

# 波長可変 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. はじめに

波長 2  $\mu\text{m}$  帯レーザーは様々な応用上好ましい特徴を有していることから現在注目を集めている。まず、波長 2  $\mu\text{m}$  帯で動作するレーザーは水の吸収が強いことから、医療用のレーザーメスや結石破碎・軟組織アブレーション用の光源として応用されている[1]。また、大気の透過率が高い大気の窓と呼ばれる波長帯域に含まれていることから、航空機用 LIDAR や測距装置、環境分析などの応用に用いられている[2,3]。さらに、波長 1  $\mu\text{m}$  帯や 1.5  $\mu\text{m}$  帯に比べ、波長 2  $\mu\text{m}$  帯の光はポリマー・プラスチック材料の吸収が強いため、それらの材料の加工応用に有用である[4]。このような応用には高エネルギーなナノ秒短パルス光が必要である。パルス光を得る手法の 1 つに Q スイッチ法という手法があり、光共振器内の 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パルス光を得ることが可能である。そこで本研究では、超広帯域光発生や加工応用のための光源として、音響光学変調器を用いた波長可変 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。

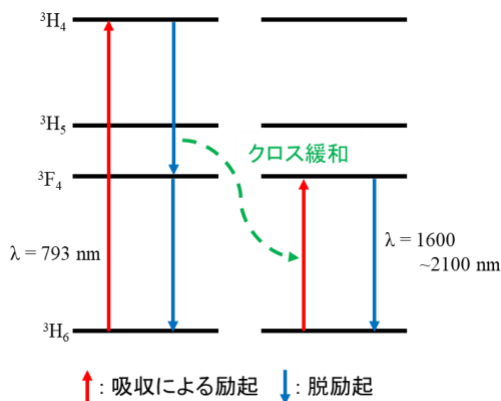


図 1. Tm<sub>3+</sub> のエネルギー準位図

また、今回使用した Tm 添加シリカガラスファイバーの  $3\text{H}_6$  から  $3\text{H}_4$  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  $3\text{H}_4$  に励起し、 $3\text{H}_4$  から  $3\text{F}_4$  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、 $3\text{F}_4$  から  $3\text{H}_6$  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。

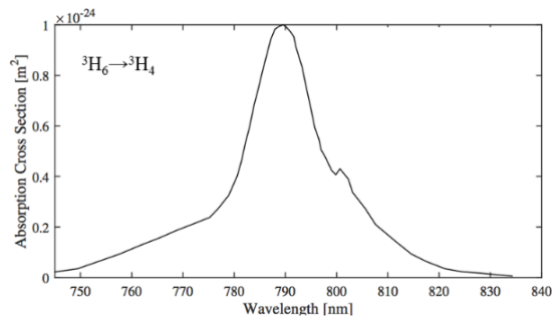


図 2. Tm 添加シリカガラスファイバーの吸収断面積[5]

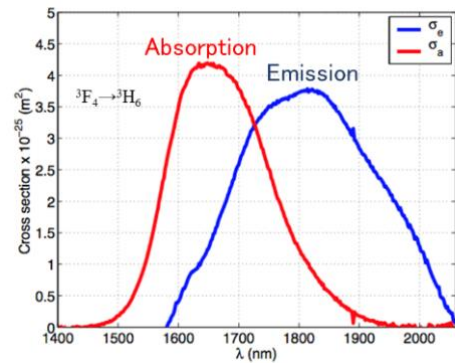


図 3. Tm 添加シリカガラスファイバーの吸収誘導放出断面積[6]

