

新加工用光源としての中赤外高出力ファイバレーザの開発

大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター
講師 時田 茂樹
(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013214)

キーワード：ファイバレーザ、中赤外レーザ、レーザ精密加工

1. 研究の目的と背景

固体レーザ技術の進展により、小型・高効率かつ信頼性の高い高出力レーザ光源が産業・医療・科学などの分野で実用に供されるようになった。レーザ光源への要求は益々高度化・多様化しており、高出力化、短パルス化、高効率化、新波長帯開発など、様々な研究開発が行われている。本研究では中赤外域における新波長帯開発に注目した。

近年の携帯電話、太陽電池、MEMS 等の製造に不可欠となっているレーザ微細加工に適したパルスレーザを例にとると、加工応用に必要なおよそ 0.1 mJ 以上のパルスエネルギーを実用的な装置規模で得られるパルスレーザとしては、0.8 μm 帯の Ti レーザ、1 μm 帯の Yb レーザ、1.5 μm 帯の Er レーザ、2 μm 帯の Ho 及び Tm レーザが挙げられ、これらの波長の 2~4 倍高調波もしばしば用いられる。したがって 0.2~2 μm の波長域では、多用途へ応用可能な実用光源が揃っている (図 1)。

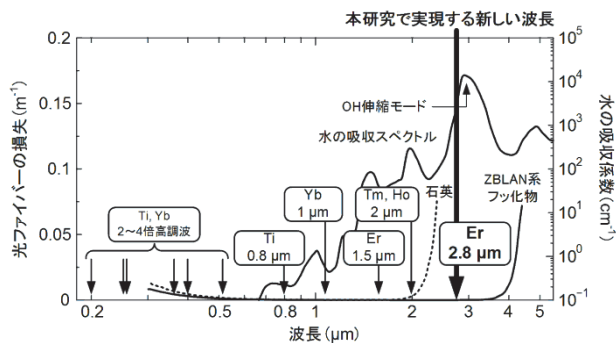


図 1 超短パルスレーザの波長と光ファイバ損失特性

一方、およそ 2 μm を超える長波長域においては、大型の自由電子レーザ、又は、効率が低く高出力化が困難な波長変換レーザが在るのみで、実用的な光源が存在しない。長波長レーザの実用化が難しい背景として、適切な固体レーザ媒質がないこと、石英等の一般的な光学ガラスの赤外吸収端を超える波長であること (図 1) が挙げられる。しかし、中赤外コヒーレント光に対する要求は医療・産業の分野で特に大きく、その高い有用性が広く認識されている。例えば、3 μm 付近の OH 基への高い吸収性を利用した潜在的応用が多数存在する。中赤外域の実用光源の不在は、そのような応用技術の発展の障壁となっている。

本研究では、中赤外域の短パルス・高平均出力・高効率・全固体レーザの実用化を目指し、中赤外 2.8 μm 帯でレー

ザ利得が得られる Er 添加フッ化物ガラスファイバに着目し、同波長帯のパルス発振ファイバレーザに関する基礎研究を行った。本報告書では、開発した狭スペクトル幅ファイバレーザ、Q スイッチパルスファイバレーザ、モード同期ファイバレーザについて報告する。

2. Er 添加フッ化物ファイバレーザの特徴

フッ化物ガラスファイバはフォノンエネルギーが小さく、およそ 4 μm までの透過帯域を持つため、中赤外レーザや可視から近赤外域の高発光効率レーザの増幅媒質として有用である。およそ 2 μm 以上の波長で実用的な透過率を持たない一般的な石英ガラスファイバと比べ、フッ化物ファイバは著しく広い透過帯域を持つ。一方でフッ化物ガラスは、潮解性、低融点、低機械強度といった特性を持ち、光学特性以外の面で石英ファイバ等の酸化ガラスファイバに大きく劣る。これらの欠点を被覆や放熱の技術により補う必要がある。

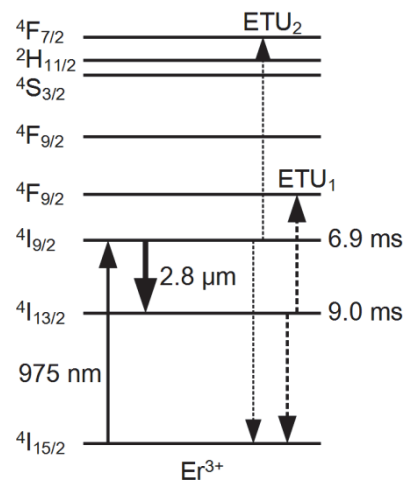


図 2 Er:ZBLAN ガラスのエネルギー準位図

フッ化物ガラスには ZrF_4 系、 AlF_3 系、 InF_3 系などいくつかの種類があるが、一般的にはこれらのフッ化物を主成分とし、副成分としてアルカリ土類金属のフッ化物を添加して合成される。それらの中で光ファイバとして標準的なものは、ZBLAN ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) と呼ばれる ZrF_4 系のガラス材料である。石英ガラスの最大フォノンエネルギーがおよそ 1000 cm^{-1} であるのに対し、ZBLAN ガラスではおよそ 500 cm^{-1} と 1/2 になる。このため、Er などの希土類を添加した際、石英では多フォノン緩和により非

