

光周波数コムに向けたモード同期 Tm ファイバーレーザーの開発

戸倉川研究室 平山 貴之

1. はじめに

波長 2 μm 帯レーザーは、分子の吸収線を利用した様々な応用から期待を集め、特に分光応用において CO_2 や NH_3 などの気体分子の吸収が強いことから環境計測用の新たな光源として注目を集めている[1]。

光周波数コムは分光応用において、高感度、高速測定が可能といった利点[2]から、高精度分光用光源として非常に有用である。現在波長 2 μm 帯で動作する光周波数コムの多くは波長 1.5 μm Er ファイバーレーザーによる光周波数コムの出力を非線形波長変換することによって実装されている。この機構により、レーザー装置全体の効率や SN 比の低下が考えられる。そのため波長 2 μm 帯の光周波数コムを Tm ファイバーレーザーにより直接発生させることで装置全体の効率の上昇やシステム全体が簡易化などの利点が見込まれる。

本論文では、波長 2 μm 帯で動作する光周波数コムの開発を目的とした、モード同期 Tm ファイバーレーザーの開発について報告を行っている。

2. 原理

2.1 Tm レーザー

Tm レーザーは波長 2 μm で動作するレーザーの一つであり、図 1 に Tm ファイバーの特性を示す。

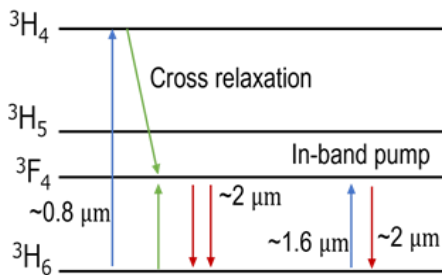


図 1 Tm³⁺のエネルギー準位図

図 1 より Tm³⁺イオンは~800 nm と~1600 nm の 2 波長で励起が可能であり、~800 nm レーザー光による励起ではクロス緩和と呼ばれる相互作用によって 1 つの光子の吸収によって 2 つのイオンが励起されるため、量子効率が 2 に迫るような動作が可能である。一方、~1600 nm レーザー光による直接励起は In-band 励起と呼ばれている。In-band 励起のメリットとして、熱負荷の低減や高い励起光吸収率といった点が挙げられる。

また、Tm ファイバーは図 2 に示すような誘導放出断面積を有しており、比較的広い蛍光スペクトルから超

短パルス発生に適している。誘導放出断面積の短波長側が吸収断面積の長波長側と重なっている。すなわち、Tm ファイバーレーザーによる短波長側のレーザー動作においては再吸収による損失が存在することがわかる。この再吸収は利得媒質である Tm ファイバーの Tm³⁺イオンが多いほど顕著に現れるため、イオン濃度が高いときや利得ファイバーが長いときにはより損失が大きくなる。

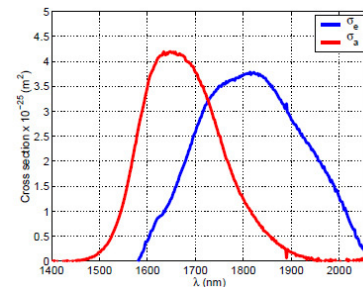


図 2 Tm 添加ファイバーの吸収、誘導放出断面積[3]

2.2 モード同期

モード同期法は fs~ps の短パルスを得るための手法であり、共振器内の縦モードの位相を揃えることで短パルスを得る手法である。モード同期パルスについてハイゼンベルクの不確定性原理によって式(1)の関係がある。

$$\Delta\nu \cdot \Delta\tau \geq K \quad (1)$$

定数 K はパルスの状態によって決まる値であり、sech²型では 0.315、Gauss 型では 0.441 をとる。また、式(1)からわかるようにモード同期パルスの周波数幅と時間幅の間にはフーリエ変換の関係があり、短パルスになるにつれてより広い発振スペクトルを有していることになる。特に、式(1)の等号を満たすような時間幅をフーリエ限界パルス幅と呼ぶ。

2.3 モード同期変調機構

本研究で使用した半導体可飽和吸収体 (SESAM) と非線形増幅ループミラー (NALM) について述べる。

SESAM の構成を図 3 に示す。SESAM は光強度が強いときには吸収が飽和して透過率が上がる可飽和吸収体とブラッグ反射鏡を組み合わせた素子であり、入射光の強度が高くなるにつれて反射率が高くなるため、共振器に組み込むことで強度依存の損失を与えること