### 2.2 ダブルクラッドファイバー

ダブルクラッドファイバーはクラッドが 2 層構造で構成され、それぞれ内部クラッド、外部クラッドと呼ばれる。図 4 に DCF の断面図と屈折率分布を示す。

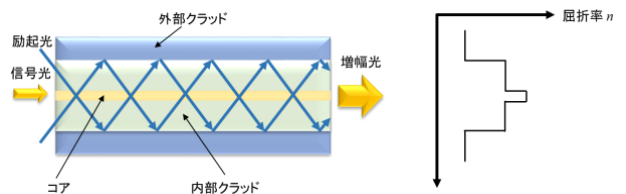


図 4. ダブルクラッドファイバーの断面図と屈折率分布

内部クラッドはコアを伝搬する信号光を閉じ込めるクラッドの役割と励起光のマルチモード導波路の役割を担っている。外部クラッドは低屈折率の樹脂で作られており、励起光閉じ込めの機能を持つ。内部と外部クラッドの屈折率差が大きいこと NA は高い値を示し、かつ断面積が大きいことから、クラッド励起では高出力なマルチモード LD での効率的な励起が可能である。ダブルクラッドファイバーのコアに利得媒質が添加されている場合、励起光がコア内の利得媒質を励起し信号光を増幅させ、低 NA かつ断面積の小さなコア内を伝搬する。コアの NA が小さいためマルチモードの抑制ができ、光ビーム品質な増幅光を得ることが可能である。このように、ダブルクラッドファイバーでは LD からの励起光を高効率で高ビーム品質な光に変換することができる。

### 2.3 Q スイッチ法

Q スイッチとは、光共振器内の損失によって定義される Q 値を急激に変化させることによって、高エネルギーな短パルス光を得る手法である[7]。図 5 に Q スイッチ法による短パルス発生過程を示す。まず初めに共振器内損失を大きくすることで、共振器の Q 値を小さい値にし、非発振状態で高い利得、すなわち反転分布の大きい値が得られるようにする(AB 間)。反転分布が十分に状態から、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も十分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(CD 間)。本研究では音響光学変調器 (AOM) により共振器内の Q 値を変化させた。

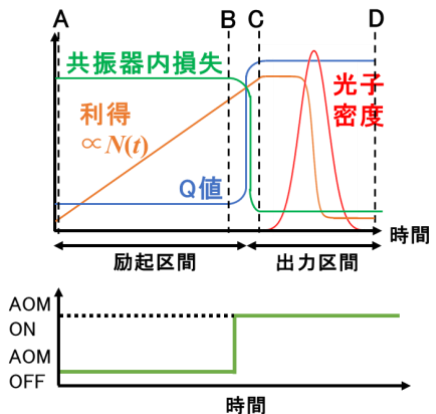


図 5. Q スイッチ法による短パルス発生過程

### 2.4 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 6 に AOM の内部構造を示す。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。

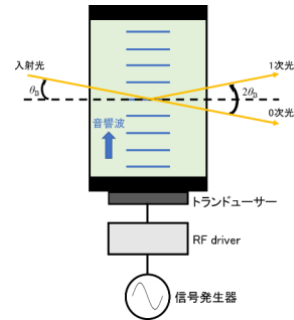


図 6. AOM の内部構造[8]

## 3. 実験

### 3.1 CW 発振実験

Q スイッチ発振実験に先立ち、使用した Tm 添加ファイバーの特性を知るため、Tm ファイバーレーザーの連続発振 (CW) 実験を行った。実験系を図 7 に示す。利得媒質として長さ 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 4 W のレーザーダイオードを用いて後方励起した。f=5.95 mm の AR コート付き非球面レンズと高反射率 (HR) ミラー、または回折格子 (600 本/mm) を用いて外部共振器を構成した。また、AOM 側の端面には規制発振抑制のため APC コネクタを融着し、Tm ファイバー側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非球面レンズでコリメートされた後、ダイクロイックミラー (DM) によって、励起光を取り除いた。

