

音響光学変調器を用いた Q スイッチ Tm ファイバーレーザーの開発

戸倉川研究室 原田有生

1. 序論

波長 2 μm 帯の光は、水の吸収が強く光が網膜まで達しにくいことから、この波長帯で動作するレーザーはアイセーフレーザーと呼ばれており、医療用レーザーメスやポリマー加工などに応用可能である。また、大気中の透過率が高い大気窓と呼ばれる波長帯域に含まれ、LIDAR や測距装置などの応用にも用いられている。このような応用には kW 以上のピーク強度、W レベル以上の平均出力を有したナノ秒短パルス光が望まれている。パルス光を得るための手法として Q スイッチ法があり、光共振器の Q 値を急激に変化させることによって、非常に高いパルスエネルギーを有する短パルス光を得ることが可能である[1]。本研究では超広帯域光発生やレーザー加工応用を目標に、音響光学変調器(AOM)を用いた 2 μm 帯の波長で動作するナノ秒単一偏光 Q スイッチ Tm ファイバーレーザーの開発を行った。

2. 原理

2.1 Tm 添加ファイバー

光ファイバーのコアに希土類元素であるツリウム (以下 Tm と表記) を添加したものが Tm 添加ファイバーである。Tm イオンのエネルギー準位図を図 1 に示す。

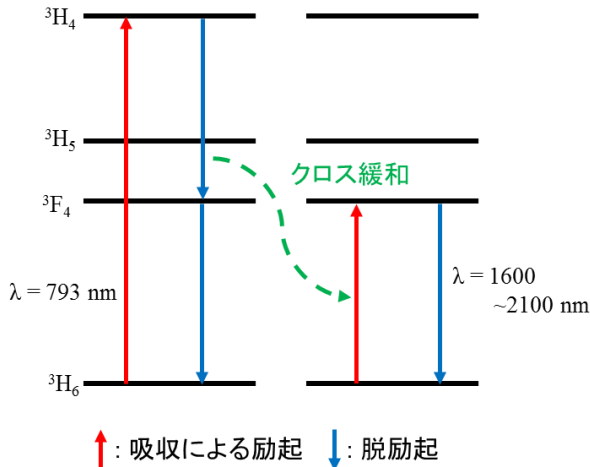


図 1. Tm イオンのエネルギー準位図

また、今回使用した Tm 添加シリカガラスファイバーの 3H_6 から 3H_4 の励起における吸収断面積を図 2 のようになっており、波長 790 nm 付近に吸収のピークを持つため、高出力なレーザーダイオードによる直接励起が可能となっている。基底準位にある電子を波長 793 nm の光で 3H_4 に励起し、 3H_4 から 3F_4 に脱励起する際に、隣接する Tm イオンに対してエネルギーの受け渡しが生じる。これをクロス緩和と言ひ、1 つの電子の励起で 2 つの光子が得られる量子効率が 2 に迫る動作が可能である。また、 3F_4 から 3H_6 に脱励起す

る際の Tm 添加シリカガラスファイバーの吸収誘導放出断面積を図 3 に示す。波長 1600~2100 nm の広い蛍光帯域を有しているため、広帯域なレーザー動作が可能である。

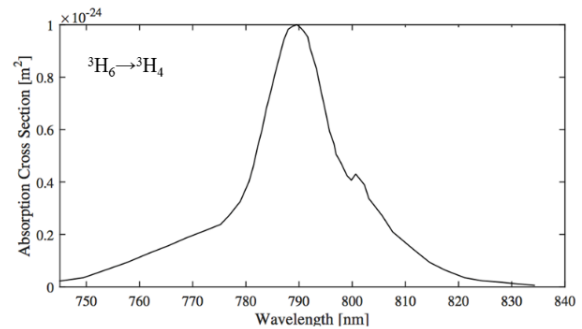


図 2. Tm 添加シリカガラスファイバーの吸収断面積[2]

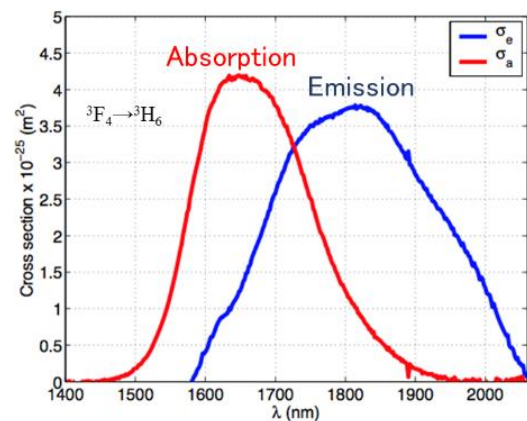


図 3. Tm 添加シリカガラスファイバーの吸収誘導放出断面積[3]