ができる。SESAM の特性を表す重要なパラメータとして、変調深さ、飽和フルエンス、非飽和損失、緩和時間が挙げられる。変調深さ ΔR は非飽和時と飽和時の反射率の差を指す。飽和フルエンス F_{sat} は可飽和吸収体の吸収飽和が起きるような入射パルス光のフルエンスの閾値を指す。非飽和損失 ΔR_{ns} は飽和状態によらず常に発生する損失である。緩和時間は、SESAM が動作したのちに次に動作するまでの時間である。SESAM はミラー部分の破壊や劣化が起きてしまうため長期安定動作には向かないものの、共振器設計が容易かつセルフスタートの達成が容易であるといった利点がある。

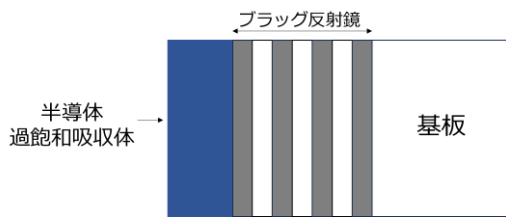


図 3 SESAM の構造

NALM の構成を図 4 に示す。NALM は 2 ファイバーループ内に非対称になるように利得媒質を挿入したものであり、非線形光学効果に起因する位相変化の強度依存性を利用している。パルスの強度に追従した変調を利用することで実質的に非常に高速な可飽和吸収体として扱うことができる。また、偏光を利用しないため、すべて偏波保持(PM)ファイバーで構成することで堅牢なシステムを構築することができる。しかし、セルフスタート性や高出力での動作が困難であることが知られている。

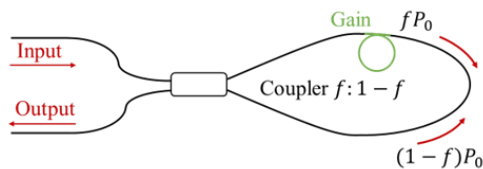


図 4 NALM の概念図

2.4 モード同期状態

モード同期は共振器の群速度分散によって、パルスが伝搬する様子やパルスの状態が異なる。これは、パルスが様々な波長から構成されていることに起因する。本論文では、負分散のときに起きるソリトンモード同期、0 分散近傍のときに起きるストレッチパルスモード同期について述べる。

ソリトンモード同期では、非線形光学効果による正のチャープと異常分散による負のチャープが釣り合うことでパルスが生じる。ソリトンのパルス幅は式(2)を用いて見積もることができる。

$$\tau = 1.76 \frac{\lambda A_{eff} |GDD|}{\pi n_2 l E_p} \quad (2)$$

ここで、 λ はレーザーの発振波長、 A_{eff} は媒質内での有効ビーム径、 E_p はパルスエネルギー、 l は共振器長、 GDD は共振器一周の群速度分散である。ファイバーレーザーのソリトンモード同期では、光強度が強くなると自己位相変調と負分散のつり合いが取れなくなることでパルス幅は ~ 100 ps から ~ 200 fs 程度に制限される。また、ソリトンモード同期は様々な摂動によってケリーサイドバンドと呼ばれる特徴的なサイドバンドを有する。

ストレッチパルスモード同期は、共振器内に正の分散と負の分散を設けることによって、パルスが伸縮しながら伝搬する状態である。この分散の分布によって、パルスによる非線形光学効果を抑制することができる。したがって、ソリトンモード同期よりも高エネルギーなパルスを得ることが可能である。また、ストレッチパルスモード同期はソリトンモード同期に見られたケリーサイドバンドを抑制することができる。このケリーサイドバンドは超短パルスにおける雑音成分であるため、分光応用のための超短パルス光源で多く使われている。

2.5 光周波数コム

光周波数コムは縦モードが周波数空間上で等間隔に並んだスペクトルを持つレーザー光源である。図 5 に概念図を示す。

光周波数コムのパラメータは繰り返し周波数 f_{rep} と繰り返し周波数を 0 まで仮想的に伸ばした時の余りであるキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} のたった二つであり、二つのパラメータは光コムスペクトルに対して式(3)のような関係がある。

$$f_m = f_{ceo} + m * f_{rep} \quad (3)$$

この二つのパラメータは時々刻々と変化しているため、モード同期レーザーを光周波数コムとするためにはレーザーに対して制御を施して f_{rep} および f_{ceo} の揺らぎを抑える必要がある。

