

# 波長 1610 nm Er:Yb 全ファイバーMOPA の開発と それを用いた in band 励起によるモード同期 Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザー

戸倉川研究室 藤田 慧祐

## 1. はじめに

波長 2 μm 帯で動作するレーザーには、加工、自由空間通信や医療、ガス検知、4-12 μm 波長変換用励起光源など様々な応用が期待されている。Tm 添加媒質は波長 2 μm 帯において広帯域な利得を有し、800 nm 帯の LD で直接励起が可能のため、高効率、高出力な波長 2 μm 帯超短パルスレーザー用の利得媒質として高い注目を集めている。特に Tm<sup>3+</sup>:Re<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Re=Sc, Lu or Y) は Tm:YAG などの一般結晶と比べて H<sub>2</sub>O の吸収が少ない長波長(>2 μm)において室温 4 準位レーザー動作が可能、誘導放出断面積が大きく、優れた熱機械特性を持つ、といった利点がある。Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>からは、出力 210 mW、パルス幅 215 fs が得られている [1]が、Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザー励起のため、出力、効率共に制限されていた。本研究では、Tm 利得媒質を波長~1.6 μm 帯において in band 励起できることに着目し、我々は波長 1610 nm Er:Yb All-fiber MOPA の開発を行い(線幅 25 MHz、偏波消光比 28 dB、出力 8 W)[2]、それを用いることで、in band 励起のカーレンズモード同期 Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーの開発を行った。

## 2. 原理

### 2.1 モード同期

通常のレーザー発振は多数の縦モードを持った状態で発振しており、それぞれの縦モード間の位相はランダムである。モード同期とは共振器内で各縦モードの電場の位相を揃え、位相の揃った部分では強め合いその他の部分では打ち消しあうことによってパルスを生成し発振させることである。これにより得られるパルスは超短パルスとも呼ばれており、モード同期によりピコ秒、フェムト秒 (< 10<sup>-12</sup>~10<sup>-15</sup> s) のパルス幅を持つパルスを得ることが可能となる。モード同期の具体的な方法は大きく分けて 2 種類がある。①何かしらの変調を加えて位相を揃える能動モード同期、②変調などを加えずに強い非線形性を有する光学素子などを共振器中に組み込むことにより、モード同期を自発的に起こす受動モード同期がある。本実験ではレーザー媒質自体が可飽和吸収体と

して作用することでモード同期を実現する、カーレンズモード同期と呼ばれる手法を用いた。

### 2.2 カーレンズモード同期

カーレンズモード同期(Kerr Lens Mode lock)とは非線形媒質中においてカーレンズ効果により起こる光の自己収束効果を利用してモード同期を実現する手法である。

媒質の屈折率は

$$n = n_0 + n_2 I$$

と表される。 $n_2$ は非線形屈折率であり、十分に強度の高い光がある媒質に入射した場合この非線形の項が無視できなくなり、屈折率 $n$ は光の強度 $I$ に比例して変化する。これを光カー効果という。高強度のガウシアンビームが媒質に入射するとこの光カー効果によって媒質の屈折率はレンズ状の分布になり、光は自己収束することになる。

KLM にはハードアパーチャーKLM(1)とソフトアパーチャーKLM(2)と呼ばれる 2 種類の方法がある。図 1 にそれぞれの概念図を示す。

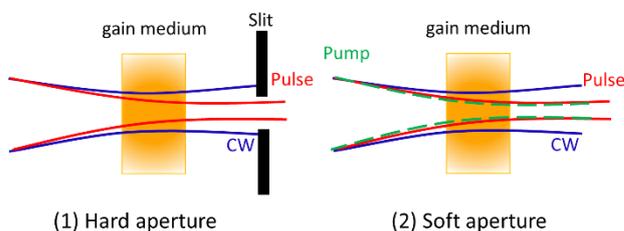


図 1 (1)ハードアパーチャー (2)ソフトアパーチャー

ハードアパーチャーKLM においては強度の高い光 (光パルス) とそれ以外 (CW) に異なる損失を与えるために共振器中にピンホールやスリットを挿入する。もう一つの方法であるソフトアパーチャーKLM ではピンホールは必要ない。利得媒質中の励起光のビーム径とレーザーのビーム径を一致させることによりそれが仮想的なピンホールとして作用するからである。