2.2 Q スイッチ法

光共振器の Q 値は次式で示される。

$$Q = \frac{\omega W}{P_L} \quad \dots(1)$$

ω は角周波数、 W は共振器内に蓄えられたエネルギー、 P_L は損失パワーである。式(1)において、共振器内の損失パワーを大きくすると Q 値が小さくなり、損失パワーを小さくすると Q 値が大きくなる。このように何らかの方法で Q 値を変化させることにより、高エネルギーな短パルス光(ジャイアントパルス)を取り出す手法を Q スイッチ法という。図 4 に Q スイッチ法による短パルス生過程を示す。

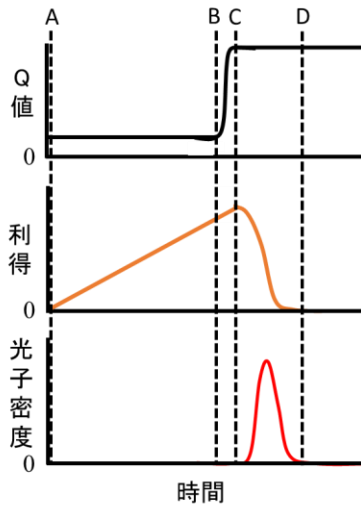


図 4. Q スイッチ法による短パルス発生過程[4]

ファブリー・ペロー共振器における Q スイッチ法を考える。初めに共振器内の損失を大きくして Q 値を低い値とし、非発振状態で高い利得、すなわち反転分布が大きい値が得られるようにする (AB 間)。利得の閾値の式は次式で示される[5]。

$$G_{th} = \frac{1 - R_1 R_2}{2l} + L_{eff} \quad \dots(2)$$

R_1 、 R_2 はミラーの反射率、 l は共振器長、 L_{eff} は損失に関わる定数である。式(2)より、損失が大きくなる、すなわち Q 値が小さくなると利得の閾値が大きくなる。次に反転分布が十分大きい状態から、急激に Q 値を高い値に変化させる (BC 間)。このとき、レーザー媒質の利得は閾値より十分に高い値になっているため、発振の急激な立ち上がりが生じ、高エネルギーな短パルス光が得られる。本研究では AOM により Q 値を変化させた。AOM については次節で説明する。

2.3 音響光学変調器

音響光学変調器 (Acousto-optic Modulator) とは、AOM 内に音響波 (疎密波) を発生させ、AOM に入射した光を回折させる光学素子である。図 5 に AOM の内部構造を示す。

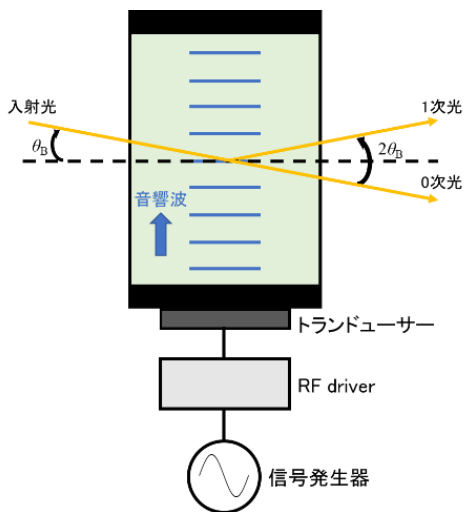


図 5. AOM の内部構造[5]

電気信号により RF 結晶中ドライバーを介してトランスデューサーが振動し AOM 内に音響波 (疎密波) を発生させる。音響波の密度分布により屈折率の変化が生じ、回折格子が構成されるため、AOM に入射した光が回折を受ける。すなわち、AOM が ON のときに光は損失を受けて回折し、OFF のときに光は透過する。本実験では 1 次光が AOM に戻るよう HR ミラーを設置し、AOM が ON の時に共振器が組まれることによって、Q スイッチ発振を得た。