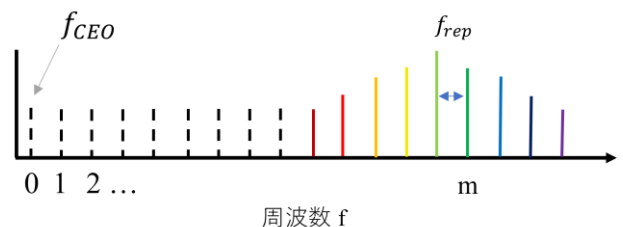


図 5 光周波数コムの概念図

3. Fabry-Perot 共振器を用いたモード同期実験

セルフスタートが容易でありシンプルな構成を構築することができる SESAM を用いた Fabry-Perot 共振器を構築してモード同期実験を行った。本章ではソリトンとストレッチパルスモード同期について報告する。

3.1 ソリトンモード同期実験

実験構成を図 6 に示す。

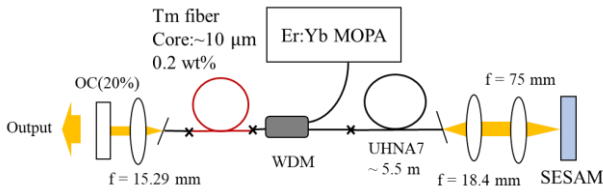


図 6 Fabry-Perot 型 Tm ファイバーレーザーのソリトンモード同期実験構成

共振器の両端を SESAM(中心周波数 1960 nm、変調深さ 18%、非飽和損失 12%、飽和フルエンス $65 \mu\text{J}/\text{cm}^2$)と 20%の出力鏡で構成し、利得媒質として 2 m の Tm ファイバー(0.2 wt%添加、コア径 $\sim 10 \mu\text{m}$)を用い、励起光源として波長 1555 nm Er:Yb ファイバー-MOPA を用いて In-band 励起を行った。SESAM 上での集光面積は $\sim 1300 \mu\text{m}^2$ であり、共振器長は $\sim 7 \text{ m}$ 、分散値は $\sim -0.46 \text{ ps}^2$ であった。

レーザーの出力特性を図 7 に示す。スロープ効率 $\sim 7.4\%$ で励起出力 863 mW、平均出力 43.1 mW を境にパルス化を確認した。

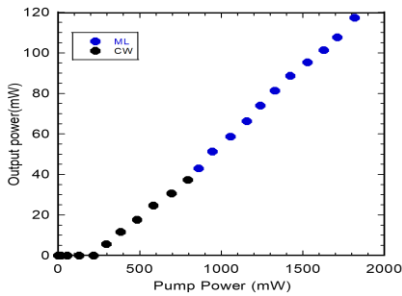


図 7 出力特性

パルストレインを図 8 に示す。パルス間隔から計算される繰り返し周波数は 30.7 MHz であり共振器長に一致しているものの、ロングスパンで見ると変調がかかっていることがわかる。

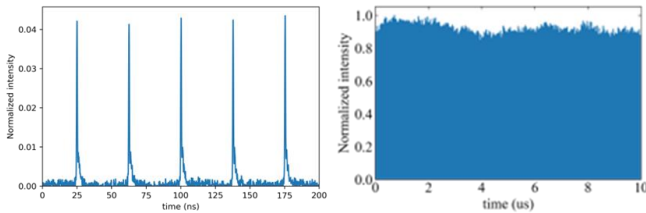


図 8 パルストレイン(左:200 ns、右: 10 μs)

パルス化開始時の励起出力 863 mW、平均出力 43.1 mW 時の発振スペクトルを図 9 に示す。中心周波数 1941 nm、スペクトル幅 5.59 nm でありシングルパルスと仮定した時のパルスエネルギーは 1.4 nJ であった。また、sech² を仮定して計算されるフーリエ限界パルス幅は 765 fs である。