## 2.2 Tm 利得媒質

Tm 利得媒質は波長 2 μm 帯において広帯域な利得を有し、800 nm 帯の LD で直接励起が可能のため、高効率・高出力な波長 2 μm 帯超短パルスレーザー用の利得媒質として高い注目を集めている。Tm<sup>3+</sup>のエネルギー準位図を図 2 に示す。

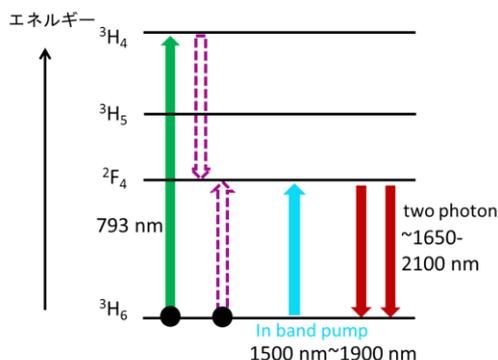


図 2 Tm<sup>3+</sup>のエネルギー準位図

Tm<sup>3+</sup>は 3H<sub>6</sub> を基底準位としており、そこから吸収によって 3H<sub>4</sub> や 2F<sub>4</sub> に励起され、基底状態へ放射緩和する。3H<sub>6</sub> から 3H<sub>4</sub> への励起は、波長 800 nm 帯の Ti<sup>3+</sup>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーや LD を用いることができる。3H<sub>4</sub> へ励起させ、2F<sub>4</sub> に緩和される際にそのエネルギーによって 3H<sub>6</sub> から 2F<sub>4</sub> に励起されることがある。つまり、1 つの光子で 2 つの光子を励起することができるので量子効率が 2 に迫る動作が可能となる。また 3H<sub>6</sub> から 2F<sub>4</sub> への励起には波長 1500-1900 nm のレーザーによる in-band 励起を行うことができる。そこで我々は世界で初めて、長波長動作の Er ファイバーレーザー(1611 nm)による Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の in-band 励起を提案し、実験を行った。これにより、量子欠損が小さい、高効率なレーザー動作を行うことができる。今回は次に示す理由により、in-band 励起を行った。

## 2.3 Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザー

固体レーザー媒質の特性を決定付ける要素の一つは媒質の母材である。本実験で用いた結晶の母材、Re<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Re=Sc, Lu or Y)は、セスキオキシド(三二酸化物)と呼ばれており [3]、YAG や KYW に比べて、優れた熱伝導率を有している。また、Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は Tm:YAG や Tm:KYW などより大きな誘導放出断面積を有している。図 3 に Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の波長 800 nm 帯(1)[4]と 1600 nm 帯(2)の吸収断面積を示す。

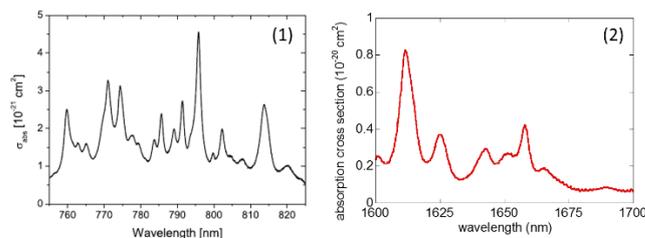


図 3 波長 800 nm 帯(1)[4]と 1600 nm 帯(2)における吸収断面積

800 nm における吸収断面積が  $0.42 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  に対して 1611 nm における吸収断面積は約 2 倍近い値  $0.82 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  となっていることと、今回開発した Er:Yb ファイバーレーザーは、Ti<sup>3+</sup>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーに比べてビーム品質、効率も高いことから、より高効率な励起を行うことができる。また、図 4 に Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の誘導放出断面積を示す [1]。

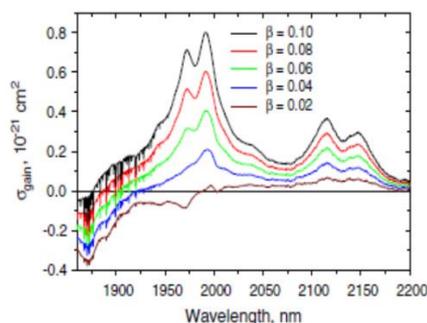


図 4 Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の誘導放出断面積 [1]

