



S. Tokita

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

時田 茂樹*

1. まえがき

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、医療などの様々な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そろっている（図 1）。

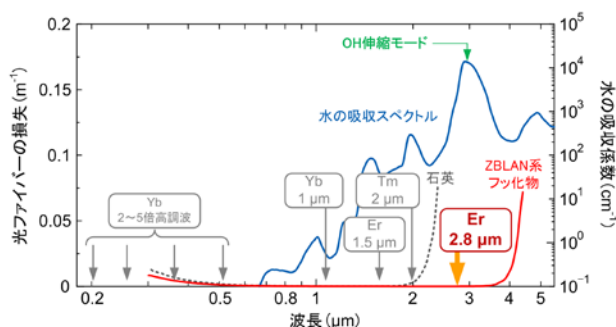


図 1 超短パルスレーザの波長と光ファイバ損失特性

一方、およそ 2 μm を超える長波長域においては、効率が低く高出力化が困難な波長変換レーザがあるのみで、加工用途において実用的な光源は未開発である。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ある。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エルビウム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。本稿では、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の実験結果について報告する。

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物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ことが必要である。

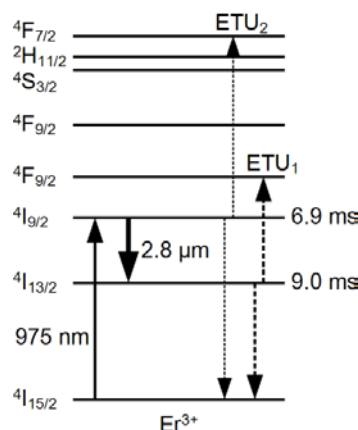


図 2 Er 添加 ZBLAN ガラスのエネルギー準位図

フッ化物ガラスには ZrF₄ 系、AlF₃ 系、InF₃ 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 (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF) と呼ばれる

*大阪大学 レーザー科学研究所 講師

ZrF₄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およそ 1000 cm⁻¹であるのに対し、ZBLAN ガラスではおおよそ 500 cm⁻¹と小さい。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 ガラスでは発光（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利用することができる。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。

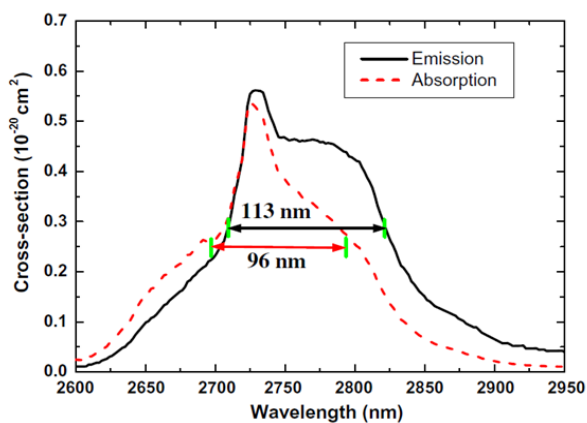


図 3 Er:ZBLAN ガラスの蛍光・吸収スペクトル
(参考文献[2]より引用)

3. 単一波長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空間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。

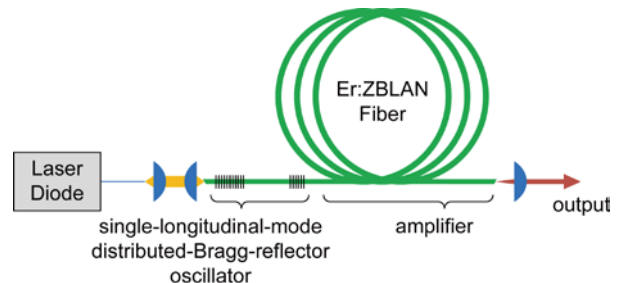


図 4 縦単一モードファイバ MOPA レーザの構想図

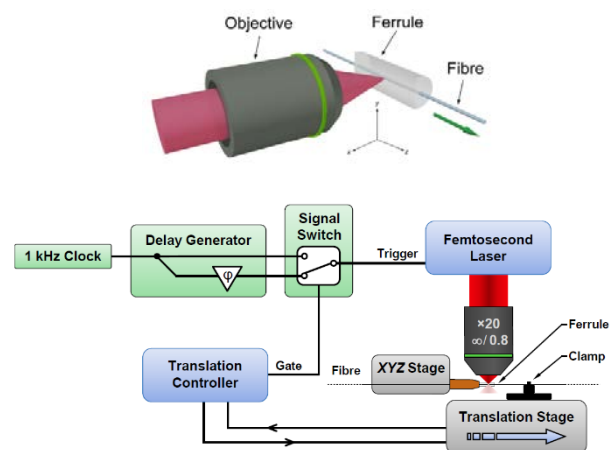


図 5 FBG 加工装置 (参考文献[3]より引用)

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 の繰返し位置決め精度を有する高精度ステージを用いた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. パルス発振中赤外ファイバレーザの開発

4.1 グラフェンを用いた Q スイッチ発振

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 添加 ZBLAN ファイバレーザの共振器内へ挿入し、グラフェンによる波長 2.8 μm における受動 Q スwitch 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 μm ，第一クラッド径 180 μm （D 型）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witch 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 μJ ，ピークパワーはおおよそ 16 W であった。

