

# 波長 2µm 帯ナノ秒、フェムト秒 短パルス Tm レーザー光源の開発

戸倉川 正樹\*

M. Tokurakawa

# 1. まえがき

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、マスカ スタマイゼーションや IoT(Internet of Things)などと親和性 の高い加工法であり、個々人の要求に応じたより高付加価 値な製品を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い。現在高精度なレーザー 加工には主として高出力・高効率・高集光性を有した波長 1µm帯Ybレーザーやその高調波が用いられているが、従 来とは異なる性質を有す新材料開発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波長を選択す ることが有効である。例えば2 µm 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 1µm 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次元加工などの非線形加工に適している1)。欧州では2 μm ファイバーレーザーの EU プロジェクト ISLA なども 走っているのに対して、我が国では2 µm帯レーザーの研 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。

波長2µm帯を含む中赤外光(2-5µm)はTi:Al2O3レーザー やYbレーザーの0.8-1 µm 光を基本とし、酸化物系の非線 形結晶を用いた波長変換によって得ることが可能である が、システムが複雑化し全体の効率も制限されてしまうと いった問題がある。そこで固体レーザーやファイバーレー ザーによる高効率な直接発生が望まれ、近年特に Tm 添加 媒質を用いた 2 μm 帯レーザーが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、交差緩和過程をともなう量子効率2の高効 率なレーザー動作が可能であり(図1)、連続発振ファイバ ーレーザーでは平均出力1kW が 2010 年に報告されてい る<sup>2)</sup>。また Tm レーザーを励起光源としても用いた Ho レ ーザーや遷移金属 Cr<sup>2+</sup>:ZnS レーザーなどの研究も盛んで あり、前者は波長 2.1 μm 帯において高出力動作に優れ平 均出力 400 W が達成されており 3)、後者は中赤外領域の Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーとも呼ばれ、波長~2.4 µm 帯で sub-30 fs の超短パルス動作が実現されている4)。

本稿では我々が高効率・高出力動作を目指して開発を進めてきた、パルス幅やエネルギーの異なる4種の波長2 $\mu$ m 帯短パルス Tm レーザー光源:I. Tunable noise like pulse Tm fiber laser、II. All fiber noise like pulse Tm laser、III. Q スイッチ Tm ファイバーレーザー、VI.モード同期 Tm 固体レーザーについて報告する。

2. Tunable noise like pulse Tm fiber laser <sup>5)</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、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制限をうけ易い。

波長 2 µm 帯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(ビームエリア  $\infty \lambda^2$ )から波長 1µm 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る(ソリトンモー ド同期やナノ秒パルスではこれはおおむね正しい)。また Tmファイバーは2µm帯に広い蛍光スペクトルを有してお り、適切な共振器構成により、連続発振においては約 1750 nm-2100 nm の範囲で波長可変レーザー動作が実現されて いる(2200 nm までの動作も報告されているが<sup>の</sup>、この波長 帯は Ho レーザーがより一般的である)。このような波長可 変性は応用上好ましいが波長 2 µm 帯では広帯域で低損 失な波長可変素子はまだ少なく、共振器構成の複雑化や損



図1 (a)励起方法の異なる共振器構成おける Tm fiber laser の波長可変特性.(b) Tm<sup>3+</sup>イオンのエネルギー 準位図.利得波形は参考文献 6 などを参考に

<sup>\*</sup>電気通信大学 レーザー新世代研究センター 准教授



図2 波長可変 SESAM モード同期 Tm ファイバーレーザー実験装置概要

失の上昇を伴ってしまうことも多い。また波長 2 μm を超 えるような中赤外領域で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ような波長可変素子は現在 のところ非常に乏しい。そこで本研究では、変調素子とし て SESAM(半導体可飽和吸収体鏡)を使用した直線型共振 器構成の下、任意波長で利用可能なレンズの色収差を利用 した波長可変機構を備えた、2 μm 帯波長可変 SESAM モ ード同期 Tm ファイバーレーザーの開発を行った。