3. 実験

3.1 CW 発振実験

3.1.1 実験方法

CW 発振の実験系を図 6 に示す。利得媒質として Nufern 社の長さ 2.2 m の Tm 添加 PM ダブルクラッドファイバー (コア径 10 μm 、クラッド径 130 μm 、NA=0.15) を使用し、PM 励起コンバイナーを通して波長 793 nm、最大出力 15 W のレーザーダイオードで後方励起した。使用した Tm ファイバーの波長 793 nm の吸収が 4.7dB/m であったため、励起光の吸収率は約 90% であった。 $f=7.5$ mm の AR コート付非球面レンズと高反射率 (HR) ミラーを用いて外部共振器を構成した。また、寄生発振抑制のため APC コネクタを融着し、Tm ファイバーの端面は垂直にクリーブした。Tm ファイバーからの出射光は、レンズでコリメートされた後、ダイクロミックミラー (DM) によって励起光は透過、2 μm 帯の光は反射され、この 2 μm 帯の光をパワーメーターとスペクトルアナライザーで測定した。

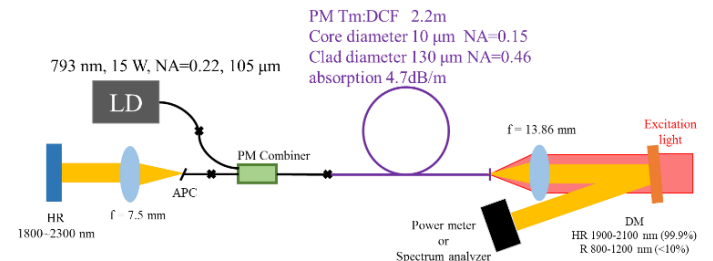


図 6. CW 発振の実験系

3.1.2 実験結果

得られた出力特性と 3.03 W 励起時のスペクトルを図 7、図 8 にそれぞれ示す。4.91 W 励起時に最大出力 1.38 W、スロープ効率 38% という結果が得られた。

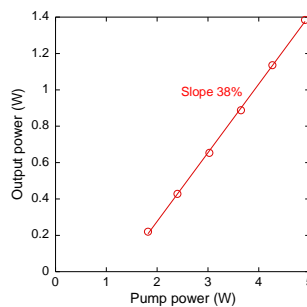


図 7. 出力特性

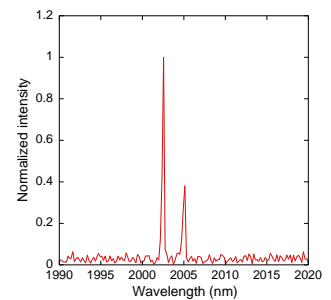


図 8. 3.03 W 励起時のスペクトル

3.2 Qスイッチ発振実験

3.2.1 実験方法

Qスイッチ発振の実験系を図9に示す。

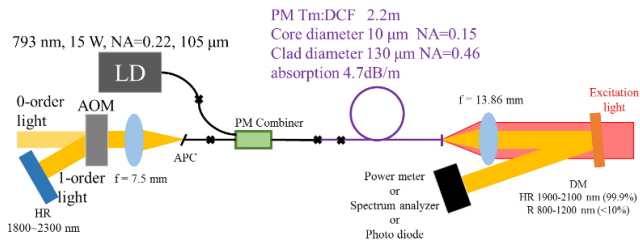


図9. Qスイッチ発振の実験系

Qスイッチ発振を得るために、 $f=7.5\text{ mm}$ のARコート付非球面レンズと高反射率(HR)ミラーの間に回折効率が最大になるようにAOM(G&H社)を挿入した。また、1次光がAOMに戻るようHRミラーを設置した。励起光強度は 3.03 W 、AOMには繰返し周波数 $20\sim 100\text{ kHz}$ 、 3 V 、パルス幅 700 ns のパルスを設定した。

3.2.2 実験結果

繰返し周波数 30 kHz 時に平均出力 298 mW 、パルス幅 136 ns のパルスが得られた。また、繰返し周波数 20 kHz 時にパルスエネルギー 14.7 μJ 、ピークパワー 112 W という結果が得られた。繰返し周波数に対する平均出力とパルス幅の変化を図10、図11にそれぞれ示す。