波長 ~1975 nm と ~2100 nm を中心波長として線幅 ~75 nm のピークを有している。このことから、水の吸収が存在する波長帯 (~1900 nm) に苦しむことなく、室温での 4 準位レーザー動作を得ることができる。次に今回、励起光源として用いた Er ファイバーレーザーについての説明を行う。

## 2.4 Er ファイバー

エルビウム(以下 Er)は希土類元素であり、これを光ファイバーのコアに添加したものが Er 添加ファイバーである。今回は開発した MOPA の増幅器 1 において使用した。図 5 に Er ファイバーの吸収断面積と誘導放出断面積を示す [5]。波長 1610 nm における誘導放出断面積は波長 1540 nm 付近に比べて、約 1/4~1/7 となっており(ガラスに依存)、1540 nm 帯の増幅自然放出光(ASE)を抑制した高出力動作が難しい。また、今回は狭線幅 (~25 MHz)、単一偏光 (~28 dB)、高出力 (~8 W) なレーザー動作を行うため、ファイバー長を短く

し、誘導ブリルアン散乱の抑制も行うため、主増幅器において Er:Yb 共添加ファイバーを使用した。

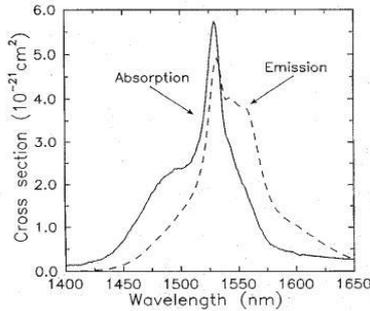


図5 Er 添加シリカガラスファイバーの吸収断面と放出断面積[5]

## 2.5 Er:Yb 共添加ファイバー

Er:Yb ファイバーのエネルギー準位図を図6に示す。Yb<sup>3+</sup>イオンが 910~980nm 帯の励起光により <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> に励起される。その後 Yb<sup>3+</sup>イオンと Er<sup>3+</sup>イオンの <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> と <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> の準位が近いことによりエネルギー遷移が起り Er<sup>3+</sup>イオンを <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> に励起し、Yb<sup>3+</sup>イオンは基底準位 <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> に遷移する。<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> に励起された Er<sup>3+</sup>イオンは <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> に非放射過程で緩和し <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 準位間に反転分布を形成しレーザー発振する。こうした Yb-Er のエネルギー遷移過程から高出力な波長 910~980 nm の LD によって励起することが可能である。しかし波長 1610 nm における誘導放出断面積が小さく Yb(1 μm 帯)や Er(1.5 μm 帯)の増幅自然放光(ASE)、寄生発振を防いだ増幅動作が必要となる。

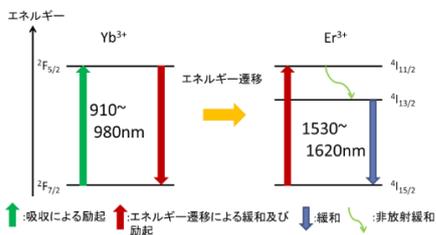


図6 Yb<sup>3+</sup>と Er<sup>3+</sup>のイオン間のエネルギー準位図

## 3. 波長 1610 nm Er:Yb 全ファイバーMOPA

### 3.1 実験方法

本研究で開発した Er:Yb all PM fiber MOPA の実験系を図7に示す。種光源として出力 40 mW、波長 1610 nm 単一偏光 DFB レーザーを使用した。これを波長 1480 nm LD を用い Er ファイバー(コア径 6.7 μm、NA≈0.22)の前方励起を行うこ

とで増幅した。次に波長 915 nm LD を用い、Er:Yb 共添加ダブルクラッドファイバー(コア径 6 μm、クラッド径 128 μm、長さ 15 m、NA≈0.2)の後方励起増幅を行った。最後に波長 915 nm LD を用い、Er:Yb 共添加ダブルクラッドファイバー(コア径 10 μm、クラッド径 128 μm、長さ 5 m、NA≈0.2)の後方励起増幅を行った。Er(1.5 μm)及び Yb(1 μm)の ASE、寄生発振を効果的に抑制するため、WDM2,3(1610 nm/1030 nm)、ASE filter、アイソレーターを増幅器の間に適宜使用した。