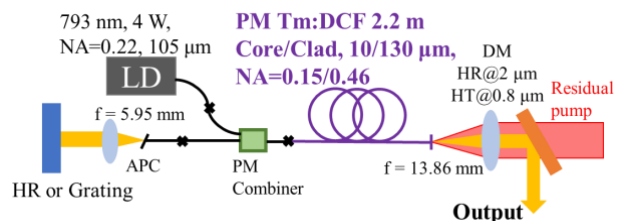


図 7. CW 発振の実験系

### 3.2 実験結果と考察 (HR ミラーを用いた場合)

得られた出力特性とスペクトルを図 8 に示す。スロープ効率は 33.9% であり、1990-2000 nm の波長帯での発振を確認した。

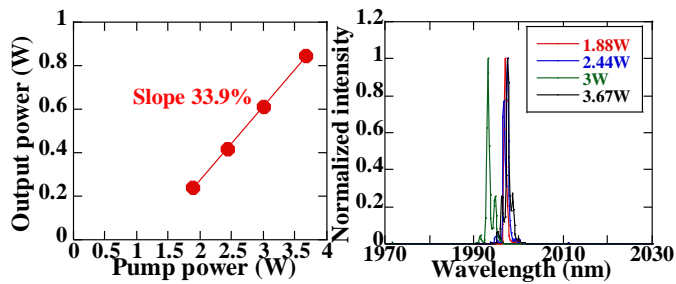


図 8. (左)出力特性、(右)スペクトル

### 3.3 実験結果と考察 (回折格子を用いた場合)

得られた出力特性を図 9, 10, 11 に示す。PM ファイバーの高速軸と回折格子の溝方向が平行の場合のスロープ効率は 14.2%、波長可変幅は 116 nm、垂直の

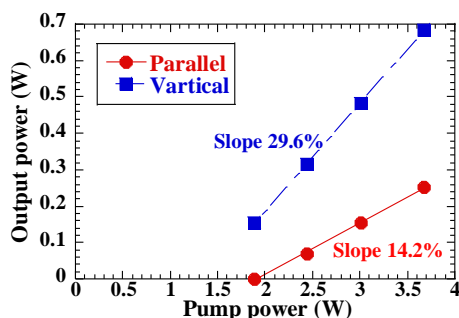


図 9. 出力特性 (PM ファイバーの高速軸と回折格子の溝方向が平行と垂直の場合)

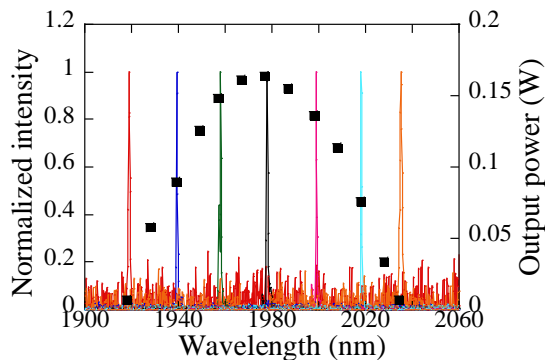


図 10. スペクトルと出力 (PM ファイバーの高速軸と回折格子の溝方向が平行の場合)

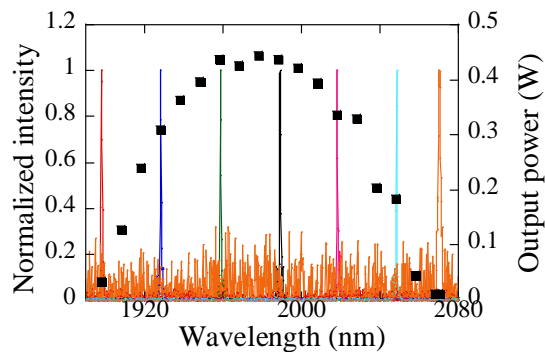


図 11. スペクトルと出力 (PM ファイバーの高速軸と回折格子の溝方向が垂直の場合)

場合のスロープ効率は 29.6%、波長可変幅は 172 nm であった。PM ファイバーの高速軸と回折格子の溝方向が平行の場合に比べて垂直の場合のほうがスロープ効率高く、波長可変幅が広がった原因については、共振器がすべて PM ファイバーで構成されており、PM ファイバーまたは PM コンバイナーが何らかの理由で偏光依存の損失を有しており、高速軸と回折格子の溝方向がそろった場合に効率的なレーザー発振が可能になったと考えられる。

### 3.4 Q スイッチ発振実験

図 12 のように実験系を構成し、Q スイッチ発振実験を行った。Q スイッチ発振を得るために AOM (回折効率 95%) を  $f=5.95$  mm のレンズと HR ミラーまたは回折格子の間に挿入した。その 1 次光を HR ミラーによって AOM に戻し、AOM が ON のときに共振器が組まれる構成とした。0 次光を用いるよりも大きな損失変調を得ることが可能であり、より短いパルスと高いエネルギーが得られやすい。また、AOM の周波数シフトにより、縦モードフリーな出力を可能とする。また、AOM は RF ドライバーを通してファンクションジェネレーター (FG) に接続されており、FG からの信号によって、AOM 内に音響波を発生させた。本実験では、パルス電圧 3 V、ゲート時間 700 ns のパルス信号を印加し、繰り返し周波数を 1-100 kHz に変化させた。

