

平成22年 5月28日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760032  
 研究課題名 (和文) 中赤外OH吸収帯波長高出力超短パルスファイバーレーザーの開発  
 研究課題名 (英文) Development of a high-power ultra-shot pulse fiber laser with the OH-group absorption band wavelength in the mid-infrared  
 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 2.7  $\mu\text{m}$  帯の高出力な超短パルスファイバーレーザーの要素技術を開発した。ピコ秒パルスの発生に必要な超短パルスレーザー発振器とそのパルスを増幅するために必要な高出力レーザー増幅器の基礎技術を実証し、赤外域レーザー技術を進展させた。

研究成果の概要 (英文)：Component technologies of 2.7- $\mu\text{m}$ -band high-power ultra-short pulse fiber lasers with erbium doped fluoride glass fibers have been developed. An ultra-short pulse laser oscillator and basic technologies of high-power laser amplifiers have been demonstrated. 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
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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

超短パルスレーザーは近年、広範な分野における様々な応用研究によりその高い有用性が認められ、現在では産業、医療の現場で実用に供されるようになった。しかし、医療や環境計測などの分野で特に求められる中赤外波長域の実用的な超短パルス光源技術はいまだ未開拓であり基礎技術の確立を要する。

## 2. 研究の目的

本研究では世界に先駆け、中赤外域の超短パルス・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 2.7  $\mu\text{m}$  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に着目し、同波長帯の超短パルス光発生と増幅に関する要素技術を確立する事を目的とする。

### 3. 研究の方法

中赤外域の高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 系フッ化物ガラスはおよそ  $4\mu\text{m}$  までの透過波長域を有し、Er を添加することで  $2.7\sim 2.82\mu\text{m}$  の幅広い帯域でレーザー利得が得られる。この利得帯域幅は  $100\text{fs}$  以下のフーリエ変換限界パルスの帯域幅に相当するため、極めて短い光パルスの発生・増幅が可能であると考えられる。また、高出力化・高効率化の進んでいる波長  $975\text{nm}$  の半導体レーザーにより励起が可能であるため、レーザーシステム全体として高出力・高効率・小型を達成可能である。しかしながら、水気に弱い、ガラス転移点が  $265^\circ\text{C}$  と低い、機械的強度が低いといった特性に対する懸念から、現状では石英ファイバーほどの発展を見せておらず、超短パルスの発生・増幅技術は全く確立していない。本研究では、超短パルスの発生および増幅に関する技術実証を段階的に行った。

### 4. 研究成果

(1) フッ化物ガラスファイバーの分散制御  
ファイバーレーザー発振器のモード同期と超短パルス発生を実現する際に要となる、ファイバー導波路内の群遅延分散補償技術を確立するため、ファイバーの設計・試作を行った。フッ化物ガラスは石英と比べて屈折率分散が小さいという特徴を持つため、ファイバーのコア径およびコア/クラッドの屈折率比により変化する導波路分散により材料分散を打ち消すことで、幅広い波長域においてゼロ分散を実現し得ることが計算により示唆される。理論計算に基づき  $2.7\mu\text{m}$  付近の群遅延分散  $10\text{ps}/\text{km}/\text{nm}$  以下となるよう、導波路の設計を行った。図 1 に設計・試作した Er:ZBLAN ファイバーの群遅延分散の計算値を示す。コア径は  $6.9\mu\text{m}$ 、コア NA は  $0.20$ 、Er 濃度は  $4\text{mol}\%$  である。波長  $2\sim 2.8\mu\text{m}$  の広い範囲において  $10\text{ps}/\text{km}/\text{nm}$  以下の低分散特性が得られる。

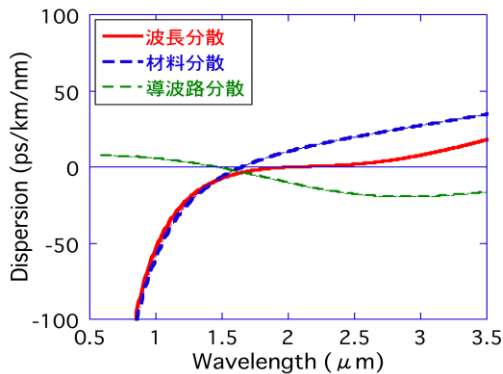


図 1 Er:ZBLAN ファイバの分散特性

### (2) 広帯域波長可変レーザーの開発

$2.7\mu\text{m}$  帯の波長可変レーザーは環境計測等に有用である。また、ファイバーの波長同調特性は超短パルス発生・増幅を調べるうえで重要な基礎特性である。図 2 に示すような装置を開発した。波長  $975\text{nm}$  の半導体レーザーを用いて長さ  $6\text{m}$  の Er: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 3 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  $4\text{W}$  以上の場合に  $2.86\mu\text{m}$  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  $150\text{nm}$  まで拡大した。これは Er:ZBLAN ファイバーレーザーの新しいポテンシャルを示す成果である。