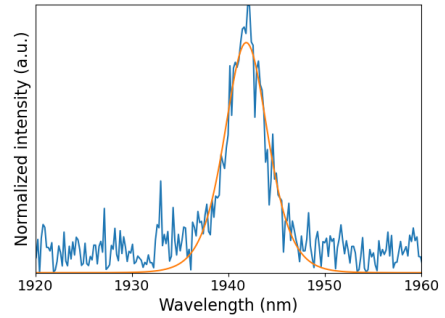


図 9 発振スペクトル

本節で用いた共振器はソリトンモード同期の領域であるものの、得られたパルスの発振スペクトルにはケリーサイドバンドが見られなかった。式 2 を用いて共振器内を周回するパルスのパルス幅について見積もりを行うと表 1 のようになる。

表 1 パルス幅の見積もり

共振器内パルスエネルギー	パルス幅
19 nJ (最大出力)	$\sim 9.8 \text{ fs}$
7.0 nJ (パルス化開始時)	$\sim 26 \text{ fs}$

今回用いた共振器構成のソリトンモード同期では数 nJ、数十 fs のパルス形成は困難である。したがって、今回得られたパルスは崩壊したパルスが集団となって一つのパルスのように振る舞うノイズライクパルスを形成していた可能性が高いと考えられる。

シングルパルス動作を得るためには、より高いパルスエネルギーを得ることができる状態、もしくはより低い出力から SESAM の飽和フルエンスを満たすことができるようにする必要があると考えられる。

3.2 ストレッチパルスモード同期実験

ソリトンモード同期よりも高いパルスエネルギーを維持することができるストレッチパルスモード同期状態を得るために図 10 に示す共振器を構成した。

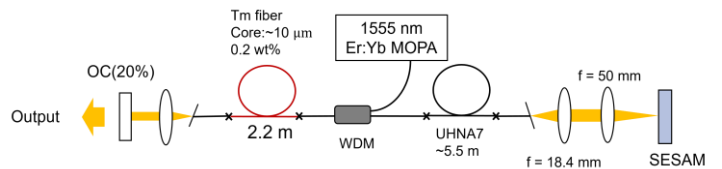


図 10 Fabry-Perot 型 Tm ファイバーレーザーのストレッチパルスモード同期実験構成

分散補償ファイバーとして $2 \mu\text{m}$ 帯で $0.04 \text{ ps}^2/\text{m}$ を示す [4]UHNA7 を挿入し、共振器全体の分散値を $\sim -0.017 \text{ ps}^2$ とした。SESAM は 3.1 節と同じものを使用しているものの、SESAM の飽和フルエンスを満たしやすくするために集光レンズの集光径を 75 mm から 50 mm へと変更

した。これらの変更によって、共振器長は7 m から 17 m、SESAM への集光面積は $\sim 1300 \mu\text{m}^2$ から $\sim 580 \mu\text{m}^2$ となった。

SESAM への集光を行うことで得られたパルストレインを図 11 に、励起出力 1.52 W、平均出力 53 mW 時の発振スペクトルを図 12 に示す。

中心周波数 $\sim 1952 \text{ nm}$ 、スペクトル幅 $\sim 10 \text{ nm}$ でありシングルパルスを仮定したときのパルスエネルギーは $\sim 4.6 \text{ nJ}$ であった。また、 sech^2 を仮定して計算されるフーリエ限界パルス幅は 315 fs である。

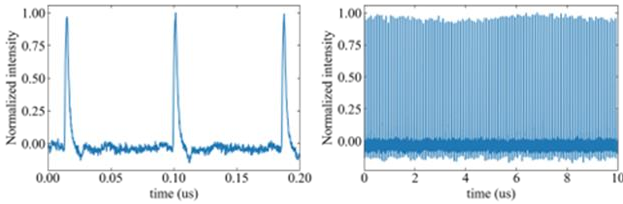


図 11 パルストレイン(左:200 ns、右:10 μs)

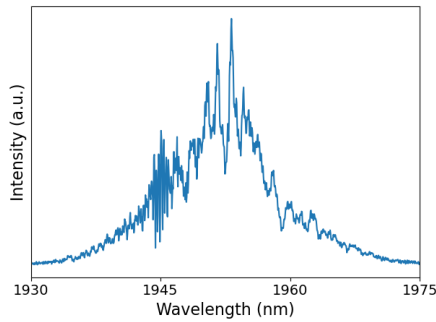


図 12 発振スペクトル

このようなパルス発振を得たものの、セルフスタート性に優れず、振動に弱く非常に不安定なモード同期状態であったため、モード同期状態での出力特性および出力ごとの発振スペクトルを測定することができなかった。