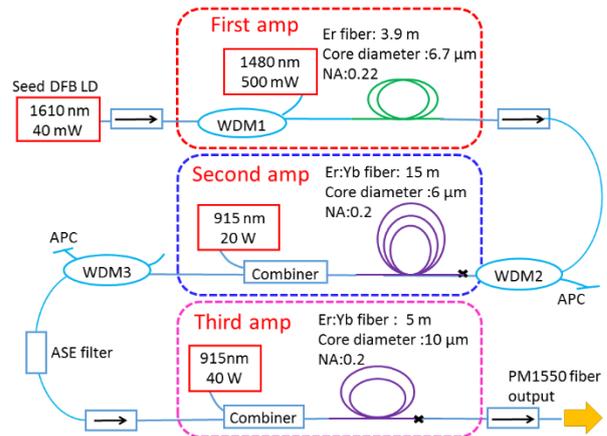


図7 Er:Yb 全ファイバーMOPA 概略図

### 3.2 実験結果と考察

まず増幅器1によって得られた WDM 後の出力特性とアイソレーター後のスペクトルを図8に示す。励起光出力 500 mW のとき種光は 227 mW まで増幅され、スロープ効率は 47%を示した。WDM とアイソレーターの損失があるため実際は約 300 mW まで増幅されている。主増幅を行うにあたってこの出力で充分と判断した。スペクトルから波長 1610 nm において増幅されているのが確認できた。波長 1480 nm において励起光が確認できるがこれは主増幅器で吸収されるため問題ないと判断した。

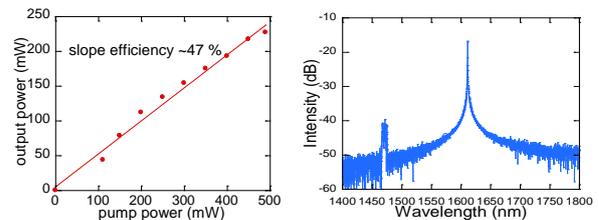


図8 前置増幅後の出力特性とスペクトル

次に増幅器 2 によって得られた出力特性とスペクトルを図 9 に示す。最大出力 3.8 W、スロープ効率 20% が得られた。スペクトルから ASE (Er:1.5  $\mu\text{m}$  帯) を強く抑制できていることが確認できた。スペクトルの面積を積分することによって ASE と増幅光の出力を求めたものを出力特性に示した ( $\blacktriangle$ : 増幅光、 $\blacksquare$ : Er による ASE)。最終的に増幅光 (1610 nm) は最大出力 3.7 W、ASE 成分は 0.1 W であった (@20 W 励起)。

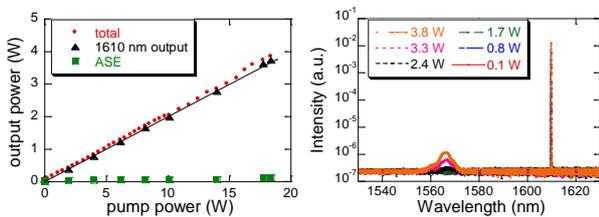


図 9 増幅器 2 後の出力特性とスペクトル

次に増幅器 3 によって得られた出力特性と偏波消光比、スペクトルを図 10、11 に示す。

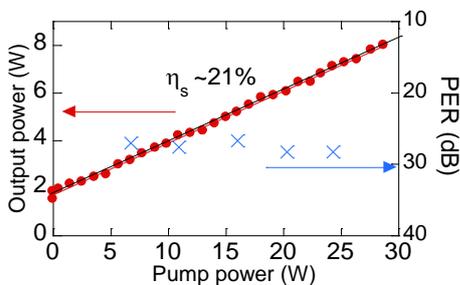


図 10 増幅器 3 後の出力特性と偏波消光比

最大出力 8 W (@28 W 励起)、スロープ効率 21%、偏波消光比 28 dB が得られた。偏波消光比に大きな変化が無いこと、PM ファイバーにより偏光が保たれた増幅が行われていることを確認できた。