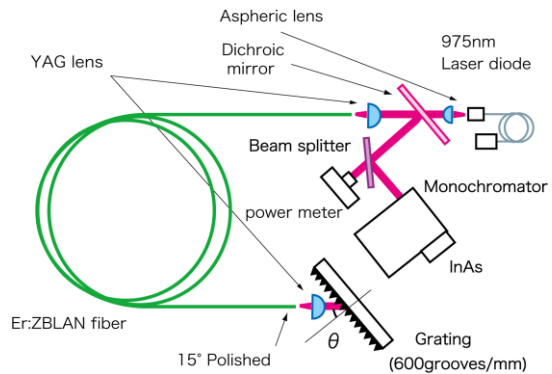


図 2 波長可変ファイバーレーザー

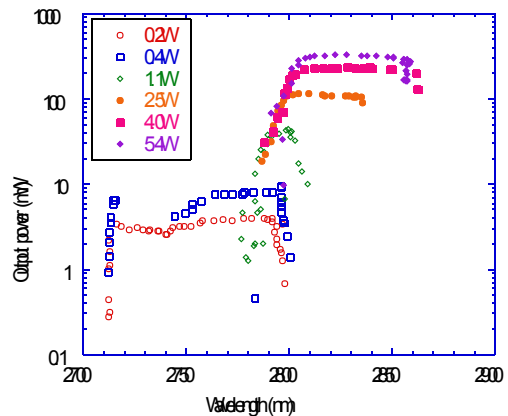


図 3 波長同調特性

### (3) モード同期レーザー発振器の開発

図 4 に示すようなリング型モード同期 Er:ZBLAN ファイバーレーザーを開発した。非線形偏波回転法による自己モード同期方式を採用した。単一方向のみ発振するリング共振器を構成するため、YIG 結晶を用いた  $2.7\mu\text{m}$  帯ファラデー回転子および極薄石英板を用いた波長板を新たに開発した。ファイバ長と励起パワーを最適化することにより、モード同期発振によるパルス列の観測に成功

した。図5にパルス列の波形を示す。繰り返し周波数は6.7MHzであった。2 $\mu\text{m}$ 帯よりも長波長の連続発振モード同期ファイバーレーザーの報告はなく、本実験により2.7 $\mu\text{m}$ 帯のモード同期発振に初めて成功した。しかしながら、モード同期は不安定であり、実用化には改良が必要である。