観測された発振スペクトルに複数のピークが見られる。これは、ソリトンモード同期実験と同様にシングルパルスになっていないために綺麗な sech^2 型とならなかった可能性とともに、図 13 に示すように動作波長には様々な気体分子の吸収線が存在することから気体分子の吸収によってスペクトルに構造が現れていることが考えられる。

モード同期状態を詳しく調べるためには自己相関波形を取得する必要があるが、得られたモード同期状態は不安定であるため、自己相関波形の取得が困難である。加えて、光周波数コムへの応用も考慮するとより堅牢なレーザーシステムを構築する必要があると考えた。

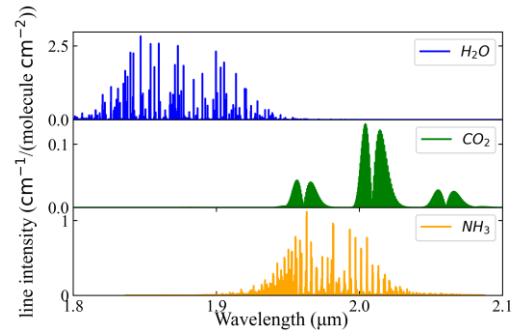


図 13 波長 2 μm 帯における分子の吸収スペクトル[5]

4. Figure-9 型共振器を用いたモード同期実験

一層の堅牢性を得るために、SESAM と NALM を併用した Figure-9 型共振器を構成し、モード同期実験を行った。

4.1 Non-PM ファイバーを用いた figure-9 レーザー実験構成を図 14 に示す。

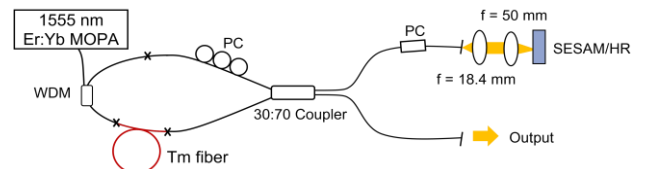


図 14 Non-PM ファイバーを用いた Figure-9 レーザーの共振器構成

予備実験として、非偏波保持ファイバーを用いて NALM と SESAM を併用した共振器を構成した。利得媒質は 2 m の Tm 添加シングルモードファイバー(コア径 $10 \mu\text{m}$ 、NA 0.13)を使用し、WDM を通して波長 1555 nm の Er:Yb MOPA を用いて励起した。また、分岐比 30:70 の 2×2 ファイバーカップラを用いて NALM を構成し、二つの偏光コントローラ(PC)で偏光の制御を行っている。出力ポートの片方を SESAM(中心周波数 1960 nm、変調深さ 18%、非飽和損失 12%、飽和フルエンス $65 \mu\text{J}/\text{cm}^2$)上に集光し、9 の字型の共振器を構成している。もう片方のポートの端には APC コネクタを取り付け、取り出しポートとして使用した。共振器全体の分散値は $\sim -0.444 \text{ ps}^2$ となっている。

出力特性を図 15 に示す。励起出力 $\sim 1.13 \text{ W}$ 時に出力 65 mW に達しこれを境にモード同期発振と思われるパルストレインを確認し、このとき中心波長 1942 nm、繰り返し周波数 29 MHz のパルスを得た。この時の発振スペクトルおよび RF スペクトルを図 16,17 に示す。スペクトル幅は $\sim 2.8 \text{ nm}$ であるがケリーサイドバンドは確認できなかった。また RF スペクトルを見ると 29 MHz の成分の両脇にサイドバンドが見られた。このことからパルスには強度変調が乗っており、ノイズライ

クパルス発振のような状態であったと考えられる。
 今回シングルパルスとならなかった要因として、
 Non-PM ファイバーの複屈折性によってパルスが分裂
 したことが原因として考えられる。

