

# 高効率・高出力 2 μm 帯パルスレーザー光源の開発

電気通信大学 レーザー新世代研究センター  
助教 戸倉川 正樹  
(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014212)

キーワード：2 μm 帯パルスレーザー，Tm ファイバーレーザー，Tm 固体レーザー

## 1. 研究の目的と背景

現在までにレーザー加工は我が国の主要な製造業、例えば自動車やスマートフォンなどの製造において必要不可欠な技術となっている。レーザー加工はパラメータを変えることによりその性質を変えることが可能であり、マスクスタマイゼーションや IoT (Internet of Things) などに適した加工法であると考えられ、より付加価値の高い高品質・高機能な製品を個人に提供することを可能とする超スマート社会の実現においてもその役割は大きく、今後もその重要性は高まっていくと考えられている。高精度なレーザー加工には主として高出力・高効率・高ビーム品質動作が可能な 1 μm 帯 Yb レーザーが用いられているが、より高機能な新しい材料開発なども日々進められており、対象物質や目的に応じて最適なレーザーの波長を選択することが必要である。例えば 2 μm のレーザー光は高分子材料であるプラスチック材料のマーキング、溶接などにおいて 1 μm 帯のレーザー光に比べて吸収が強く有効であり、逆にシリコンなどでは線形吸収が小さく、ステルス加工や 3 次元加工などが実現できる可能性がある<sup>1)</sup>。

近年波長 2 μm 帯で動作するレーザーのなかで特に Tm 添加媒質を用いたレーザーが非常に大きな注目を集めている。Tm レーザーは、0.8 μm 帯のレーザーダイオードによる直接励起によって、交差緩和過程をとらなう量子効率 2 の高効率なレーザー動作が可能であり、連続発振ファイバーレーザーでは平均出力 1 kW 以上が 2010 年に既に報告されている<sup>2)</sup>。また Tm レーザー (~1.9 μm) を励起源とした Ho レーザー (~2.1 μm) や Cr<sup>2+</sup> レーザー (~2.5 μm) なども大きな注目を集めており、欧州では加工応用を考えた EU プロジェクトなども走っている。対してわが国では波長 2 μm 帯のレーザー研究は遅れをとっており、産業応用と科学応用の両方の意義での早急な研究開発体制の強化が必要とされている。

本研究では高効率・高出力動作が可能な波長 2 μm 帯パルスレーザー光源の開発を目指し、1. 波長可変高出力ノイズライクパルス Tm ファイバーレーザー (波長可変幅 50 nm)、2. 全ファイバー型高効率・高出力ノイズライクパルス Tm レーザー (平均出力 10 W)、3. インバンド励起高出力モード同期 Tm 添加固体レーザー (パルス幅 170 fs 以下) の 3 種の光源開発を行った。

## 2. 波長可変高出力ノイズライクパルス Tm ファイバーレーザー<sup>3)</sup>

ファイバーレーザーは長い作用長、導波路構造による横モード制御性、光ファイバーの堅牢さと形状自由度などによって、高利得、高平均出力、高ビーム品質、高安定、コンパクトなどの特性を有した実用的な光源を可能とする。しかしその特性からラマン散乱や自己位相変調などの非線形光学効果により、発生可能なパルスエネルギーは大きな制限をうけやすい。波長 2 μm 帯のファイバーレーザーはシングルモード動作時のビーム径拡大側 (ビームエリヤ  $\propto \lambda^2$ ) から波長 1 μm 帯レーザーに比べ非線形光学効果の抑制が可能であり、より高パルスエネルギー動作が可能と考えられている。またファイバーレーザーは増幅器の種光源としても用いられるが、選択可変特性を有していることは応用上好ましい。波長可変性を得るためには波長可変フィルタを共振器中に組み込めばよいが、共振器構成の複雑化や損失の上昇を伴ってしまう。また 2 μm 帯では広帯域で低損失な波長可変フィルタは数が少なく、さらに超短パルス発振を支えることのできる透過バンド幅を有するとなると現在のところ市販品では存在しない。

本研究では、変調素子として SESAM (半導体可飽和吸収体鏡) を使用した直線型のシンプルな共振器構成の下、レンズの色収差を利用した波長 2 μm 帯波長可変ノイズライクモード同期ファイバーレーザーの開発を行った (図 1)。