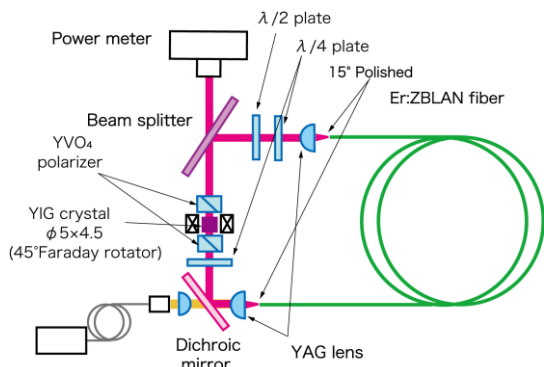


図4 モード同期リングファイバーレーザー

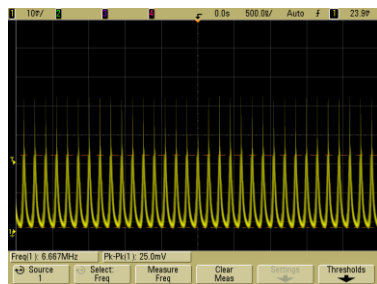


図5 モード同期パルス列波形

#### (4) 高出力化技術の開発

前述のモード同期レーザーの平均パワーは10mW程度であり、パルス当たりの熱量は1nJ程度と小さいため応用範囲が狭い。広く利用できる光源とするには増幅が不可欠である。低出力の超短パルスを、ファイバーレーザー増幅器により高平均出力・高ピーク出力パルスへと増幅するための基礎技術を確認するため、ZBLAN系フッ化物ガラスファイバーの高出力連続レーザー発振における熱的特性を実験的に調べ、熱的限界を向上させる技術の開発を行った。その結果、世界最高出力の連続波2.8 $\mu\text{m}$ 帯ファイバーレーザーの開発に成功し、これまで飛躍的な高出力化が困難と考えられてきたフッ化物ガラスファイバーレーザーが高平均出力レーザーとして高い能力を持つことを実証した。開発した高出力連続波ファイバーレーザーの構成を図6に示す。フッ素系液体による光ファイバーの直接冷却により温度上昇が抑えられ、許容される励起パワーを大幅に増大させることに成功した。レーザー入出力特性を図7に示す。最大出力24W、光-光変換効率14.5%を達成した。

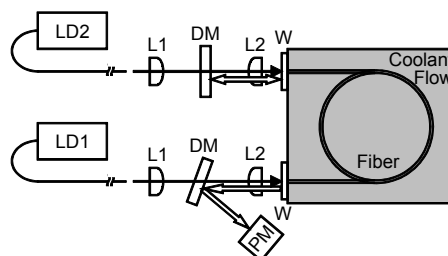


図6 高出力連続波ファイバーレーザー

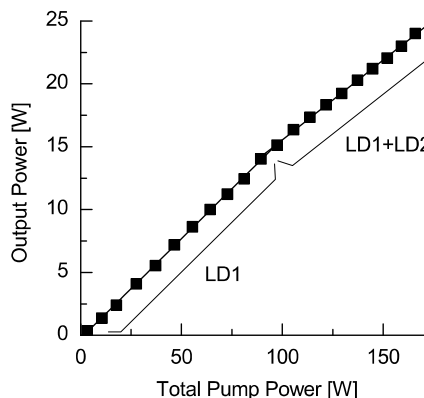


図7 入出力特性

#### 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2件)

- ① S. Tokita, M. Murakami, S. Shimizu, M. Hashida, S. Sakabe, Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser, *Optics Letters*, 査読有, Vol. 34, 2009, 3062-3064
- ② S. Tokita, S. Inoue, S. Masuno, M. Hashida, S. Sakabe, Single-shot ultrafast electron diffraction with a laser-accelerated sub-MeV electron pulse, *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol. 95, 2009, 111911, 1-3

[学会発表] (計4件)

- ① 廣兼麻友, 時田茂樹, 村上政直, 清水政二, 橋田昌樹, 阪部周二, Er:ZBLANガラスを用いた高出力2.8 $\mu\text{m}$ 波長可変ファイバーレーザー, 第57回応用物理学関係連合講演会, 2010年3月18日, 東海大学
- ② 廣兼麻友, 時田茂樹, 村上政直, 清水政二, 橋田昌樹, 阪部周二, 3W波長可変中赤外ファイバーレーザー, レーザー学会学術講演会第30回年次大会, 2010年2月4日, 千里ライフサイエンスセンター
- ③ 廣兼麻友, 時田茂樹, 橋田昌樹, 阪部周二, Er:ZBLANガラスを用いた2.8 $\mu\text{m}$ 短パルスファイバーレーザーの開発, 第56回応用物理学関係連合講演会, 2009年4

- 月 1 日、筑波大学
- ④ 廣兼麻友、時田茂樹、橋田昌樹、阪部周二、Er ドープ ZBLAN ガラスを用いた 2.7  $\mu\text{m}$  超短パルスファイバーレーザーの開発、レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会、2009 年 1 月 12 日、徳島大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

① 名称：光ファイバ冷却装置  
発明者：村上政直、時田茂樹、橋田昌樹、阪部周二  
権利者：同上  
種類：特許  
番号：特願 2009-22522  
出願年月日：2009 年 2 月 3 日  
国内外の別：国内

② 名称：光ファイバ冷却装置  
発明者：村上政直、時田茂樹、橋田昌樹、阪部周二  
権利者：同上  
種類：特許  
番号：特願 2008-331719  
出願年月日：2008 年 12 月 26 日  
国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔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