輻射損失となる多くの遷移が、ZBLANでは発光（又は誘導放出）を示すようになる。

ZBLANガラスに添加されたEr³⁺イオンの遷移図を図2に示す。⁴I_{9/2}の蛍光寿命は6.9 msと長い為、975 nmの励起光により⁴I_{9/2}→⁴I_{13/2}間に容易に反転分布を得ることができ、2.8 μmのレーザ発振が得られる。励起波長が975 nmであるため、高出力Ybファイバレーザ励起用として高性能・低価格化が進んでいる半導体レーザをそのまま用いることができる。しかし、⁴I_{13/2}は上準位(⁴I_{9/2})より長い9.0 msの蛍光寿命を有するため、⁴I_{9/2}←⁴I_{13/2}間の励起状態吸収が生じ、レーザ効率を低下させる要因となる。これを回避するため、Erを高濃度添加することによりEr-Er間のエネルギー移動アップコンバージョン (ETU) を促進し、⁴I_{13/2}の占有率を下げる方法が用いられる。ErF₃の添加量をおよそ2~10 mol%とすることにより、最も高い効率を得られることが示されている[1]。図3に⁴I_{9/2}→⁴I_{13/2}の蛍光スペクトルおよび⁴I_{9/2}←⁴I_{13/2}の吸収スペクトルを示す。蛍光・吸収スペクトルともにおよそ2600 nmから2950 nmにわたって広がっており、波長可変レーザや超短パルスレーザに適した特性を有している。放出断面積は最大で約5×10⁻²¹ cm²とYb添加石英ファイバと同等の値であるが、上寿命が長い為高い利得が得られる。

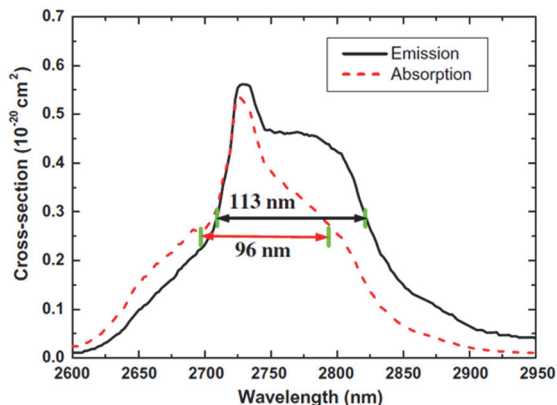


図3 Er:ZBLANガラスの蛍光・吸収スペクトル (参考文献[2]より引用)

3. 単一縦モード中赤外ファイバレーザの開発

ファイバレーザでは、ファイバ導波路によるモード選択性により比較的容易に横単一モード発振を得ることができる。しかし、一般に高出力を得るためには長いファイバ（共振器）が必要となるため、縦モード選択は難しくなる。そのため、縦横単一モードの高出力光を得るには、低出力の単一モード種光源をファイバ増幅器により増幅するMOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 方式レーザが適している。縦横単一モードファイバMOPAとして、DBR (Distributed Bragg Reflector) 構造の短いファイバ発振器とファイバ増幅器からなる構成 (図4) を想定している。周波数狭帯域化のためのDBR構造はFBGをファイバ中に