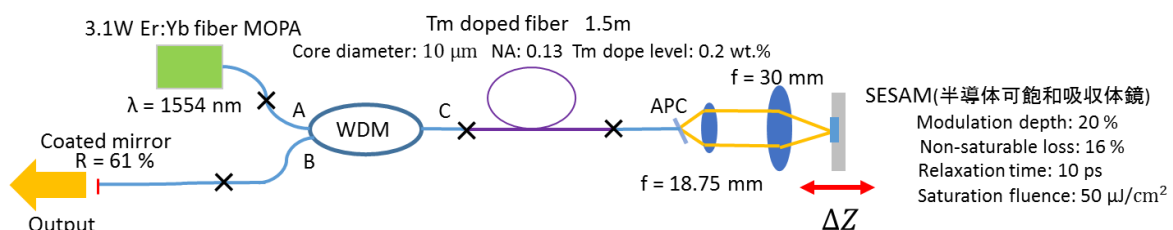


図 1 波長可変 SESAM モード同期 Tm ファイバーレーザー実験図概要

先にノイズライクモード同期について簡単に述べると、ノイズライクモード同期では共振期中で光パルスがソリトン形成と崩壊を繰り返し複数のパルスに分裂し、バンチ状パルス群を形成している。そのため実効的なパルス幅は増加してしまうが、100 nJ 以上の高い実効的なパルスエネルギーを発振器から直接発生することも可能である。

波長可変 SESAM モード同期 Tm ファイバーレーザーの構成を図 1 に示す。利得ファイバーには、Tm 添加シリカガラスファイバーを用いており、これは約 1.7  $\mu\text{m}$  から 2.1  $\mu\text{m}$  に及ぶ広い範囲でレーザー発振が可能であり、フェムト秒パルスを発生することも可能である。励起光源には自作した波長 1555 nm、最大出力 4.8 W の Er:Yb ファイバー-MOPA を使用し WDM の A ポート (図 1) を通して C ポートに融着された利得ファイバー (コア径 10  $\mu\text{m}$ 、NA $\approx$  0.13、Tm 添加濃度 $\approx$  0.2 wt.%, Uni. Southampton.) をコア励起している。WDM の B ポートには、ミラーを端面に蒸着したファイバー (反射率 R  $\approx$  60%) を融着し出力鏡として用いている。利得ファイバーの端面には APC ファイバーが融着され、そこからの出射光をレンズ系によって SESAM または HR ミラー上に集光している。使用しているファイバーは全て波長 2  $\mu\text{m}$  帯においてシングル横モードであり、異常分散を有している。得られたレーザーの出力特性を図 2a に示す。HR ミラーを使用したとき最大出力 213 mW、スロープ効率 7.4% が得られた。また SESAM を使用したときには最大出力 195 mW、スロープ効率 6.8% が得られた。SESAM 使用時には出力が 86 mW を超えたところから時間波形に変調がのったモード同期発振が得られ、出力が 176 mW を超えたところから変調が消えたモード同期発振が観測された。図 2b

にこのときオシロスコープで観測された時間波形を示す。繰り返し周波数は 20.5 MHz であり、パルスエネルギーは最大出力時で約 9.5 nJ と推測される。図 2c に出力 195 mW 時のスペクトルを示す。スペクトルは半値全幅で 18.9 nm である。スペクトル幅から Sech<sup>2</sup> 型のフーリエ限界パルスを仮定するとパルス幅は約 200 fs と計算されるが、パルスエネルギーとファイバーの分散値から基本ソリトンのパルス幅を計算した場合は約 30 fs 程度と計算され、基本ソリトンの状態では発振していないことが分かる。図 2c のスペクトルを見るとケリーサイドバンドやマルチパルス発振時の構造も現れていない。このようなスペクトルはノイズライクモード同期発振状態の特徴によく一致している<sup>4)</sup>。このとき測定した自己相関波形を図 2d に示す。相関波形は中心部に幅 $\sim$ 335 fs x 1.55 のピークと土台成分 (幅 $>$ 200 ps) によって構成されている。7 GHz ( $\sim$ 142 ps 分解能) のオシロスコープで観測したところ 200 $\sim$ 300 ps のパルスが観測された。これらのデータより我々はこのレーザーはノイズライクモード同期領域で発振していると判断できる。この実験系において、SESAM を前後に移動させることによってモード同期動作下での波長可変を行った。SESAM を移動させた際のスペクトルを図 2e に示す。SESAM を $\sim$ 300  $\mu\text{m}$  の程度移動することにより 10 $\sim$ 20 nm という広いスペクトルを有するモード同期発振を維持した状態で 47.5 nm の波長可変性が得られた。SESAM の相対的な位置と平均出力、ピーク波長の関係を図 2f に示す。同様の波長可変性は SESAM を高反射ミラー変えて連続発振状態としても得られ、ミラーの移動量に対する波長変化量の傾きは $\sim$ 1.7  $\times$  10<sup>-4</sup> であった。使用しているレンズ系の色収差