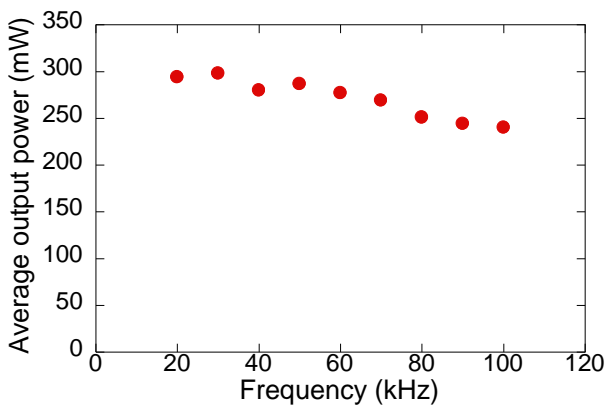


図10. 繰返し周波数に対する平均出力の変化

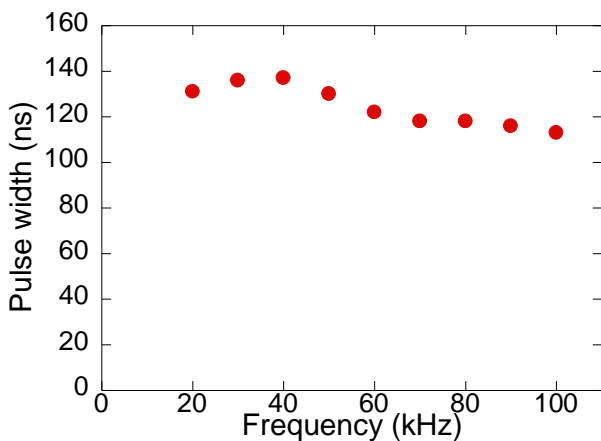


図11. 繰返し周波数に対するパルス幅の変化

これらのグラフから、繰返し周波数を低くすると平均出力とパルス幅が増加していることが確認できた。本来繰返し周波数を低くすると非放射緩和や増幅自然放光による損失が発生し平均出力の低下、また利得が高くなるためパルス幅が小さくなることが予想される。今回このような予想と相反する結果になってしまった原因については考察中である。また、繰返し周波数 30 kHz において測定したパルス波形とパルス列、スペクトルを図12、図13、図14にそれぞれ示す。

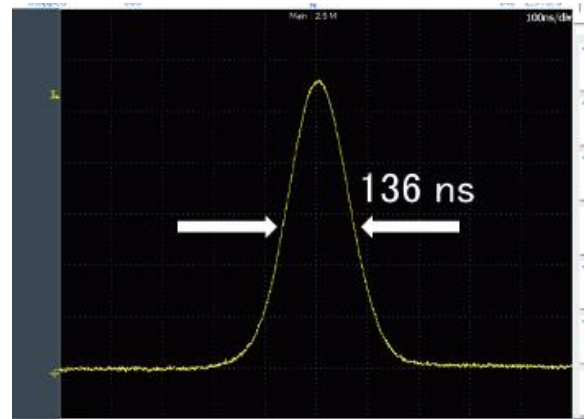


図12. 繰返し周波数 30 kHz におけるパルス波形 (100 ns/div)

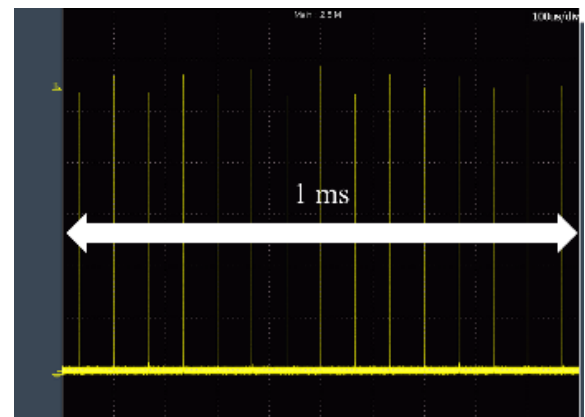


図13. 繰返し周波数 30 kHz におけるパルス波形 (100 μs/div)

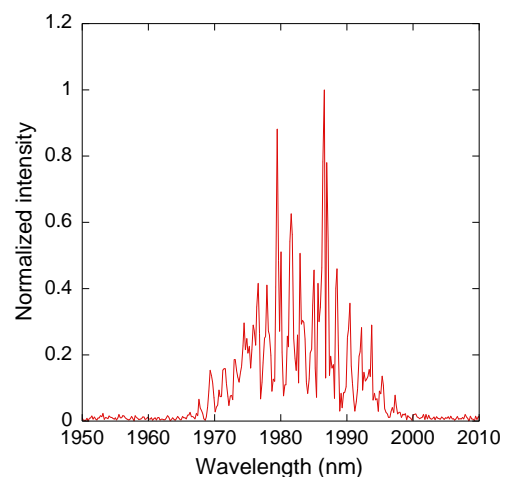


図14. 繰返し周波数 30 kHz におけるスペクトル

得られたパルス幅は 136 ns であり、得られたパルス間隔は繰り返し周波数に対応することが確認できた。また、構造を持ったスペクトルが得られた。次に繰り返し周波数周波数に対するパルスエネルギーとパルス幅の変化を図 14、図 15 にそれぞれ示す。