開発した波長可変 SESAM モード同期 Tm ファイバーレ ーザーの構成を図 2 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(コア径 10 µm、NA≈0.13、Tm 添加濃度≈0.2wt.%, Uni. Southampton.)を用いており、励起 光源には波長 1555 nm、Er:Yb ファイバーMOPA を使用し WDM の A ポート(図 2)を通して C ポートに融着された利 得ファイバー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≈60%)を融 着し出力鏡として用いている。 利得ファイバーのもうー 方の端面には APC コネクタ処理がなされたファイバーが 融着され、そこからの出射光はレンズ系によって SESAM または HR ミラー上に集光、反射され、ファイバーに再結 合される。使用しているファイバーは全て非偏波保持で波 長 2 µm 帯においてシングル横モードであるとともに、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 3a に示す。HR ミラー および SESAM を使用したとき、前者では最大出力 213 mW、スロープ効率 7.4%が、後者では最大出力 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大きな変調が乗っ た繰り返し周波数 20.5MHz のパルス列がオシロスコープ にて観測され、出力が176mWを超えたところから変調の 少ないパルス列が観測された(3b)。この繰り返し周波数は 共振器のファイバー長に一致しており、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。出力195 mW 時の スペクトル半値全幅は 18.9 nm であり(図 3c)、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(FWHM)は約 200fs 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すると約 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 ことが推測される。またケリーサイドバンドのやマルチパ ルス発振特有のスペクトル構造》も現れておらず、自己相 関波形(図 3d)は中心部の幅~335 fs x 1.55 のピークと、幅> 200 ps の土台成分によって構成されており、7 GHz(立ち上



 図3 波長可変 SESAM モード同期 Tm ファイバーレーザー(a) 出力特性、(b)パルストレイン、
(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(●)、測定された中心波長(■)、計算された中心波長(▲)の SESAM 位置依存性.

がり時間~50 ps)のオシロスコープでは 200~300 ps のパル ス幅が観測された。これらスペクトルおよび自己相関波形 の特徴はノイズライクパルス発振状態の特徴に良く一致 しており、我々のレーザーが基本ソリトンではなくノイズ ライクパルス状態であることが推測される<sup>9</sup>。ノイズライ クパルス発振では共振器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、パルス群を形成し、 群としての実効的なパルス幅はps~nsに増加してしまうが、 100 nJ 以上の高い実効的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。

またこの実験系において、SESAM 位置を光軸方向に ~320 µm 程度移動することにより 10~20 nm という広いス ペクトル幅を有するノイズライクパルス発振状態で約 48 nm の波長可変性が得られ (図 3e)、同様の波長可変性は SESAM を高反射ミラーに変えても得られた。SESAM の 相対位置と平均出力、ピーク波長の関係は図 3f のように 示され、ミラーの移動量に対する波長変化は中心波長 1930nm までは線形であり、微分量は~1.7 x 10<sup>-4</sup> であった。 この波長可変性の理由は、集光レンズ系の色収差によって ファイバーへの結合効率が波長とSESAM位置に依存する ためと考えられる。各波長に対する結合効率のミラー位置 依存性を計算すると図4のように示され、約50nmの波長 シフトに対して必要とされる SESAM 移動量は~230 µm と 見積もられ、微分係数 dl/dz は~1.7 x 10<sup>-4</sup>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。1930 nm よ り長波長側での線形からの逸脱は利得幅限界から生じて いると推測される。また計算よりレンズ系透過バンド幅は 半値全幅で 20~30 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、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µJ 以上の増幅システムを開発することも 可能である。



図 4 各波長におけるファイバー結合効率の SESAM 位置依存性の計算結果



図 5 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

## 3. All fiber noise like pulse Tm laser

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 こで本研究では自由空間を排除し、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 5a に開発した全ファイバー型 Tm レーザー構成図を示す。励起光源と利得ファイバーは前述 の実験と同様であり、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 <sup>10)</sup>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を設置 している。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 一後に融着された分岐比 40/60 のカップラーの 40 側ポー トから取り出し、最大平均出力 200 mW、スペクトル幅 13.9 nm、繰り返し周波数 1.6 MHz、パルス幅~5 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。

この出力を種光として図 5b に示すようなダブルクラッ ドTm ファイバー(長さ:1m, NA:0.13,コア径:13 µm, クラッ ド径:128µm)を用いた増幅器を開発した。次頁図 6a に増 幅特性、図 6b に最大出力時のスペクトルを示す。このと き利得ファイバーを水冷却することによって中心波長 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 µJ の増幅動作が得られた。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。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が確証はな い。出力特性をみると空冷では5 W 励起あたりから出力 飽和が発生してし、水冷却時には増幅出力は線形に上昇し た。現在の出力は励起パワーで制限されており、励起 LD を増設し適切な冷却とファイバー端面に End-cap などを施 せば平均出力 50~100 W も可能と考えられる.