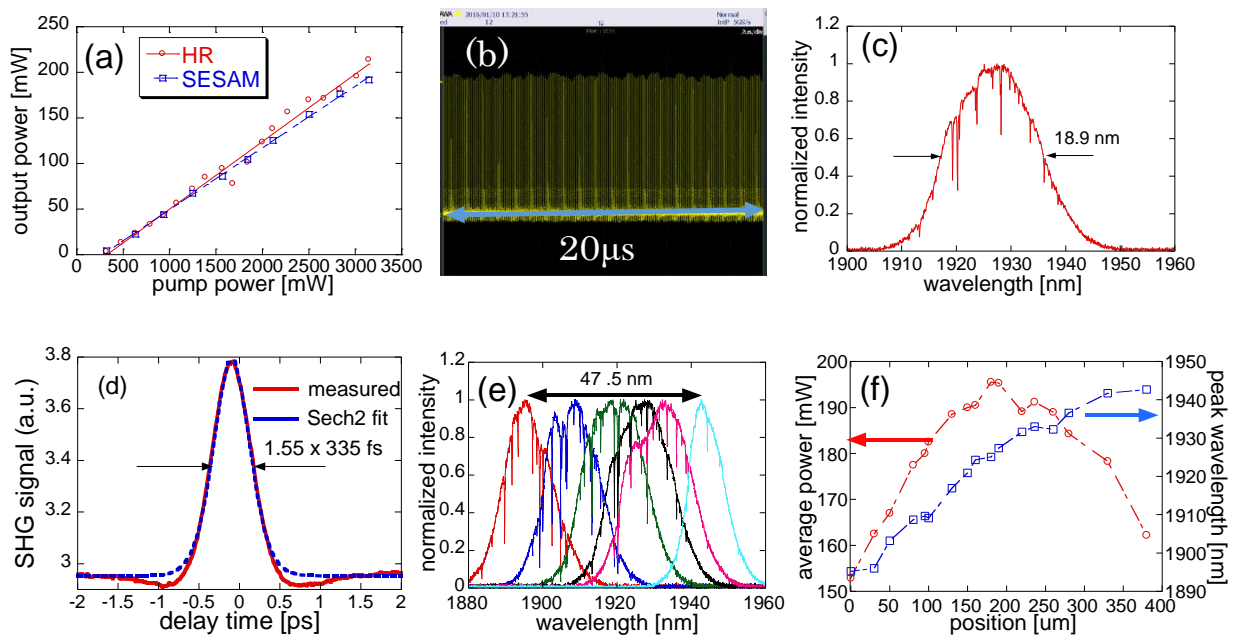


図 2. (a) 出力特性、(b) パルストレーン、(c) 195 mW 出力時スペクトル、(d) 測定された自己相関波形の代表例、(e) スペクトルの SESAM 位置依存性、(f) 出力と中心波長の SESAM 位置依存性。