書き込むことにより実現する。

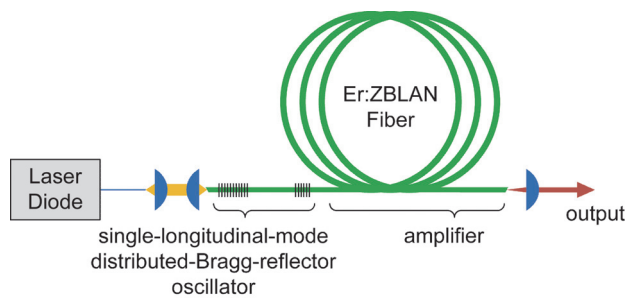


図4 縦単一モードファイバMOPAレーザの構想図

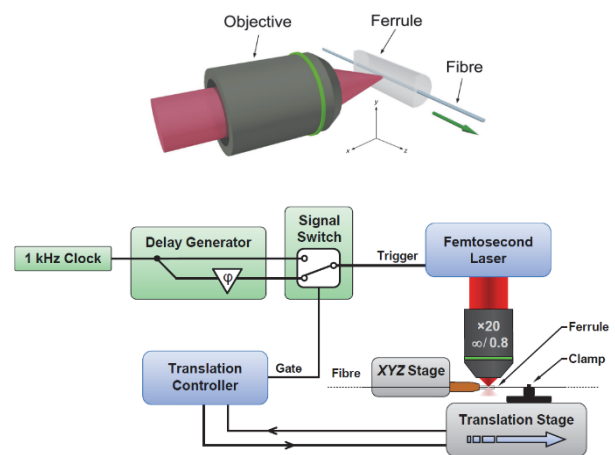


図5 FBG加工装置 (参考文献[3]より引用)

すなわち、高出力フェムト秒レーザをガラス中に集光すると集光点付近に永久的な屈折率変化を生じることが知られており、この原理を応用してフッ化物ガラスファイバ中にFBGを書き込むことができる (図5)。Yb:KGWフェムト秒レーザと±50 nmの繰り返し位置決め精度を有する高精度ステージを用いた独自のレーザ微細加工装置により、ファイバコアに周期約1.9 μmのFBGを書き込むことに成功した。このファイバを用いたErドープファイバレーザ発振器を構築し、波長975 nmの半導体レーザで励起したところ、波長約2800 nmで発振が得られた。レーザ出力のスペクトル線幅は0.3 nm以下と狭く、FBGの高い波長選択性が確認できた。今後、DBR構造レーザを構成することにより、単一縦モード発振が可能になる見込みである。

4. グラフェンを用いた受動Qスイッチ中赤外ファイバレーザの開発

Er添加フッ化物ファイバレーザは中赤外波長帯の高平均出力パルス光源として有望である。グラフェンは、ディラックコーンと呼ばれる特異なエネルギーバンド構造を有するため (図6)、波長依存性のない平坦な吸収スペクトルを示す。そのため、広い波長域において可飽和吸収性を有することが知られている[4]。本研究ではグラフェンをEr:ZBLANファイバレーザの共振器内へ挿入し、グラフ

エンによる波長 $2.8 \mu\text{m}$ における受動 Q スイッチ発振の動作実証を行った。

装置の概略図を図 7 に示す。Er ドープ濃度 6 mol%，コア径 $19 \mu\text{m}$ ，第一クラッド径 $180 \mu\text{m}$ (D シェイプ) のシングルモード ZBLAN ファイバを増幅媒質として用い、ファイバ結合型 LD (975 nm) を用いて片端面からクラッド励起される。多層グラフェン膜を表面に転写した誘電体多層膜ミラーをファブリペロー共振器の片端に配置し Q スイッチ発振を行った。平均出力 380 mW における出力パルス波形を図 8 に示す。このとき、繰り返し周波数は 59 kHz，パルス幅は約 400 ns であった。パルス当りのエネルギーは $6.4 \mu\text{J}$ ，ピークパワーはおおよそ 16 W と算出される。