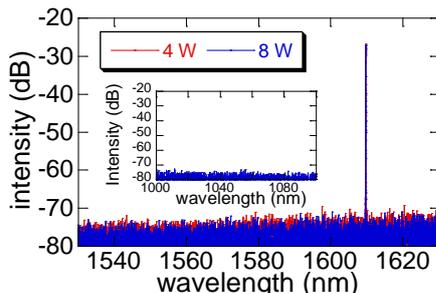


図 11 増幅器 3 後のスペクトル

スペクトルより、Yb (1  $\mu\text{m}$  帯)、Er (1.5  $\mu\text{m}$  帯) の ASE は測定に使用したスペアナ (AQ6370 YOKOGAWA) の感度以下に抑制した増幅を達成できたことを確認できた。増幅器 2 によって生じた ASE の種は ASE フィルターによって除去できたと考えられる。また開発した光源の線幅を自己遅延ヘテロダイン法によって測定した結果を図 12 に示した。

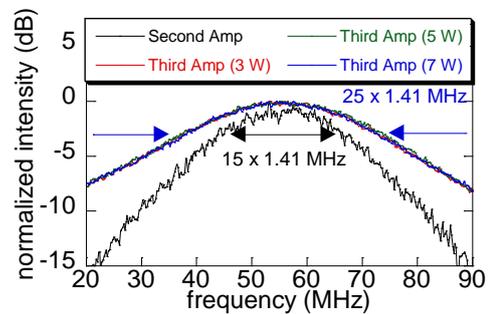


図 12 線幅の測定結果

増幅器 2 後、増幅器 3 後の線幅はそれぞれ約 15 MHz、25 MHz が得られた (種光の線幅は  $\geq 10$ )。増幅器 3 後の線幅が増幅器 2 後の線幅に比べて広がった理由については明らかになっていないが、3 段目の増幅中の線幅はほぼ一定のため、自己位相変調などの非線形効果ではないと考えられる。原因として考えられるのは、増幅器 3 中の励起 LD の電源によるノイズではないかと推測しているが、今後調べる必要がある。

## 4. カーレンズモード同期 $\text{Tm}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ レーザー

### 4.1 実験方法

$\text{Tm}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  結晶を媒質としたカーレンズモード同期実験の共振器構成を図 13 に示す。共振器は一般的な Z 型共振器を用いており、励起光源には上記で示した 1611 nm Er:Yb ファイバー MOPA (最大出力  $\sim 8$  W、単一偏光、狭線幅) [6] を用いた。利得媒質は長さ 3.7 mm、1% 添加の  $\text{Tm}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  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 nm-2200 nm を有している。エンドミラーは高反射コート 2050 nm 以上、低反射コート 1950 nm 以下を有しているものと、高反射コート 1850 nm 以上有しているものの 2 種類を使用した。2 種類の HR ミラーを用いた理由としては、 $\text{Tm}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$  が波長  $\sim 1975$  nm と  $\sim 2100$  nm を中心波長としてピークを有しているため片側のピークもしくは両ピーク

クを用いたパルス発振を行うためである。出力鏡は透過率 1% @ 2000-2300 nm を使用した。分散補償素子として IR 品質の溶解石英プリズムペア (距離 5 cm) を使い、約-2300 fs<sup>2</sup> の分散を与えた。更なる短パルス化のため、エンドミラー (HR > 2050 nm) を使用した際はプリズム間距離 4 cm (-2000 fs<sup>2</sup>) においても実験を行った。KLM は凹面鏡 M2 を前後に動かすことでかかった。

また使用している Tm<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶の利得帯域を調べるため、プリズムペアの片方を抜き、角度分散を用いることで HR ミラーのあおりを変え、CW 発振動作時に波長可変特性を測定した。