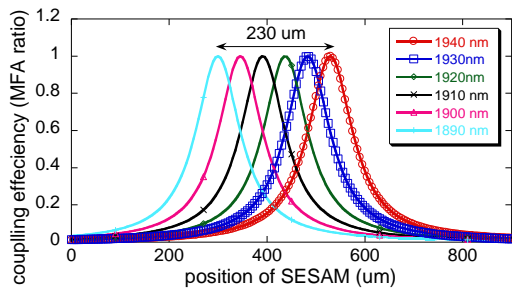


図 3 計算された各波長におけるファイバー結合効率の SESAM 位置依存性

によるファイバーへの結合効率のミラー位置依存性を計算した結果を図 3 に示す。約 50 nm の波長シフトに対して必要とされる SESAM 移動量は $\sim 230 \mu\text{m}$ と見積もられ、微分係数は $\sim 1.7 \times 10^{-4}$ となり、これは実験で得られた値によく一致している。発振波長のシフトは共振器の損失変化によっても起こりえるが、上記の計算と実験の一致により、本実験の波長シフトはレンズの色収差によって引き起こされていると推測される。また計算よりレンズ系透過バンドは半値全幅で $20\sim 30\text{nm}$ となりこれは現在のモード同期レーザーの帯域幅を制限していると考えられる。レンズ系やファイバー長の最適化によって更なる短パルス化や波長可変性が得られることが期待できる。さらにこれを種光源とすることにより波長可変性を有した平均出力 10W 以上、パルスエネルギー $\mu\text{J}$ 以上の増幅システムを開発することも可能である。応用としてはポリマー材料の微細加工や、シリコンの 3D 加工を想定している。

### 3. 全ファイバー型高効率・高出力ノイズライクパルス Tm レーザー

長期安定動作を考える上ではレーザーの全てがファイバーで構成され、自由空間を含まないことが望ましい。そのため本研究では全ファイバー化された高効率・高出力ノイズライクパルス Tm ファイバーレーザーの開発を行った。

図 4a に作製した全ファイバー型発振器の構成図を示す。励起光源と利得ファイバーは前述の実験と同様である。可飽和吸収機構には SESAM に変えて分岐比 10/90 のカップラーを用いた非線形ループミラーを使用した。ループファイバーには 114 m の SMF28 を利用しており、偏波制御のため偏波コントローラー(PC)を設置してある。このループファイバーは繰返し周期を低下させ、パルスエネルギーの増加にも寄与する。出力はループミラーの後に融着された分岐比 40/60 のカップラーの 40 側のポートから取り出している。このとき最大平均出力 200 mW、スペクトル幅 13.9 nm、繰返し周波数 1.6 MHz、パルス幅 $\sim 5\text{ns}$ 、パルスエネルギー 125 nJ のノイズライクパルス発振が得られた。この NLP 光源を図 4b に示すようなダブルクラッド Tm ファイバー(長さ: 1 m, NA:0.13, コア径: 13  $\mu\text{m}$ , クラッド径: 128  $\mu\text{m}$ , 吸収: 19dB/m @790 nm)を用いた増幅器により増幅した。このとき利得ファイバーを水冷により冷却し中心波長

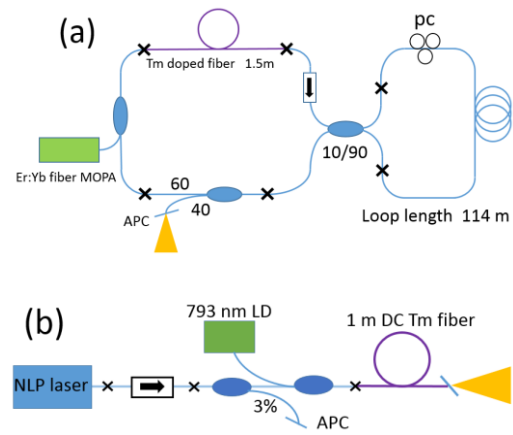


図 4. 全ファイバー型高効率・高出力ノイズライクパルス Tm レーザー概略図。(a) 発振器、(b) 増幅器

1893 nm という Tm の再吸収の影響を強く受ける短波長領域においてスロープ効率 44%、最大平均出力 10.2 W、パルスエネルギー 6.4  $\mu\text{J}$  が得られた。パルス幅は増幅前からほぼ変化がなく約 5ns となっている。図 5 に、増幅特性と最大出力時のスペクトルを示す。スペクトルに見られる周期的な構造は増幅器においてエタロン効果が生じているためであると推測している。また出力特性をみると増幅出力は直線的に伸びており、励起出力を上げることによってさらなる上昇が期待でき、適切な冷却方法を行えば平均出力 100W も可能と考えられる。現状の 10 W, 6  $\mu\text{J}$  出力でもポリマー材やシリコン基盤などの加工実験などへの応用が考えられる。