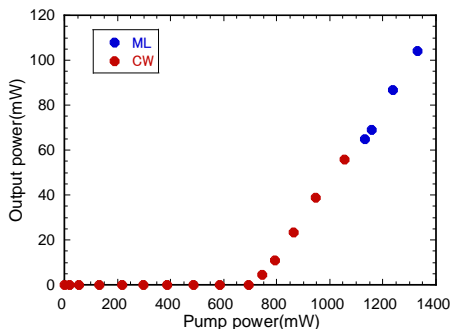


図 15 レーザー出力特性

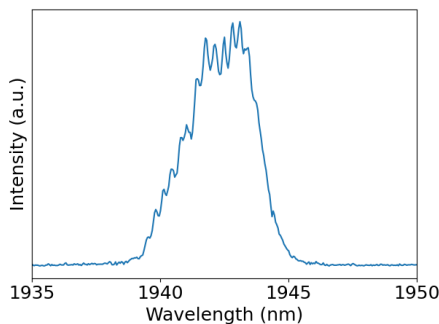


図 16 発振スペクトル

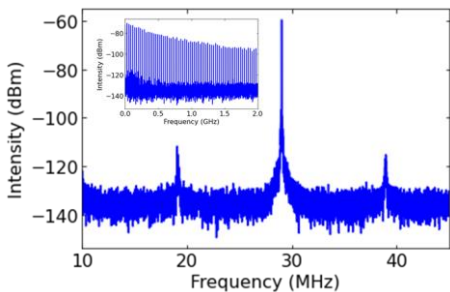


図 17 RF スペクトル

4.2 PM ファイバーを用いた Figure-9 レーザー

次に PM ファイバーおよびコンポーネントを使用し
 て共振器を構成した。利得媒質として Tm 添加のシングル
 モード PM ファイバー(コア径 9 μm 、NA 0.15)を使用
 し、WDM を用いて 4.1 節で用いたものと同じ Er:Yb
 MOPA で励起した。分岐比 20:80 の 2x2 ファイバーカ
 ップラを用いて先の構成と同様に 9 の字型の共振器を
 構成している。使用した SESAM のスペックは 4.1 節と
 同じものであり、共振器長は ~ 25 m、共振器全体の分散
 値は ~ 1.4 ps²である。

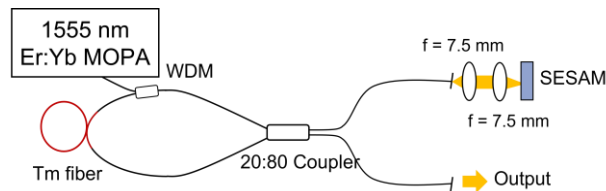


図 18 PM ファイバーを用いた Figure-9 レーザーの
 ソリトンモード同期実験構成

出力特性を図 19 に示す。励起出力 ~ 300 mW 時に出力
 3 mW 時を境にパルシングを確認し、340 mW 以上の励
 起出力ではオシロスコープ上でパルスの分裂を確認し
 した。パルシング開始時に、中心波長 1947.5 nm、スペク
 トル幅 1.94 nm、繰り返し周波数 11.7 MHz のパルスを得
 た。この時の発振スペクトルおよび RF スペクトルを
 図 20,21 に示す。発振スペクトルにはケリーサイドバン
 ドが存在しており得られたパルスはソリトンモード同
 期であると推測される。

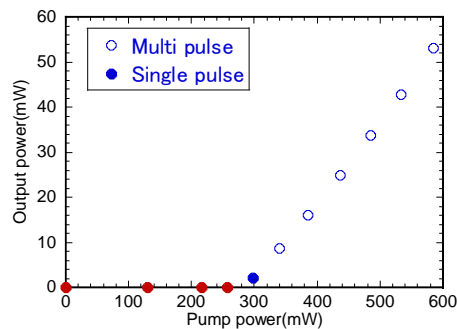


図 19 出力特性

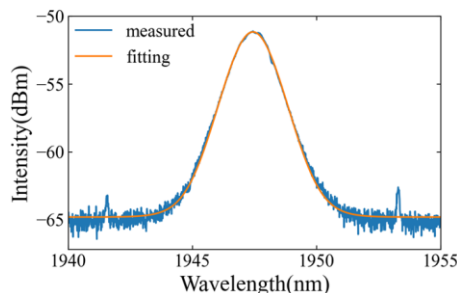


図 20 発振スペクトル

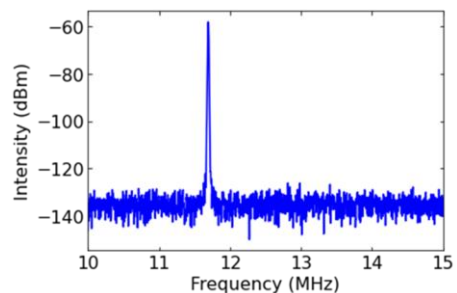


図 21 RF スペクトル

続いて、より位相雑音が少ないことで知られておりより高いパルスエネルギーを保持することができるストレッチパルスモード同期を得るために図 22 の共振器を構成して実験を行った。分散補償ファイバーとして 1950 nm で正常分散を示す PM2000D を図 18 の実験構成に対して追加で融着している。分散値は $\sim 0.0025 \text{ ps}^2$ であり共振器長は $\sim 24 \text{ m}$ である。