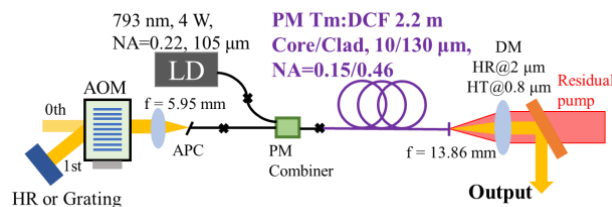


図 12. Q スイッチ発振の実験系

### 3.5 実験結果と考察 (HR ミラーを用いた場合)

3.67 W 励起において、繰り返し周波数を 1-100 kHz に変化させたときに得られた平均出力とパルスエネルギー、パルス幅とピークパワーを図 13、図 14

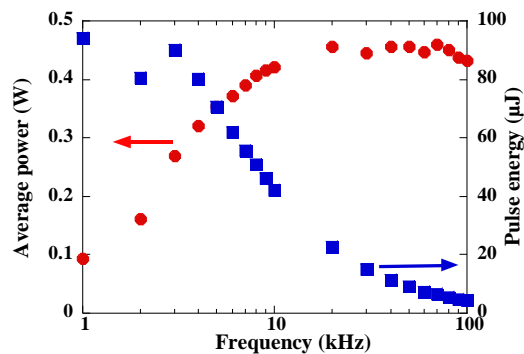


図 13. 平均出力とパルスエネルギーの周波数依存性 (HR ミラーを用いた場合)

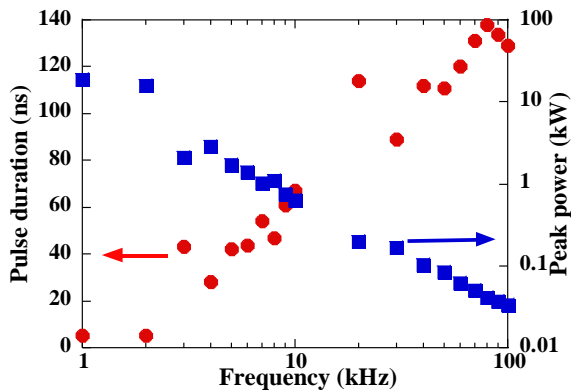


図 14. パルス幅とピークパワーの周波数依存性 (HR ミラーを用いた場合)

にそれぞれ示す。繰り返し周波数 70 kHz 時に、最大平均出力 459 mW、パルス幅 131 ns が得られた。また、繰り返し周期 2kHz 以下から急激な短パルス化が起り、繰り返し周波数 1 kHz 時に、最大パルスエネルギー 95  $\mu$ J、最大ピークパワー 18.8 kW、パルス幅 5.0 ns という高エネルギーな短パルス光が得られた。最大平均出力時 (繰り返し周波数 70 kHz) におけるパルス波形とスペクトルを図 15(a), (b) にそれぞれ示す。この時得られたスペクトル幅は 19 nm であり、比較的広い線幅が得られた。これは、AOM を用いて共振器を構成しており、縦モードフリーな発振となっているため、スペクトル幅が広がっていると考えられる。

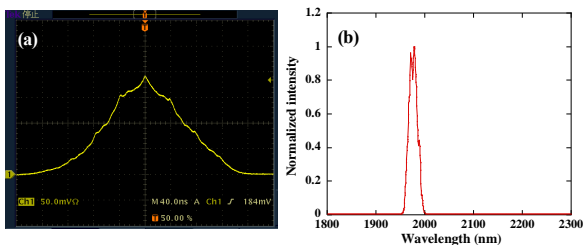


図 15. 70 kHz 時の(a)パルス波形と(b)スペクトル

また、繰り返し周波数 1 kHz におけるパルス波形とスペクトルを図 16(a), (b) にそれぞれ示す。この時得られたパルスはシングルパルスであることが確認できた。また、スペクトルが 300 nm ほど広帯域化する現象がみられた。