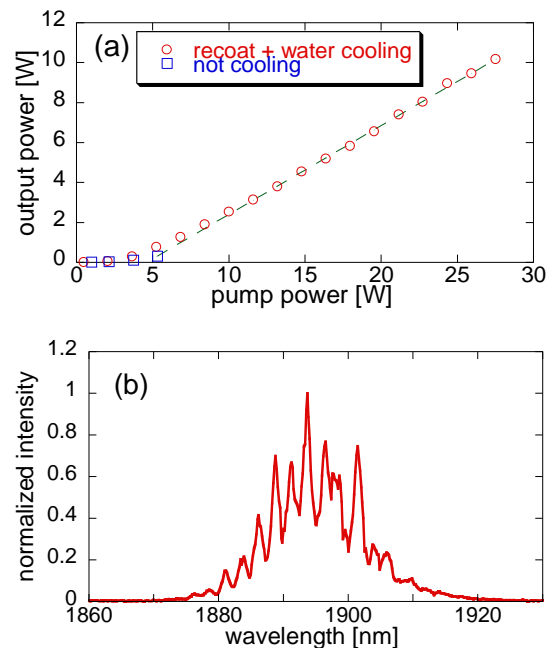


図 5. (a) 増幅特性, (b) 最大出力時のスペクトル

表 1 各種レーザー利得媒質の比較  
Table 1. Comparison of laser gain media

material	$\lambda$ (nm)	BW (nm)	$\sigma$ $10^{-20}\text{cm}^2$	$\tau$ ms	$\sigma\tau$ $10^{-23}\text{s}\cdot\text{cm}^2$	$I_s$ kW/cm <sup>2</sup>	K W/m $\cdot$ k	n <sub>2</sub> $10^{-15}\text{cm}^2$
Tm <sup>3+</sup> :Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	~1960 ~2120	~60 ~50	~0.7 ~0.3	3.4	~2.3 ~1	~2.2 ~5	7~16	~1.1
Tm:YAG	~2010	~30	0.15	10	~1.5	~3.4	10~11	0.57
Yb:YAG	~1030	~10	2.1	1	~2.1	~5	10~11	0.57
Yb:CaF <sub>2</sub>	~1040	~40	0.25	2.4	~0.6	~18	~8	
Ho:YAG	~2090	~30	~0.9	8.5	~7.6	~0.65	~10	0.57
Cr:ZnS	~2400	~800	~140	0.006	~0.84	~5	~27.2	6.3

#### 4. 高効率・高出力超短パルス帯モード同期固体レーザー

ファイバーレーザーは長波長化により非線形光学効果の抑制が可能であるが、 $\mu\text{J}\sim\text{mJ}$ を超えるより高いパルスエネルギーを発生させるためには固体レーザー媒質を利用することが必要となってくる。高パルスエネルギーを有する波長2-4 $\mu\text{m}$ 光はチタンサファイアレーザーやYb添加レーザーの0.8-1  $\mu\text{m}$ 光を基本とした非線形波長変換によっても得られているが、非線形波長変換を用いずに直接、高効率に発生できればスケールアップやシステムの簡略化のために有意義である。中赤外固体レーザーについて幾つか例を挙げると遷移金属 Cr<sup>2+</sup>:ZnS は中赤外領域のチタンサファイアレーザーとも呼ばれて、波長2.2-3  $\mu\text{m}$ 帯で40 fs程度の超短パルス発振が実現されている。Ho:YAG やTm:YAP 結晶を用いた波長2 $\mu\text{m}$ 帯の増幅器の研究も進んでいる。

本研究ではTm添加希土類三산화物(Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)と従来と異なる波長~1600 nmファイバーレーザーによるin-band励起を組み合わせ、Tm添加固体レーザーでは世界で初めてとなるカーレンズモード(KLM)同期レーザーの開発を行った。使用した Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の特徴を幾つか上げると(表1)、①Tm:YAG などと比べ、レーザーの上準位寿命が短く蛍光断面積が大きい。このため比較的エネルギーを取り出し易い。②波長2120nmという一般的なTm、さらにはHo添加媒質よりも長波長帯において広帯域な利得を有している(図6a)。この波長域は水の吸収が少なく、さらに長波長中赤外(~4-12  $\mu\text{m}$ )に波長変換する際に変換用の非線形結晶中の多光子吸収を低減させる上でも有用である。③

Cr:ZnS などと比べて3桁大きな上準位寿命を有し、さらに非線形屈折率は5分の1程度であることから、増幅器として用いた場合スケールアップ上のメリットを有している可能性がある。