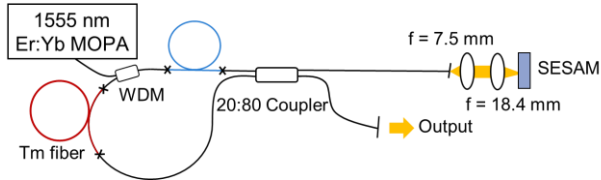


図 22 PM ファイバーを用いた Figure-9 レーザーのストレッチパルスモード同期実験構成

モード同期実験を行ったところ、レーザー出力 $\sim 10 \text{ mW}$ で SESAM の破壊を確認した。図 23 に SESAM が破壊された瞬間の時間波形を示す。

図 23 より、SESAM の破壊は意図しない Q スイッチ発振によって起きたものと考えられる。この Q スイッチ発振は図 18 の SESAM を HR ミラーに置き換えても観測したことから、その原因として Tm ファイバーの再吸収による影響、およびファイバーの融着状態による偏光のクロストークや損失が考えられる。したがって、Tm ファイバーを短くすることで再吸収の影響を低減する、融着状態を改善するといったことでストレッチパルスモード同期が得られる可能性がある。

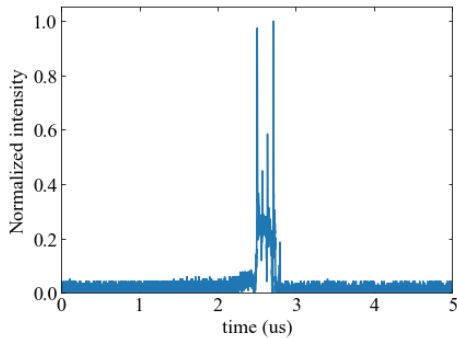


図 23 SESAM が破壊された瞬間の時間波形

5. まとめ

本研究では、波長 $2 \mu\text{m}$ 帯光周波数コムの開発を目的とした、モード同期 Tm ファイバーレーザーの開発を行った。

Fabry-Perot 共振器を用いた実験では、はじめに異常分散領域の共振器を用いて実験を行った。SESAM を用いてモード同期パルスを得たが、スペクトルや平均出力からソリトンモード同期ではなくノイズライクパルスであると考察された。次に分散補償ファイバーを追加し、共振器全体を 0 分散近傍として実験を行った。結果としてモード同期パルスを得たものの、モード同期状態は不明であり時間的にも不安定であった。

Figure-9 共振器を用いた実験では、はじめに Non-PM ファイバーを用いた共振器でモード同期実験を行った。モード同期パルスが得られたものの、得られたパルスの発振スペクトルにケリーサイドバンドが確認できず、RF スペクトルにサイドバンドが生じていたことから、ノイズライクパルスであったと考えられる。PM ファイバーを用いて共振器を構成した実験では、平均出力 3 mW において繰り返し周波数 11.7 MHz 、スペクトル幅 $\sim 1.94 \text{ nm}$ の発振スペクトルを有するモード同期が得られた。この発振スペクトルはケリーサイドバンドが存在していることからソリトンモード同期であると言える。次に、位相雑音が少なく、より高いパルスエネルギーを保持することができるストレッチパルスモード同期を目指したものの、意図しない Q スイッチ発振によって SESAM が破壊を確認した。今後は Tm ファイバーを短くする、融着状態を改善することでストレッチパルスモード同期が得られる可能性がある。

参考文献

- [1] M. E. Webber et al., *Appl. Opt.* **40** (24) 4395-4403 (2001)
- [2] E. Russell et al., *Opt. Express* **30**, 5213 (2022)
- [3] S. D. Agger and J. H. Povlsen, *Opt. Express* **14**, 50 (2006).
- [4] I. E. Gordon et al., *iqsrt.* **277**, 107949, 107949 (2022)
- [5] Piotr Ciąćka et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **35**, 1301-1307 (2018)