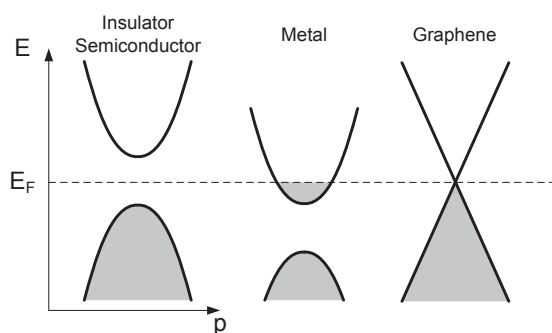


図 6 グラフェンのエネルギーバンド構造

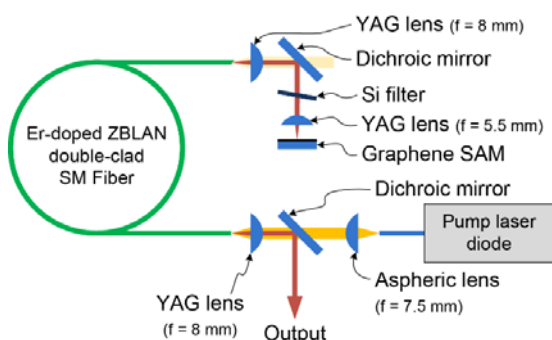


図 7 グラフェン Q スwitch 中赤外ファイバレーザ

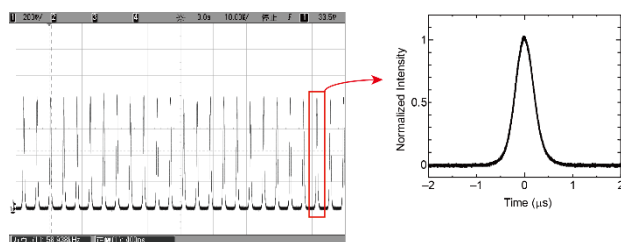


図 8 レーザパルス波形

4.2 Fe:ZnSe を用いた Q スwitch 発振

Fe^{2+} 添加 ZnSe 結晶は 3 μm 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 μm 帯ファイバレーザの受動 Q スwitch 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 Fe^{2+} 添加 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witch 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 μm ，第一クラッド直径 180 μm （D 型）， ErF_3 ドープ濃度 6 mol%，ファイバ長 1 m の Er 添加 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 Fe^{2+} 添加 ZnSe を挿入し、Q スwitch 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 μJ ，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。

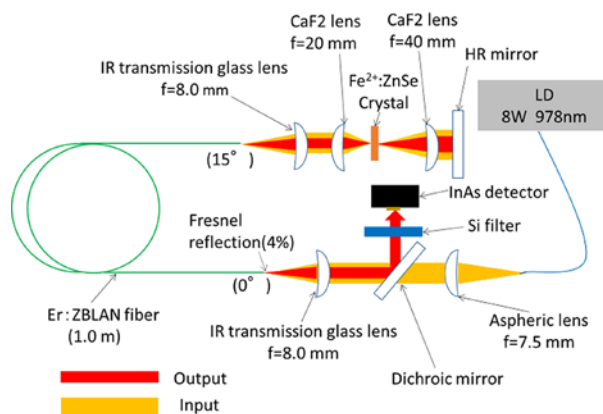


図 9 Fe:ZnSe Q スwitch 中赤外ファイバレーザ

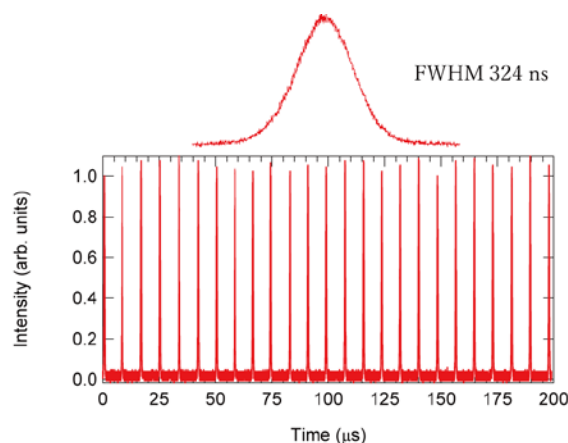


図 10 レーザパルス波形

4.3 非線形偏波回転によるモード同期発振

ピコ秒〜フェムト秒の超短パルスレーザ発振を得るために、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。

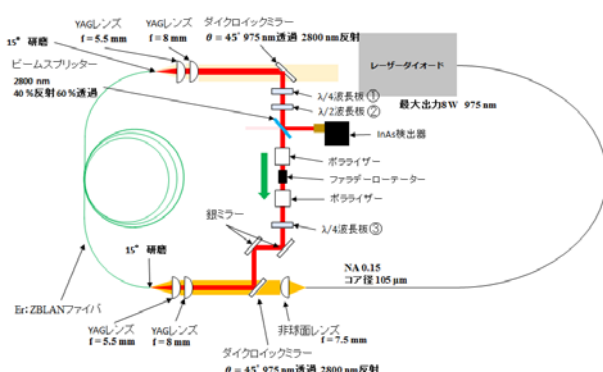


図 11 リング型モード同期ファイバレーザ発振器

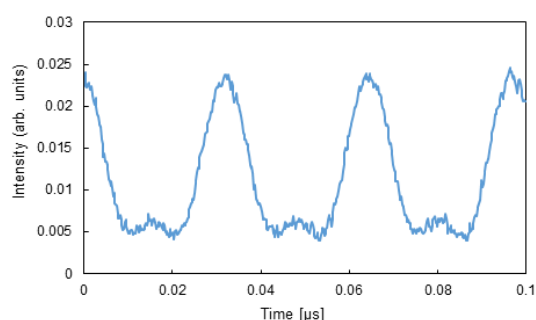


図 12 レーザパルス波形

図 11 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。コア径 6.9 μm , コア開口数 $\text{NA} = 0.20$, Er 濃度 4 mol%, 長さ約 6 m の Er 添加 ZBLAN ファイバを用いた。励起光源として波長 975nm 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 12 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、光速を共振器光学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。

5. 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 辭

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- [1] B. Srinivasan, E. Poppe, J. Tafoya 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).