次に波長~1600 nmファイバーレーザーを用いたin-band励起の特徴を述べる(図6b)。①従来の800 nm励起では交差緩和過程を伴う量子効率2の励起プロセスを効率的に発生させるため、高濃度のTm添加が必要とされ単位体積あたりの発熱量増加や非線形な緩和過程の発生が問題となっていたが、それらが抑制される。②LD励起と比べると高い励起ビーム品質が得られ、カーレンズモード同期などが得られ易くなる。また従来モード同期発振器に用いられていたTi:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>励起と比べて安価で高効率・高出力・高安定な励起光が得られる。③励起ファイバーレーザーの最適化により高エネルギーパルス励起なども可能となる。我々はこれらの特徴より従来のシステムでは得られなかった増幅特性を可能とし、I. 高効率・高出力カーレンズモード同期レーザー発振器、II. 高パルスエネルギー増幅器を実現させることを目標とした。

図7に実験の概略図を示す。共振器は一般的なZ型共振器を用いており、励起光源には自作1611 nm Er,YbファイバーMOPA(最大出力~8W、直線偏光、狭線幅)を用いた。利得媒質は長さ3.7 mm、1%添加のTm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>結晶をプリユースタ角で用いた。凹面鏡は曲率100 mm、高反射コート1850nm-2200nmを有している。エンドミラーは高反射コート2050nm以上、低反射コート1950nm以下を有している。出力鏡は透過率1%、2.5%@2000-2300nmの二種類を使用した。分散補償素子としてIR品質の溶解石英

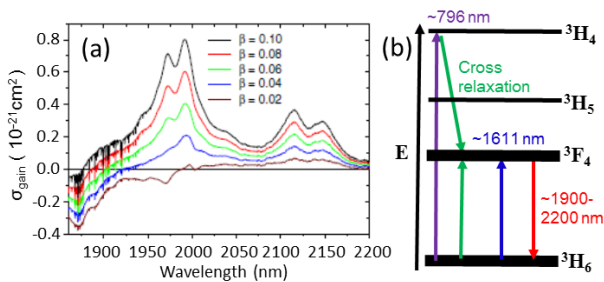


図 6. (a) Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>実効的誘導放出断面積、(b)800nm励起と1600nm in-band励起の違い

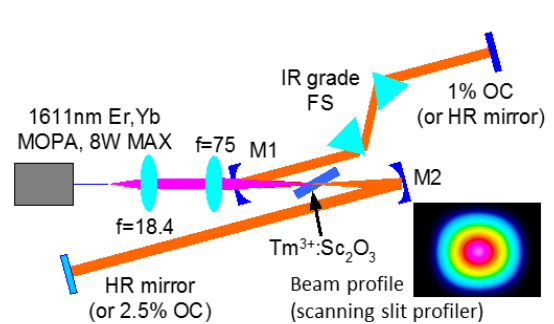


図 7. ファイバーレーザー励起 Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザー実験図

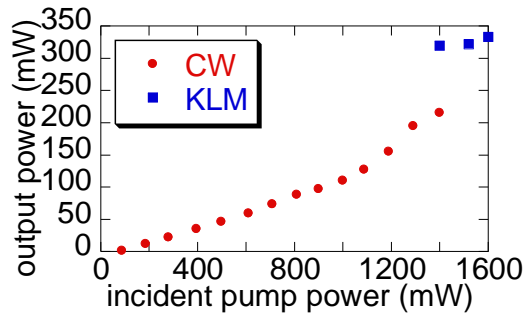


図 8. ファイバーレーザー励起 Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザー出力特性

プリズムペア(距離 7.5cm)を用いた。図 8 に透過率 1% 出力鏡を用いたときの出力特性を示す。1.4W 励起時に出力 320 mW, パルス幅 247fs が得られた。繰り返し周波数は 95 MHz である。カーレンズモード同期がかかった瞬間に 100 mW 程度の出力の増加が見られた。またカーレンズモード同期は機械的な振動をあたえることなく自動的にかかった。共振器をパルス幅が短くなるように最適化した結果図 9a、図 9b に示されるようなパルス幅 166 fs、スペクトル幅 29.3 nm、中心波長 2124nm のパルス発振が得られた。また実験中にモード同期発振の中心波長が 2140 nm にシフトする現象も確認された。これは Tm:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の有す二股の利得形状(図 6a)から発生していると考えられる。最大出力は 440 mW で励起出力は 3.15W である。