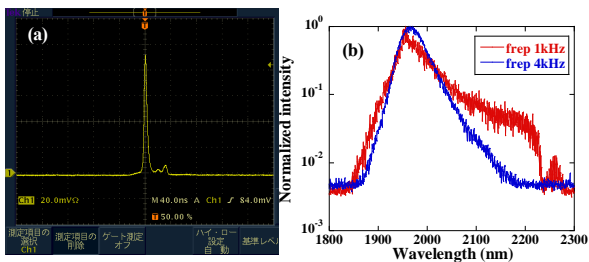


図 16. 1 kHz 時の(a)パルス波形と(b)スペクトル

ここで、今回繰り返し周波数を低くしていくとパルス幅が小さくなることが確認できたので、この原因について考察する。Q スイッチレーザーのパルス幅  $\Delta t$  は次式で示される[7]。

$$\Delta t \approx \frac{r\eta(r)}{[r - 1 - \ln(r)]} \tau_c$$

$r$  は閾値に対して規格化された励起パワー、 $\eta(r)$  はエネルギー取り出し効率、 $\tau_c$  は共振器寿命 ( $\propto L_{\text{cavity}}$ ) である。この式から、短パルスを得るためには共振器長を短くするか  $r$  を大きくすることが有用であることがわかる。すなわち、利得の蓄えを大きくする (繰り返し周波数を小さくする) ことでもパルス幅を短くすることができる。また  $r$  の極限を考えると限界のパルス幅は  $\eta(r) \tau_c$  となる。図 17 にパルス幅の励起パワーと周波数依存性を示す。

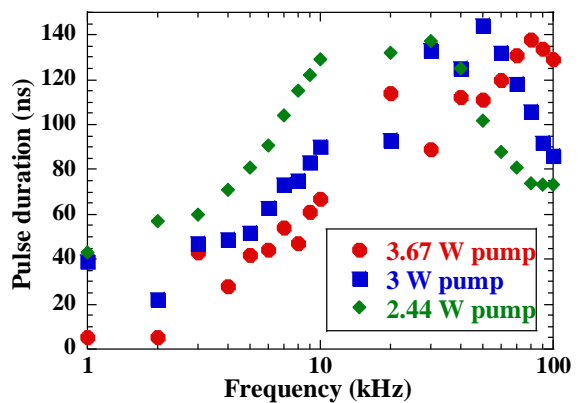


図 17. パルス幅の周波数依存性

繰り返し周波数 3-10 kHz において、励起光が強い時、繰り返しが低い時、のほうがパルス幅は小さくなっていることが分かった。これは上式のとおりである。繰り返し周波数 20 kHz 以上においては、励起光が弱い場合でもパルス幅が小さくなっていることが確認できる。これは、繰り返し周波数が大きいと 1 パルスあたりの利得が小さく、パルスが立下る途中で AOM のシャッターによりパルスの裾が切られてしまうことから、パルス幅が短くなっていると考えられる。励起出力が高くなるほど、こう繰り返してパルス幅が長くなっていることからこの推測は正しいと考えられる。また、注目すべき点として 3.67 W 励起時において、繰り返し周波数 2 kHz 以下では急激にパルス幅が短くなり、図 16(b) のスペクトルのようにスペクトルの広帯域化がみられた。これについては式によらない、非線形光学効果が発生していると考えなければならない。例えば先行研究にて変調素子無しのパルス幅 2 ns の Yb セルフ Q スイッチレーザーが報告されており、同様に広帯域なスペクトルが確認されている[9]。これは、後方ブリ

ルアン散乱による非線形フィードバックが発生し短パルス化がおり、パルス幅が小さくなるとピーク光強度が大きくなるので、それによって誘導ラマン散乱が起り、スペクトルが広帯域化したと考えられる。今回のレーザーは波長  $2\ \mu\text{m}$  帯でありガラスの分散が Yb レーザーとは符号が異なっている。そのため soliton fission のような効果も合わせて発生しよりスムーズなスペクトルの拡大が発生していると考えられる。