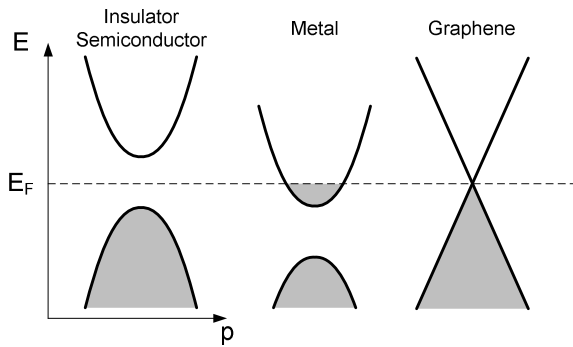


図 6 グラフェンのエネルギーバンド構造

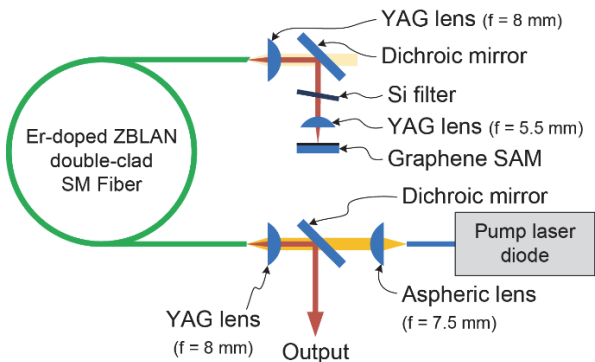


図 7 グラフェン Q スイッチ中赤外ファイバレーザ

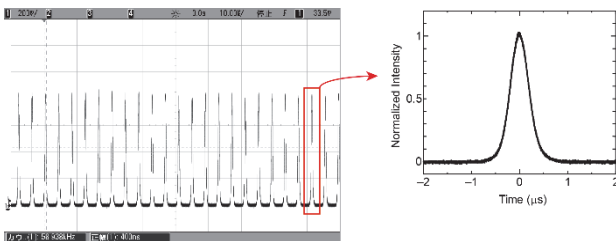


図 8 レーザパルス波形

5. Fe:ZnSe 結晶を用いた受動 Q スイッチ中赤外ファイバレーザの開発

$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 結晶は $3 \mu\text{m}$ 付近の波長域に強い吸収を有するため、過飽和吸収体として用いることができる。これまで

に、同結晶を過飽和吸収体として用いた比較的低出力な $3 \mu\text{m}$ 帯ファイバレーザの受動 Q スイッチ発振が報告されている[5-7]。本研究では、熱損傷閾値の高い $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ に着目し、高パルスエネルギー化と高平均出力化を目的として受動 Q スイッチ中赤外ファイバレーザの開発を行った。

ファイバレーザ発振器の概略図を図 9 に示す。レーザ媒質としてコア直径 $19 \mu\text{m}$ ，第一クラッド直径 $180 \mu\text{m}$ (D 型)，ErF3 ドープ濃度 6 mol%，ファイバ長 1 m の Er:ZBLAN ファイバを使用し、これを波長 978 nm の LD で励起した。共振器は垂直研磨されたファイバ端面のフレネル反射と銀ミラーにより構成される。この共振器内に $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ を挿入し、Q スイッチ発振させた。出力光の時間波形を InAs 検出器とオシロスコープで測定したところ、図 10 のようなパルス列が得られた。励起入力 7.5 W において、平均出力 570 mW，パルス幅 324 ns，パルスエネルギー $4.9 \mu\text{J}$ ，繰り返し周波数 116.3 kHz のパルスを得た。本実験では使用した励起光源の最大出力によりレーザ出力が制限されたが、より高出力な励起光源を用いることにより高出力化が図れることが期待される。

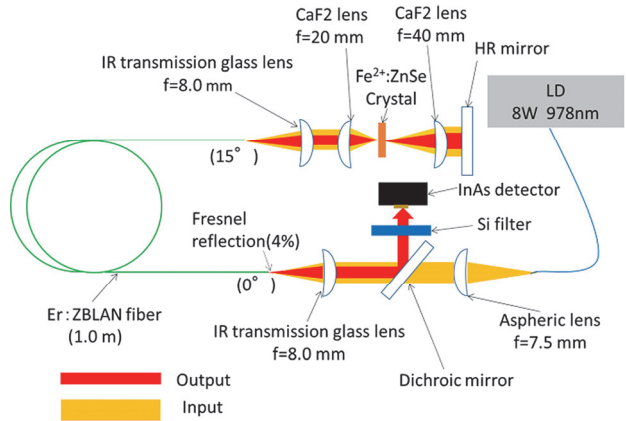


図 9 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ Q スイッチ中赤外ファイバレーザ

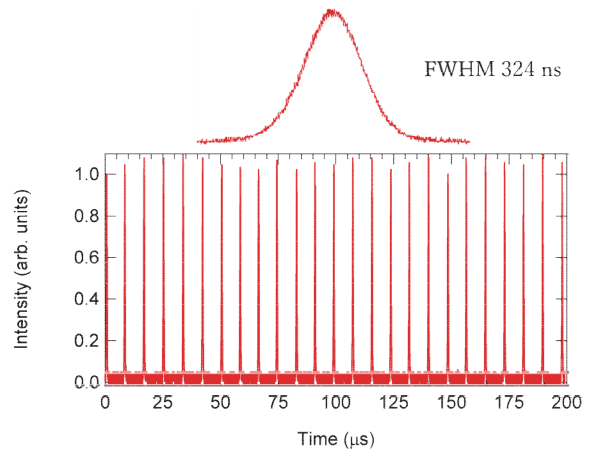


図 10 レーザパルス波形

6. モード同期中赤外ファイバレーザの開発

ピコ秒～フェムト秒の超短パルスレーザ発振を得た

めに、モード同期法が広く用いられている。本研究では、レーザ波長やファイバ材料に関係なく適用できる非線形偏波回転法を利用したリング型モード同期発振器の開発を試みた。