次に透過率 2.5% の出力鏡を用いて出力の最適化を行った。このとき最大出力 1 W、パルス幅 298 fs が得られた。励起出力は 3.7W であり、60% の吸収効率を仮定すると、対吸収パワーの効率は約 45% となっている。本研究の結果を以前に他のグループからの報告と比較すると(図 10)、Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 励起に比べて高効率なファイバーレーザー励起の元、短パルス領域で数倍以上の高出力化に成功したことがわかる。共振器の分散量や励起出力の最適化をすすめることにより更なる短パルス化や高出力化が可能と考えら。

## 5. 結び

本研究では高効率・高出力動作が可能な波長 2 μm 帯パルスレーザー光源の開発を目指し、1. 波長可変高出力ノイズライクパルス Tm ファイバーレーザーでは、新しい波長可変方法により波長帯 2 μm において 20nm 近くのスペクトル幅を有したノイズライクパルス発振状態において波長可変幅 50nm を実現した。2. 全ファイバー型高効率・高出力ノイズライクパルス Tm レーザーの開発では、安定な全ファイバー型という構成のもと発振器から 100 nJ 以上のノイズライクパルス発振に成功し、それを増幅することによって平均出力 10 W 以上、パルスエネルギー 6 μJ 以上を実現した。3. インバンド励起高出力モード同期 Tm 添加固体レーザーの開発では世界で初となるカーレンズモード同期に成功し高効率・高出力なパルス幅 166 fs レーザー発振に成功した。

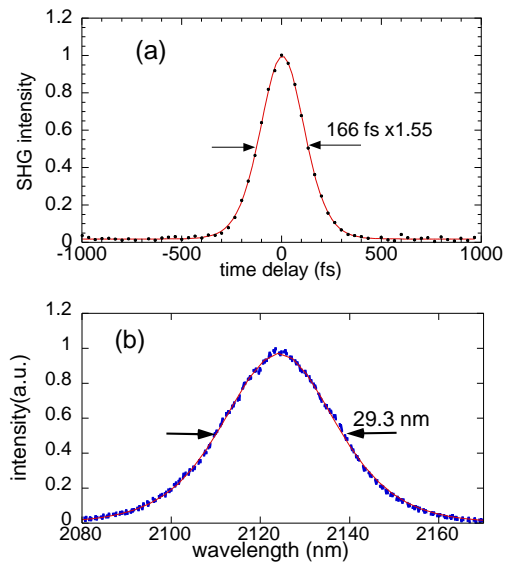


図 9. (a) 自己相関波形、(b) 発振スペクトル

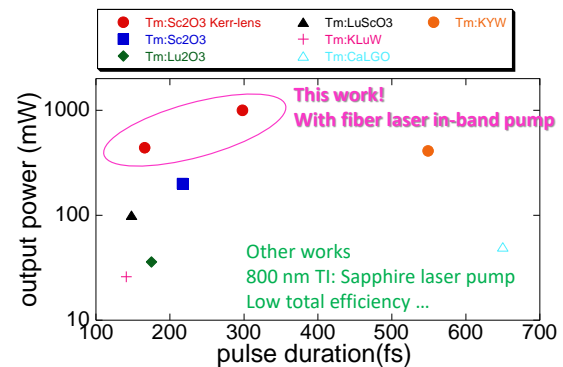


図 10. 本研究結果と他のグループの報告との比較

## 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。また本研究の一部は科学研究費補助金(若手研究 若手研究 B)および最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラムよりもご支援をうけて実施しました。

## 参考文献

- 1) I. Mingareev et al. Optics & Laser Technology, **44**, 2095–2099, (2012)
- 2) T. Ehrenreich et al., SPIE Photonics West 2010 7580, Session 16:Late-Breaking News January, (2010)
- 3) Y. Mashiko, E. Fujita, and M. Tokurakawa, Optics Express **24**, 26515–26520 (2016)
- 4) J. Li, et al., Opt. Express **22**, 7875–7882 (2014)
- 5) M. Tokurakawa, E. Fujita, and C. Kränkel, submitted to Optics Letters. (2017).