### 3.3 実験結果と考察 (回折格子を用いた場合)

次に HR ミラーを回折格子に置き換えて Q スイッチ発振実験を行った。実験の結果、 $3.67\text{W}$  励起において、繰り返し周波数を  $1\text{--}100\ \text{kHz}$  に変化させたときに得られた平均出力とパルスエネルギー、パルス幅とピークパワーを図 18、図 19 にそれぞれ示す。

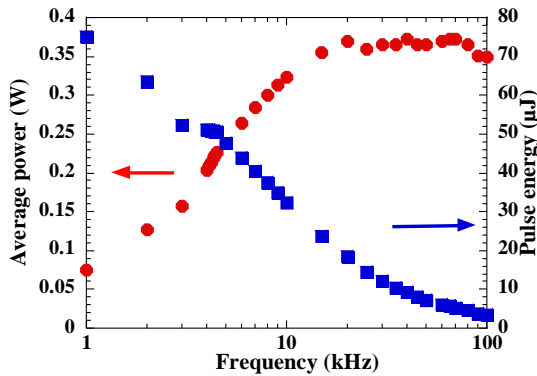


図 18. 平均出力とパルスエネルギーの周波数依存性 (回折格子を用いた場合)

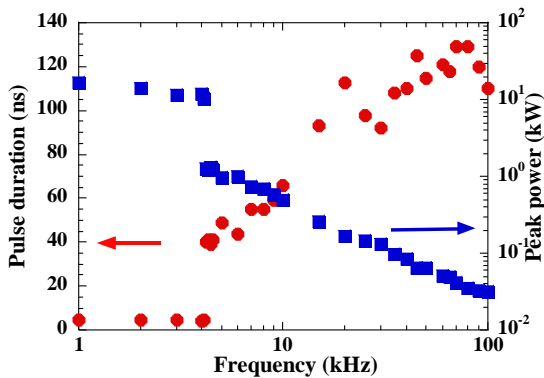


図 19. パルス幅とピークパワーの周波数依存性 (回折格子を用いた場合)

繰り返し周波数  $20\text{kHz}$  から  $80\text{kHz}$  において、平均出力  $360\text{mW}$  以上が得られた。また、繰り返し周波数  $1\ \text{kHz}$  時にて、最大パルスエネルギー  $75\ \mu\text{J}$ 、最大ピークパワー  $1.67\ \text{kW}$ 、パルス幅  $4.5\ \text{ns}$  の短パルス光が得られた。最短パルス時 (繰り返し周波数  $1\ \text{kHz}$ ) におけるパルス波形とスペクトルを図 20 に示す。この時得られたパルスはシングルパルスであることが確認できた。また、スペクトルが  $300\ \text{nm}$  ほど広帯域化する

現象がみられた。

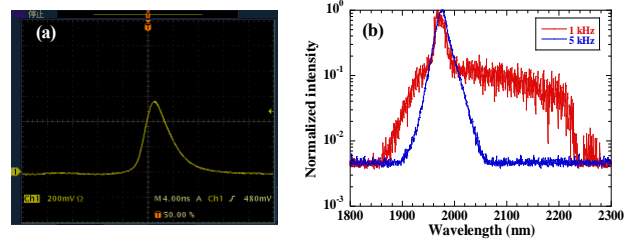


図 20.  $1\ \text{kHz}$  時の (a) パルス波形と (b) スペクトル

$3\ \text{W}$  励起にて回折格子を用いた波長可変実験を行った結果、図 21 に示す波長に対する平均出力とパルス幅の変化が得られた。利得が大きくなると平均出力が増加し、パルス幅も短くなることが確認できた。また、図 22 に示すスペクトルが得られた。繰り返し周波数  $4\ \text{kHz}$  時に最大波長可変幅  $126\ \text{nm}$  が得られた。