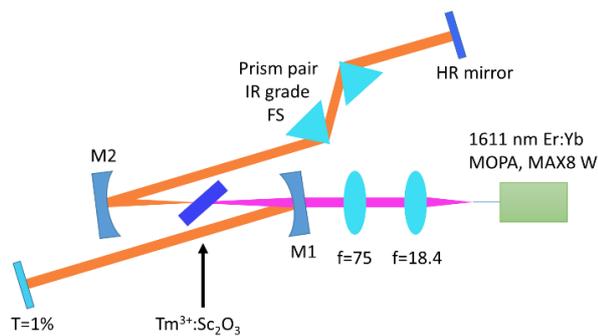


図 13 カーレンズモード同期実験の共振器構成

## 4.2 実験結果と考察

初めに、図 14 に CW 発振動作時の波長可変性を測定した結果を示す。

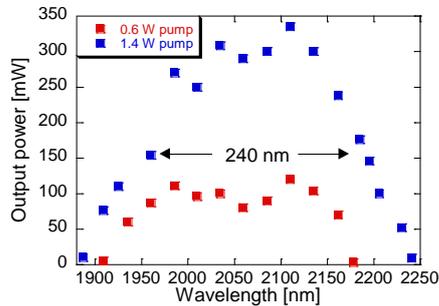


図 14 CW 発振動作時の波長可変性の測定結果

青色のプロット点が 1.4 W 励起時、赤色のプロット点が 0.6 W 励起時を示す。波長 2110 nm の時最大出力 335 mW が得られた。この結果から利得帯域は約 1950 nm-2190 nm (@1.4 W 励起) であることが分かった。概ね図 4 に示す誘導放出断面積に近い形が得られた。この両ピークを同時に使用することができれば < 50 fs のパルス発振を得るこ

とができる。

HR ミラー (> 1850 nm) を使用した際の出力特性と時間波形を図 15 に示す。

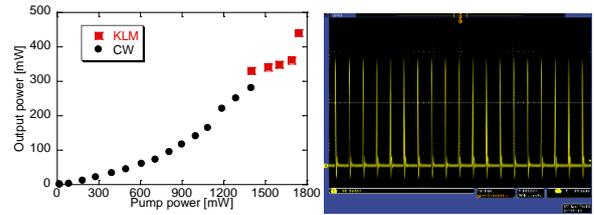


図 15 出力特性と時間波形 (20 ns/div)  
(HR ミラー > 1850 nm を使用)

1.4 W 励起の時にモード同期がかかった。かかった際に出力 50 mW 程度の上昇が確認できた。最大平均出力は 1.74 W 励起時に 440 mW であった。これ以上のパワーで励起した時、短波長側 (1970 nm 付近) において狭帯域な線幅成分が発生し、モード同期が外れてしまった。1.74 W 励起時に出力が 80 mW 近く飛んでいる原因は、狭帯域な線幅成分が発生しているからだと考えられる。その時のスペクトル(1)、自己相関波形(2)を図 16 に示す。

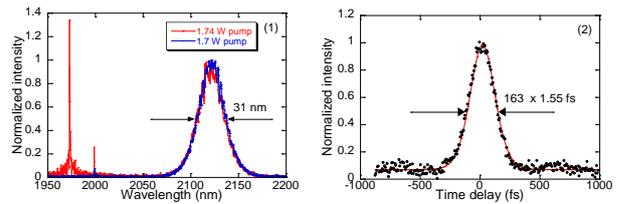


図 16 スペクトル(1)と自己相関波形(2)

スペクトルの半値全幅は 31 nm、中心波長は 2122 nm であった。パルス幅は 163 fs が得られ、時間帯域幅積は 0.33 であった。

次に 1970 nm 付近の狭帯域な線幅成分を抑制するため、HR ミラー (> 2050 nm) を使用した際の出力特性と時間波形を図 17 に示す。

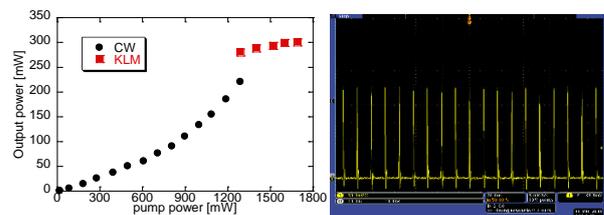


図 17 出力特性と時間波形 (20 ns/div)  
(プリズム間距離 5 cm)

1.3 W 励起の時にモード同期がかかった。かかった際に出力 60 mW 程度の上昇が確認できた。最大平均出力は 1.74 W 励起時に 300 mW が得られた。その時のスペクトル(1)、自己相関波形(2)を図 18 に示す。

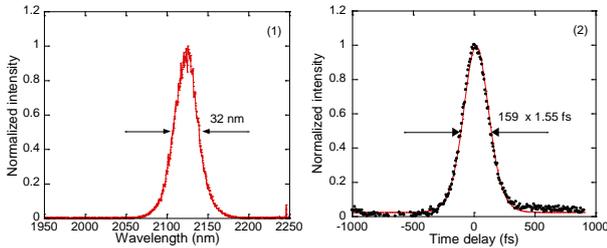


図 18 スペクトル(1)と自己相関波形(2)