図6 (a) 増幅特性, (b) 最大出力時のスペクトル

4. ナノ秒Qスイッチ Tm ファイバーレーザー 数十ns レベルのパルス幅であればQスイッチレーザー 動作によってモード同期レーザーに比べて遥かに高いパ ルスエネルギーを得ることが可能である。我々はナノ秒パ ルスによるレーザー加工実験のため波長可変性を有した Oスイッチ Tm ファイバーレーザー開発を行っている。

開発したレーザー装置概要を図 7 に示す。共振器はフ ァブリーペロー型であり、利得ファイバーは偏波保持型ダ ブルクラッドファイバー(コア径10 µm,クラッド径130µm) が用いられ、波長 793 nm マルチモード LD によって偏波 保持励起コンバイナーを通して励起されている。ファイバ ーの片短面には APC コネクタを取り付けた PM ファイバ ーを融着しフレネル反射による寄生発振を抑制している。 APC からの出射光を非球面レンズでコリメートし音響光 学変調器(AOM)を用いて AOM が ON 時に1 次回折光をフ ィードバックとし、Q スイッチレーザー動作に必要な変調



図7 波長可変ナノ秒Qスイッチレーザー概略

を与えている。0次の回折光を用いる場合に比べて損失変 調深さを大きくできるため、より多くの非飽和利得、すな わち短パルス性と高エネルギー性を得ることを可能とし ている。また AOM は偏光依存の回折効率と周波数シフト を与えるため、偏波ファイバーの軸と合わせることによっ て縦モードフリーの直線偏光出力も得られている。利得フ ァイバーのもう一方の端面は垂直にクリーブされ、フレネ ル反射による約 3.6%反射の取り出しポートとして使用さ れている。出力にはわずかながら残存励起光が含まれてい るためダイクロイックミラーによって分離している。

励起出力を 3W と固定し AOM の繰り返し周波数を 1kHz-100kH と変化させたときに得られたパルスエネルギ ーと平均出力、パルス幅とピーク光強度の関係をそれぞれ 図 8a,図 8b に示す。平均出力は 20 kHz 以上では約 260 mW で一定となり、20 kHz 以下では減少している。この減少 はTmの上準位寿命が~300 µs と比較的短いことから誘導 放出以外でのエネルギー消費が増加するためと考えられ る。繰り返し周波数を低下させていくと1 kHz まではパル スエネルギーは上昇し、1kHz の時に最大パルスエネルギ ー約 84 µJ、パルス幅 29 ns が得られた。最大ピーク光強度 は約 3 kW となり、これは高非線形光ファイバーを利用し た超広帯域光発生や試験的なレーザー加工実験に用いる のに十分な値と考えられる。現在このレーザーに回折格子 による波長制御機構を加え、狭線幅性と波長可変性を加え ることを行っている。



#### 5. モード同期 Tm 固体レーザー<sup>11,12)</sup>

ー般に非熱加工などを行う際にはサプ ps レベルのパル ス幅が望ましいが<sup>13</sup>、このレベルのパルス幅で μJ~mJ を超える高いパルスエネルギーを発生させるためには利 得媒質にファイバーではなく固体媒質を利用することが 必要となるが、得られる出力特製は使用する利得媒質に強 く依存する。

本研究では利得媒質に Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶を用いたモード 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 1/3 程度と短く蛍光断面積が大きいた め比較的にエネルギーを取り出し易い。②波長 2100~ 2170nm 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 9a)。この 波長域は水の吸収が少なく、さらに長波長中赤外 (~4-12µm)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。③Cr: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 合出力スケーリングに優れる可能性が高い。

また Tm 添加モード同期固体レーザーは励起光源とし て 800nm 帯の Ti<sup>3+</sup>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーが用いられてきたが、本 研究では新しく波長~1600 nm ファイバーレーザーによる in-band 励起システムを開発した(図 9b)。本励起システム の特徴を述べると、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 励起と比べると安定で高 い空間励起ビーム品質が得られ、カーレンズモード同期が



図 9 (a) Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 誘導放出断面積、(b) 800nm 励起と 1600nmin-band 励起の違い

Table 1. Comparison of laser gam media								
Material	λ(nm)	BW (nm)	<b>σ</b> 10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup>	τ ms	<b>στ</b> 10 <sup>-23</sup> s•cm <sup>2</sup>	Is kW/cm <sup>2</sup>	K W/m∙k	$n2 \\ 10^{-15} cm^2$
Tm:Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	~1960 ~2120	~60 ~50	~1 ~0.3	3.4	~3.4 ~1	~1.5 ~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
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