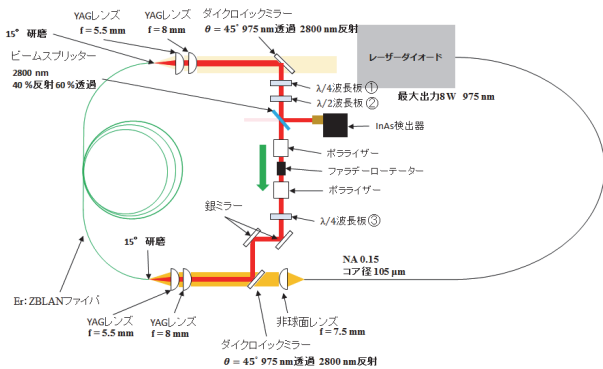


図 1 1 Fe:ZnSe Q スイッチ中赤外ファイバレーザ

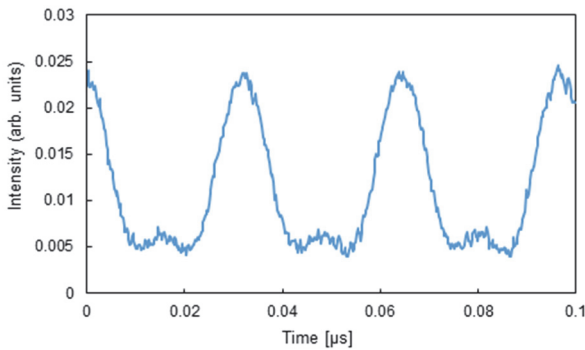


図 1 2 レーザパルス波形

図 1 1 に装置の概略図を示す。リング型共振器の発振方向を右回りのみとするため YIG 結晶と永久磁石を用いた 45° ファラデー回転子を共振器内に挿入した。また、共振器内の偏光を制御するため 3 枚の波長板を用いた。ファイバは、コア径 $6.9 \mu\text{m}$ 、コア開口数 $\text{NA} = 0.20$ 、Er 濃度 4 mol%、長さ約 6 m である。励起光源として波長 975 nm のファイバ結合型半導体レーザを用い、レンズを用いて第一クラッドへ励起光を入射した。励起入力 2.1 W のとき 54 mW の平均出力が得られた。励起パワーと偏光状態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 1 2 にパルス列の波形を示す。繰り返し周波数は

約 33 MHz であり、光速を共振器長で割った値とおよそ一致する。したがって、単一のパルスが共振器内を周回するモード同期の状態であることがわかる。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。

7. まとめ

中赤外域の短パルス・高平均出力・高効率・全固体レーザの実現を目指し、中赤外 2.8 μm 帯でレーザ利得が得られる Er 添加フッ化物ファイバに着目し、同波長帯の高ピーク出力レーザパルス発生に関する基礎研究を行った。フェムト秒微細レーザ加工を利用した中赤外 FBG を開発し、ファイバレーザ発振器に組み込むことで、波長 2.8 μm 帯で狭帯域発振を得た。また、グラフェンならびに Fe:ZnSe 結晶を過飽和吸収体として用いた受動 Q スイッチ発振パルスファイバレーザを開発し、高出力化へ向けた基礎データを得た。さらに、リング型ファイバ共振器によるモード同期発振を行い、中赤外ファイバレーザによる超短パルス発振の可能性を示した。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成のご支援を受けて実施しました。ここに謝意を表します。また共同研究者である京都大学の阪部周二教授、橋田昌樹准教授、大阪大学の宮永憲明教授、河仲準二准教授に感謝します。

参考文献

- [1] B. Srinivasan, E. Poppe, J. Tafuya and R. K. Jain, *Electron. Lett.* **35**, 1338 (1999).
- [2] B. Wang, L. H. Cheng, H. Y. Zhong, J. S. Sun, Y. Tian, X. Q. Zhang, and B. J. Chen, *Optical Materials* **31**, 1658 (2009).
- [3] G. D. Marshall, R. J. Williams, N. Jovanovic, M. J. Steel and M. J. Withford, *Optics Express* **18**, 19844 (2010).
- [4] Q. Bao et al., *Adv. Funct. Mater.* **19**, 3077 (2009).
- [5] Li et al., *Opt. Lett.* **37**, 3747 (2012).
- [6] Zhu et al., *Opt. Mat. Express.* **3**, 1365 (2013).
- [7] Wei et al., *IEEE Photonic. Technol. Lett.* **24**, 1741 (2012).