スペクトルの半値全幅は 32 nm、中心波長 2125 nm であった。パルス幅は 159 fs が得られ、時間帯域幅積は 0.348 であった。

更なる短パルス化のため、プリズム間距離 4 cm にすることで共振器に与える分散量を ( $-2300 \text{ fs}^2 \Rightarrow -2000 \text{ fs}^2$ ) 減らし、実験を行った。得られた出力特性と時間波形を図 19 に示す。

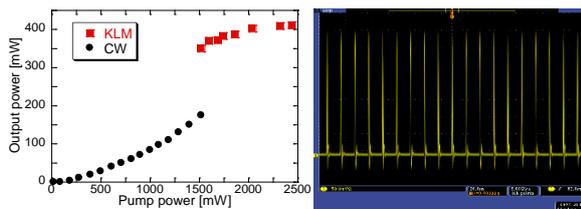


図 19 出力特性と時間波形(20 ns/div)  
(プリズム間距離 4 cm)

1.5 W 励起の時にモード同期がかかった。かかった際に出力 175 mW 程度の上昇が確認できた。これはカーレンズ効果による大きな利得変調の結果と考えられる。最大平均出力は 2.44 W 励起時に 411 mW が得られた。その時のスペクトル(1)、自己相関波形(2)を図 20 に示す。

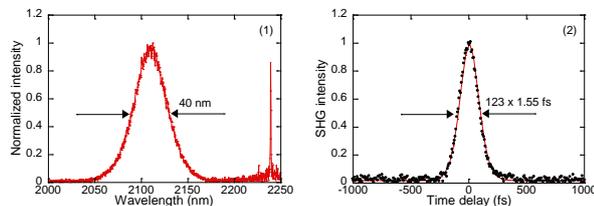


図 20 スペクトル(1)と自己相関波形(2)

スペクトルの半値全幅は 40 nm、中心波長は 2112 nm であった。パルス幅は 123 fs が得られ、時間帯域幅積は 0.33 であった。このときに波長 2240 nm 付近で狭帯域な線幅成分の発生を確認できるが、この波長帯は Tm の利得がほぼ無い領域であり、発生した原因については調査中である。

図 21 に RF スペクトルを示す。

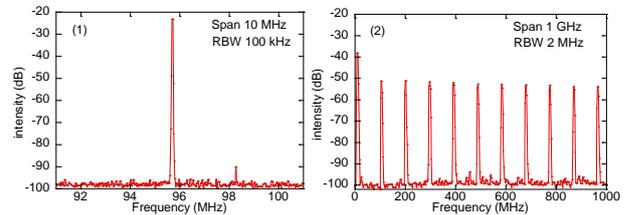


図 21 RF スペクトル(1) RBW100 kHz, (2) RBW2 MHz

(1)に示すのは基本波ビート成分(96 MHz)であり、SN 比 60 dB 以上が得られた。(2)より基本波ビート成分とその倍数のパルスのみを確認することができたので安定したシングルパルスモード同期が得られていることがわかる。

## 5 まとめ

本実験では波長 1610 nm、線幅 25 MHz、偏波消光比 28 dB、最大出力 8 W の安定な Er:Yb 全ファイバー-MOPA の開発に成功した。これを励起光源として用いることにより、HR ミラー ( $>2050 \text{ nm}$ ) を使用した際に、最短パルス幅 123 fs を得ることができた。このときの平均出力は 411 mW (@2.4 W 励起)、スペクトルの半値全幅は 40 nm、中心波長 2112 nm、繰り返し周波数 96 MHz、パルスエネルギー 4.3 nJ、ピーク出力 35.5 kW が得られた。

## 6 参考文献

- [1] A. A. Lagatsky, et al, Optics Letters **37** 437-439 (2012).
- [2] Eisuke Fujita, et al, Optics Express **24** 26255-26260 (2016).
- [3] K. Petermann, Lasers and Electro-Optics, 2007 and the International Quantum Electronics Conference. CLEOE-IQEC 2007. European Conference on (2007).
- [4] Philipp Koopmann, et al, Advanced Solid-State Photonics, (Optical Society of America, 2011), Paper# ATuA5, (2011).
- [5] Thirstrup, et al, Lightwave Technology, Journal of **14**.732-738. (1996)