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

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>励起と比べても安価で高効率・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改良 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カ ーレンズモード同期レーザーによる超短パルス発生を目 指した。

図 10 に実験装置概略を示す。共振器は非点収差補正 Z 型共振器を用いており、励起光源には 1611 nm Er,Yb ファ イバーMOPA(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:Sc2O3 結晶をブリュースタ角で 用いた。凹面鏡は曲率 100 mm、高反射コート 1850-2300 nm を有している。エンドミラーは分散補償鏡とし分散補償を 行い、出力鏡(OC)は透過率 0.5%, 1%、2.5%@2000-2300 nm の 3 種類を使用した。



図 10 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 11 に透過率 0.5%出力鏡を用いたときの出力特性を 示す。0.9W 励起時に出力 130 mW,パルス幅 72 fs (図 12a)、 繰り返し周波数 95 MHz のパルス発振が得られた。スペク トル幅は約 67 nm(図 12b)、中心波長 2108 nm であり、カ ーレンズモード同期がかかった瞬間に 50 mW 程の出力増



図11 カーレンズモード同期Tm:Sc203レーザー出力特性



(a)自己相関波形、(b)発振スペクトル

加が見られた。発振スペクトルは 2120nm および 2150nm 中心の二つの利得帯全域(図 9a)にまで広がっている。

透過率 1%,及び 2.5%の出力鏡を用いて実験を行ったとき(この時は分散補償にはプリズム対を用いた)、前者では 最大出力 420 mW、パルス幅 116 fs、後者では最大出力 1 W、パルス幅 298 fs が得られた。前者においてはピーク光 強度は 40kW 近くに達しており、後者においては励起出力 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%という非常に高効率な動作に成功した。

本研究の結果を他グループの報告と比較すると(図 13)、 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。今後共振器の分散量や励起出力の最適化をによ り更なる短パルス化や高出力化が可能と考えられる。また これを種光として LD 励起型の増幅器によってサブ ps レ ベルのパルス幅を可能とする、高出力増幅システムを構築 することを現在目指している。



図 13 他のグループの報告との比較.赤丸が我々の 結果であり、<sup>~</sup>100fs 領域で高出力動作に成功 している.

### 6. 結び

我々は高効率・高出力動作が可能な波長 2µm 帯パルス レーザー光源の開発を行った。I. Tunable noise like pulse Tm fiber laser では、新しい波長可変方法により波長帯 2µm 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 48nm を実現した。II. All fiber noise like pulse Tm laser 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。 III. Q スイッチTm ファイバーレーザーでは、パルス幅 29ns, パルスエネルギー84 µJ を得ることに成功した。IV.モード 同期 Tm 固体レーザーではカーレンズモード同期に成功 し W レベルの平均出力の 300 fs パルスや、70fs 程度の超 短パルスレーザー発振に成功した。

今後の展望として現在までに開発したパルス幅 100fs~ 100nsの2µm帯レーザーと今後開発を進める増幅器を組み 合わせ、ポリマー材料の微細加工や、シリコンの3D加工 への応用を進めていきたい。

#### 謝 辞

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.また本研究の一部は科学研 究費補助金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

- I. Mingareev et.al., Optics & LaserTechnology, 44, 2095–2099 (2012)
- T. Ehrenreich et al., SPIE Photonics West 2010 7580, Session 16:Late-Breaking News January (2010)
- 3) N. Simakov, et. al, ECOC 2014, France Tu.3.4.1 (2014)
- 4) S. Vasilyev et. al, Opt. Express 24, 1616-1623 (2016)
- 5) Y. Mashiko, E. Fujita, and M. Tokurakawa, Optics Express 24, 26515-26520 (2016)
- 6) J. Li, et. al., Opt. Express 22, 5387-5399 (2014)
- 7) S. M. Kelly, Electron. Lett. 28 (8), 806 (1992),
- M. J. Lederer, et. al., J. Opt. Soc. Am. B 16, 895-904 (1999)
- 9) J. Li, et.al., Opt. Express 22, 7875-7882 (2014)
- 10) K. Smith et al., Opt. Lett. 15 (22), 1294 (1990)
- 11) M. Tokurakawa et. al., Opt. Lett. 42, 3185-3188 (2017).
- A. Suzuki, M. Tokurakawa, C. Kränkel, CLEO/Europe 2019 CA-6.3, Germany (2019)
- 藤田雅之,J. Plasma Fusion Res. Vol.81, Suppl. 195-201 (2005)