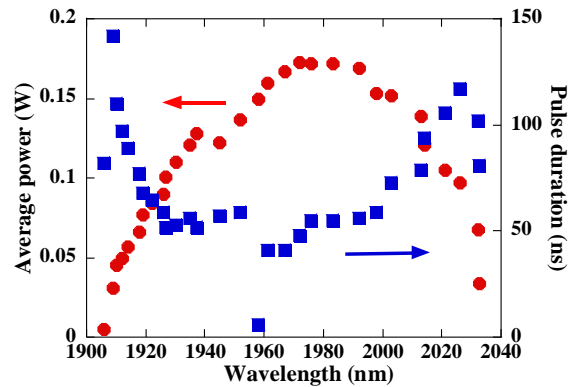


図 21. 平均出力とパルス幅の波長依存性 @  $4\ \text{kHz}$

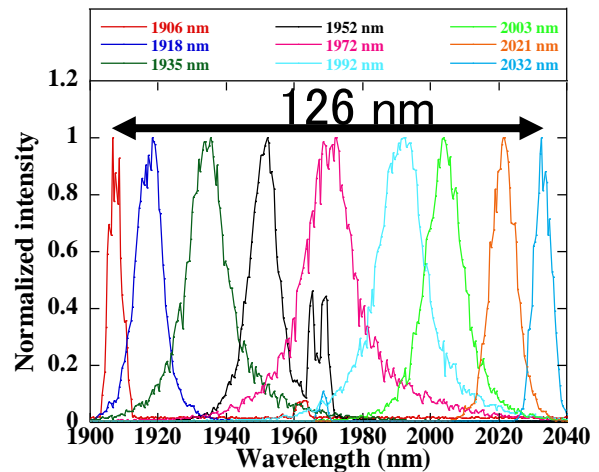


図 22.  $4\ \text{kHz}$  時の波長可変スペクトル

## 4. まとめと今後の展望

本研究では、音響光学変調器を用いた波長可変 Q スイッチ Tm ファイバーレーザーの開発を行った。HR ミラーを用いた Q スイッチ発振によって、 $3.67\text{W}$  励起での測定により、繰り返し周波数  $70\ \text{kHz}$  にて最大

平均出力 459 mW が得られ、パルス幅は 131ns であった。また、繰り返し周波数 1 kHz にて最大パルスエネルギー94  $\mu$ J、最大ピークパワー18.8 kW が得られ、その時のパルス幅は 5ns と高エネルギーな短パルスが得られた。さらに繰り返し周波数を低下させていくとパルス幅が急激に短くなり、スペクトルが 300nm ほど広帯域化する現象がみられた。この原因については、後方ブリルアン散乱による非線形フィードバックが発生し短パルス化がおり、パルス幅が小さくなるとピーク光強度が大きくなるので、それによって誘導ラマン散乱が起り、スペクトルが広帯域化したと考えられる。また、回折格子を用いた Q スイッチ発振によって、3.67W 励起時に繰り返し周波数 20kHz から 80kHz において、平均出力 360mW 以上が得られた。また、繰り返し周波数 1 kHz にてパルスエネルギー75  $\mu$ J、ピークパワー16.7 kW、最短パルス幅 4.5 ns が得られた。HR ミラーを用いた場合と同様に、繰り返し周波数を低下させていくとパルス幅が急激に短くなり、スペクトルが 300nm ほど広帯域化する現象がみられた。さらに 3W 励起での波長可変 Q スイッチ発振において、繰り返し周波数 4kHz 時に最大波長可変幅 126nm が得られた。今後の展望につい

ては、今回確認した短パルス化の原因を究明する。また、高出力な LD を用いることでさらなる高出力化、高エネルギー化を目指す。さらに、今回開発した光源を用いて加工応用に用いる予定である。

## 参考文献

- [1] Debases Pal, et al., IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, **25**, No.1, 7100808, 2019
- [2] Kohei Mizutani, et al., Optics Letters, **43**, No.2, 202-205(2018).
- [3] Albert Schliesser, et al., Nature Photonics, **28**, 142, 2012
- [4] Ilya Minagareev, et al., Optics & Laser Technology, **44**, 2095-2099(2012).
- [5] Arlee V. Smith and Jesse J. Smith, Optics Express, **24**, 795-992(2016)
- [6] Søren Dyøe Agger and Jørn Hedegaard Povlsen, Optics Express, **14**, 50-57(2006)
- [7] M. Eichhorn, et al, Optics Letters, **32**, 2780-2782(2007)
- [8] <http://www.anfoworld.com/lasers.html>
- [9] S. V. Chernikov, et al., Optics Letters, **22**, 298-300(1997).