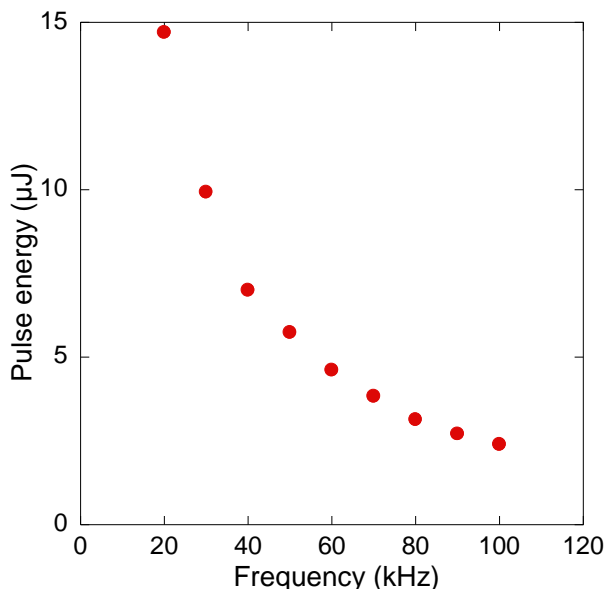


図 14. 繰り返し周波数に対するパルスエネルギーの変化

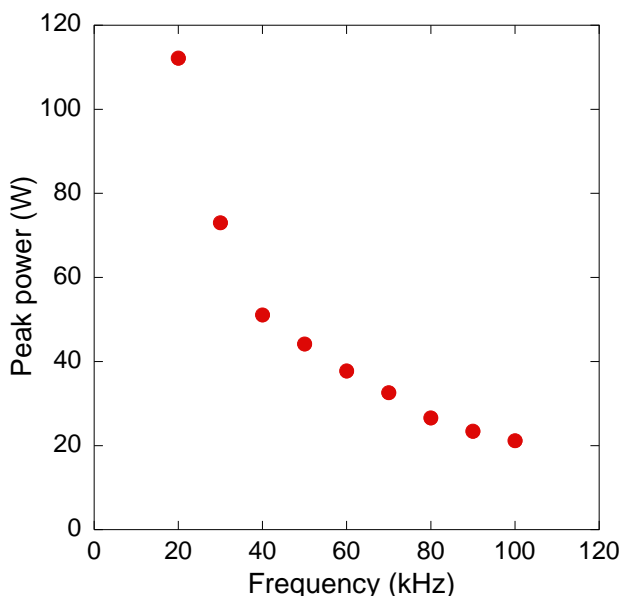


図 15. 繰り返し周波数に対するピークパワーの変化

これらのグラフから、繰り返し周波数を低くするとパルスエネルギーとピークパワーが増加することが確認できた。これはパルスエネルギーが増加したことにより、ピークパワーも増加したと考えられる。

4. 結論と今後の展望

今回、音響光学変調器を用いた Q スイッチ Tm ファイバーレーザーを開発した。現在得られている結果は、繰り返し周波数 30 kHz にて、平均出力 298 mW、パルス幅 136 ns、繰り返し周波数 20 kHz にてパルスエネルギー 14.7 μJ、ピークパワー 112

W であった。

今回の実験では素子の破壊を防ぐために繰り返し周波数を 20 kHz までにして測定を行った。今後は励起光強度の増大や共振器の短尺を行い、更なる高パルスエネルギー化、高ピーク強度化を目指す。また、今回使用した AOM は垂直方向に偏光依存性を有しており、APC コネクタから Tm ファイバーまで全て PM ファイバーで構成したことから、得られた光は単一偏光であると予想されるため、偏波消光比の測定を行う。さらに、HR ミラーをグレーティングに変えて波長可変特性の測定を行う予定である。

5. 参考文献

[1] C. Kneis, et al., *Optics Letters*, **41**, 2545-2548

(2016)

[2] Arlee V. Smith and Jesse J. Smith, *Optics Express*, **24**, 795-992(2016)

[3] Søren Dyøe Agger and Jørn Hedegaard Povlsen, *Optics Express*, **14**, 50-57(2006)

[4] 稲場文男 監修, “新版レーザー入門”, コロナ社

[5] 霜田光一 著, “レーザー物理入門”, 岩波書店

[6] <http://www.anfoworld.com/lasers.html>