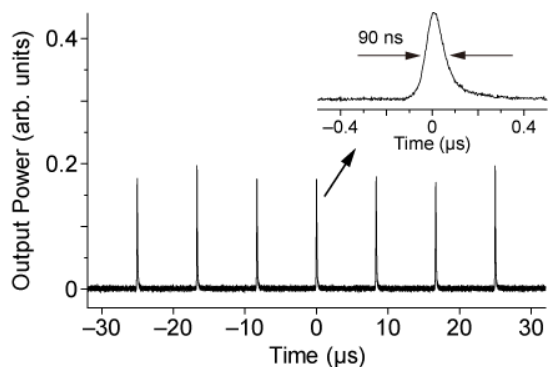


図5 光パルス波形

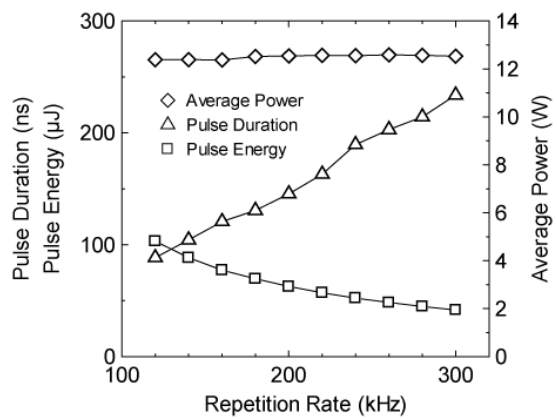


図6 繰り返し周波数依存性

## 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6件)

- ① S. Tokita, M. Murakami, S. Shimizu, M. Hashida, and S. Sakabe, "12 W Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8  $\mu\text{m}$ ," *Opt. Lett.* **36**, 2812 (2011). 査読有  
DOI: 10.1364/OL.36.002812
- ② S. Tokita, K. Otani, T. Nishoji, S. Inoue, M. Hashida, and S. Sakabe, "Collimated fast electron emission from long wires irradiated by intense femtosecond laser pulses," *Phys. Rev. Lett.* **106**, 255001 (2011). 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.255001
- ③ S. Inoue, S. Tokita, K. Otani, M. Hashida, and S. Sakabe, "Femtosecond electron deflectometry for measuring transient fields generated by laser-accelerated fast electrons," *Appl. Phys. Lett.* **99**, 031501 (2011). 査読有  
DOI: 10.1063/1.3612915
- ④ S. Tokita, M. Hirokane, M. Murakami, S. Shimizu, M. Hashida, and S. Sakabe, "Stable 10 W Er:ZBLAN fiber laser operating at 2.71–2.88  $\mu\text{m}$ ," *Opt. Lett.* **35**, 3943–3945 (2010). 査読有  
DOI: 10.1364/OL.35.003943
- ⑤ S. Tokita, M. Hashida, S. Inoue, Toshihiko Nishoji, K. Otani, and S. Sakabe, "Single-shot femtosecond electron diffraction with laser-accelerated electrons: Experimental demonstration of electron pulse compression," *Phys. Rev. Lett.* **105**, 215004 (2010). 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.215004
- ⑥ S. Inoue, S. Tokita, T. Nishoji, S. Masuno, K. Otani, M. Hashida, and S. Sakabe, "Single-shot microscopic electron imaging of intense femtosecond laser-produced

plasmas,” Rev. Sci. Instrum. **81**, 123302  
(2010). 査読有  
DOI: 10.1063/1.3514084

〔学会発表〕(計4件)

- ① 時田茂樹, 村上政直, 清水政二, 橋田昌樹, 阪部周二, “高平均出力中赤外 Q スイッチ Er:ZBLAN ファイバーレーザー”, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会, 2012 年 1 月 30 日, TKP 仙台カンファレンスセンター
- ② 時田茂樹, 村上政直, 清水政二, 橋田昌樹, 阪部周二, “平均 12W 中赤外 Q スイッチ Er:ZBLAN ファイバーレーザー”, 第 72 回応用物理学会学術講演会, 2011 年 8 月 30 日, 山形大学
- ③ 時田茂樹, 村上政直, 清水政二, 橋田昌樹, 阪部周二, “広帯域波長可変 10W 級中赤外 Er:ZBLAN ファイバーレーザー”, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011 年 3 月 27 日(東日本大震災により中止), 神奈川工科大学
- ④ 村上政直, 時田茂樹, 清水政二, 橋田昌樹, 阪部周二, “20W 級高出力中赤外 Er:ZBLAN ファイバーレーザー”, 第 71 回応用物理学会学術講演会, 2010 年 9 月 14 日, 長崎大学

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

時田 茂樹 (TOKITA SHIGEKI)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号: 20456825

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし