

高出力モード同期 Tm ファイバーレーザー及び増幅器の開発

戸倉川研究室

益子裕

1. はじめに

波長 2 μm 帯で動作するレーザーには様々な応用が存在する。例えばレーザーメスや、自由空間通信、防衛、さらには従来の波長では加工が難しいポリマー材料の加工、通信域の限界を解消する新たな長距離通信用光源、非線形波長変換での 3-20 μm 光発生による呼気分析などの医療応用や LIDAR などが期待されている。こうした応用の実現、発展のためには高出力、高繰り返し、高エネルギーな光源が要求されている。しかし、現状ではそれに耐えうる光源がほとんどなく、さらなる研究が必要とされている。他の波長帯では全正常分散モード同期等によって高出力化が行われていたりするが、2 μm 帯ではシリカガラスが大きな異常分散を示してしまうために難しい。そうした中で高出力化に対する 1 つの方法として、ソリトンモード同期では得ることが難しい出力、パルスエネルギーを得ることが可能なノイズライクパルス(NLP)がある。これはパルスの包絡線内に無数のパルスがランダムに存在している状態であり、ファイバーの熱特性の測定[1] や FBG の特性評価[2]、さらにフラットな超広帯域光発生[3]などの応用例も存在する。そこで本研究では主として波長 2 μm で高出力動作が可能な NLP を発振する Tm ファイバーレーザー及びファイバー増幅器の開発を行った。

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わすことによってパルスを生成し発振させる方法である。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、モード同期によりアト秒、フェムト秒という非常に短いパルス幅を持つパルスを得ることが可能となる。モード同期で得られるパルスの幅 $\Delta\tau$ と周波数幅 $\Delta\nu$ には次のような式が成り立つ[4]。

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

κ はパルスに形によって決まる定数であり、ガウス型なら 0.441、sech²型なら 0.315 である。そして等号が成り立つときはフーリエ限界パルスと呼ばれ、その周波数幅で生み出すことのできる最小のパルス幅を持つパルスである。式(1)を見ると、周波数幅が広ければ広いほど短いパルスが得られることがわかる。そのためモード同期においてはレーザー媒質の利得スペクトル幅が必要な要素となり、短パルス化を目指すうえでは広い利得スペクトル幅を持つ媒質

を用いる必要がある。また群速度分散が負の値をもつ導波路において、モード同期を起こすと、共振器を 1 周することでパルスの形が同じになる分散補償型ソリトンなどと呼ばれる状態でのモード同期レーザーとなる。モード同期には大きく分けて 2 つの方法がある。1 つは外部から何かしらの変調を加えて位相を揃える能動モード同期と呼ばれる方法。もう 1 つは、変調などを外部から加えずに可飽和吸収体などを共振器に入れ込むことによりモード同期を自動的に起こす受動モード同期と呼ばれる方法がある。

2.2 可飽和吸収体

可飽和吸収体とは入射する光の強度に依存した損失を与える物質である。可飽和吸収体としては半導体などが使われており、半導体を使用したものは半導体可飽和吸収体と言われ、さらに半導体可飽和吸収体とブラッグ反射の機構を組み合わせたものは半導体可飽和吸収体鏡 (Semiconductor Saturable Absorber Mirror 以下 SESAM) と呼ばれている。SESAM を共振器内に入れることにより、共振器内を伝搬する光の位相が揃い強めあったものは損失が少なく、位相が揃っていないものには損失が高いという状態を作り出すことができる。これによりパルスを選択的に発振させることが可能となる。他のモード同期を得る方法である非線形偏光回転などと比べて共振器構成を単純化することができるといった利点があり、短い共振器構成での高繰り返し動作化なども見込むことができる。

2.3 非線形ループミラー

可飽和吸収体や波長板、偏光子を用いた方法のほかに WDM のみを用いて可飽和吸収機構を得る非線形ループミラーというものがある。その概略図を図 1 に示すこれは 2 × 2 のポートを持つ WDM の片側のポート同士を融着することによりループを形成したものである。それによって入射した光は WDM により 2 つに分割され、それぞれが反対方向にループを伝搬し、再び WDM 上で結合する。その際に干渉が起こり、WDM での分岐が生じる。この分岐比は WDM で結合する光の位相によって決まってくる。WDM の分岐比が 50/50 でない場合、右回りと左回りに伝搬する光の強度に違いが生じる。そうすると自己位相変調により右回りと左回りの光に異なった位相シフトを与えることができ、WDM 上での干渉が変化する。その結果、強度に依存した透過率の変化生じ、可飽和吸収機構として動作する。

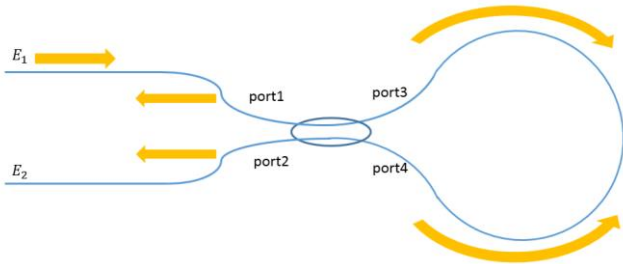


図 1.非線形ループミラーの概略図

非線形ループミラーの透過光は入射光 E_1 、WDMの分岐比 α 、非線形屈折率 n_2 、ループ長 L 、波長 λ を用いて以下の式(2)によって表すことができる[5]。

$$E_2 = |E_1|^2(1 - 2\alpha(1 - \alpha)) \left[1 + \cos \left((1 - 2\alpha)|E_1|^2 \times \frac{2\pi n_2 L}{\lambda} \right) \right] \quad (2)$$

この式より、分岐比とループ長が重要なパラメータとなっており、特に分岐比に関しては 50/50 に近いほどモード同期の閾値があがり、離れるほど閾値が下がるという特性があるため、分岐比の選択が重要になってくる。非線形ループミラーは全ファイバー化した可飽和吸収機構が可能となるメリットを有しているが、式(2)が示すように透過率が入射光の強度に依存するため、レーザーの出力によって共振器状態が変化してしまうという短所も有する。

2.4 ノイズライクパルス

モード同期動作には様々な状態があり、通常のソリトンモード同期の他に、散逸ソリトン (disipative soliton)、シミラリトン、全正常分散モード同期 (ANDi) などがある。そうした中の1つにノイズライクパルス(以下 NLP) がある。ノイズライクパルスはマルチパルス的一种であり、無数のパルスが群として存在することによりサブ ns の包絡線を作り出す。その包絡線が作り出す大きなパルスがシングルパルスのように共振器長に対応した基本周期で出力される。その概略図を図 2 に示す。NLP は過度な利得によりパルスが絶えず成長、分裂、消滅を繰り返しており、出力される NLP は内部構造、スペクトル成分が毎パルスごとに異なる。そうした異なる構造が測定の際には時間的に平均化されるために、測定したスペクトルは広く滑らかな形状をしており、自己相関波形は長い土台成分の上にフェムト秒オーダーの鋭いピークが存在しているような形状を示す。また、そのランダム性から通常のモード同期レーザーから得られる超短パルスが有するようなコヒーレント性はない。さらには無数のパルスによって構築されているために比較的長いパルスになってしまうといったデメリットが生じる。しかし、ソリトンモード同期では直接出力することが難しい高平均出力、パルス群として高パルスエネルギーを得ることができるといったメリットがある。こうした低コヒーレンス性や高エネルギー性からセンサー的な利用としてファイバーの熱特性の測定[1] や FBG の特性評価[2] への利用や通信に用いられるデータストレージからの読み出し[7]LIBS などが報告されている。

さらに超広帯域光発生に使用した場合、無数の強度の異なるパルス群という構造から非常にフラットな超広帯域光を得ることができるという報告例もある[22]

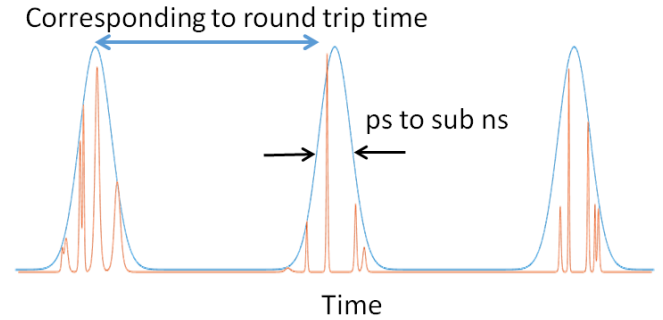


図 2.NLP の概略図

2.5 Tm 添加シリカガラスファイバー

希土類元素であるトリウム(以下 Tm)は様々な母材に添加されレーザー媒質として用いられている。中でも我々は Tm 添加シリカガラスファイバーに着目した。Tm は図 3 のような準位図をしており、790 nm 帯の光、もしくは 1500-1900 nm の光等で励起が可能である。前者の 790 nm 付近の励起においては 1 つの光子で 2 つの光子を励起する 1 to 2 という量子効率が 2 に迫る励起過程が存在し、高出力 LD を用いた高効率なレーザー動作が可能である。後者の 1500-1900 nm による励起は in-band 励起とも呼ばれており、こちらも高効率な動作が可能である。図 4 にその準位間の吸収断面積と放出断面積を示す[9]。

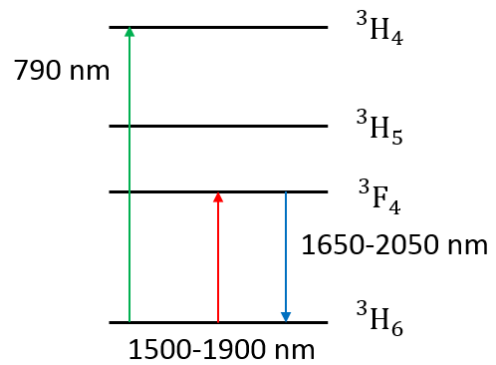


図 3 Tm イオンの準位図

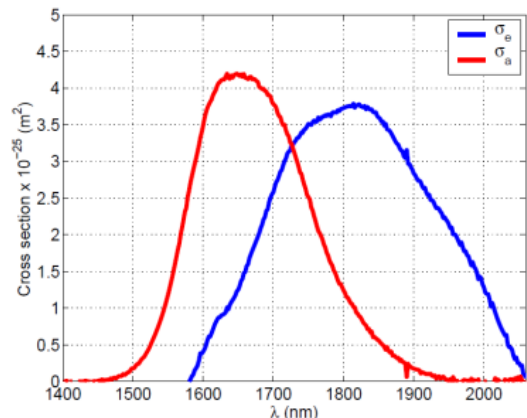


図 4 .Tm 添加シリカガラスファイバーの吸収断面積(赤)と放出断面積(青)

これによると Tm シリカファイバーは約 1650 nm から 2050 nm の広い蛍光スペクトルを有しており、約 300 nm の波長範囲で発振が可能な媒質である。その広いスペクトル幅によって、モード同期を行うことでフェムト秒のパルスを得ることができる。本研究ではレーザー媒質としてこうした優れた特性を有する Tm 添加シリカガラスファイバーを用いた。

3. 実験

3.1 SESAM を用いた NLP 発振器実験

3.1.1 実験の概要図

実験系を図 5 に示す。

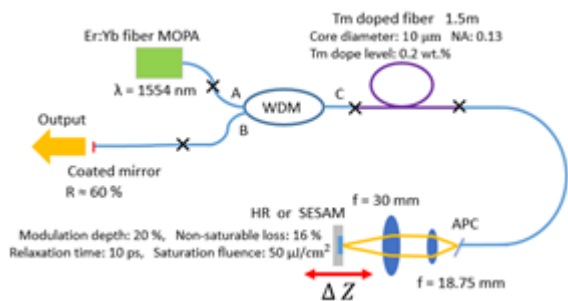


図 5. SESAM を用いた NLP 発振器

励起光源としては、波長 1554 nm で動作する Er:Yb ファイバー MOPA を用いて、利得ファイバーである Tm 添加シリカファイバー (NA:0.13, コア径:10 μm, 添加濃度:0.2 wt.%) を励起した。Tm ファイバーの端には APC コネクター付きのシングルモードシリカファイバー (SM-28) を融着し、端面での反射による寄生発振等を抑制している。APC からの光は 2 枚のレンズ ($f = 18.75$ nm, $f = 30$ nm) によりコリメート、そしてミラー上へと集光を行っている。WDM の出力側には端面にミラーを蒸着したファイバーを融着し、出力鏡 (OC) として用いた。偏光制御器等の偏光依存性のある素子は使用していないためこの共振器からの出力はランダム偏光であることが予想される。使用した SESAM は変調度 20%、飽和フルエンス $50 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、非飽和損失 16%、緩和時間 10 ps であり、ファイバーは $2 \mu\text{m}$ 帯においてシングル横モードである。

3.1.2 結果と考察

得られた出力特性を図 6 に示す。励起パワー 3.1 W 時に最大平均出力 195 mW、スロープ効率 7%、繰り返し周波数 20.5 MHz、スペクトル幅 18.9 nm、パルスエネルギー 9.5 nJ の NLP を得ることができた。その際のスペクトルを図 7 に示す。これを見るとマルチパルス等に見られるような構造がなく非常に滑らかな形状をしている。いくつか見られるディップは水の吸収によるものである。そして、自己相関波形は図 8 のようになり、NLP の特徴である広い土台成分とする間ピークの成分が確認できる。そしてそのピークの幅は sech^2 型のパルスを仮定すると 378 fs のパルス幅に相当する。

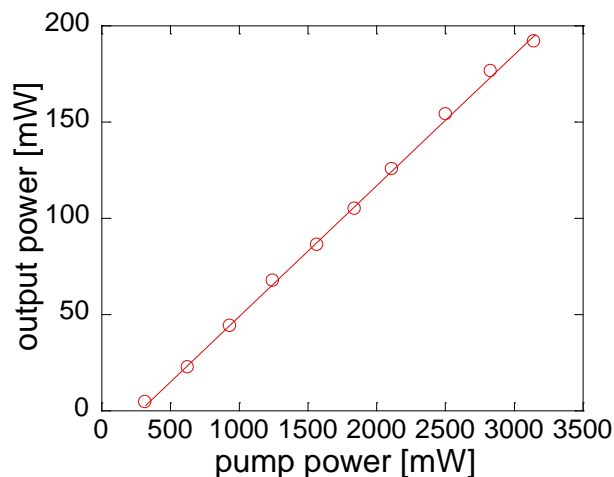


図 6 SESAM を用いた NLP の出力特性

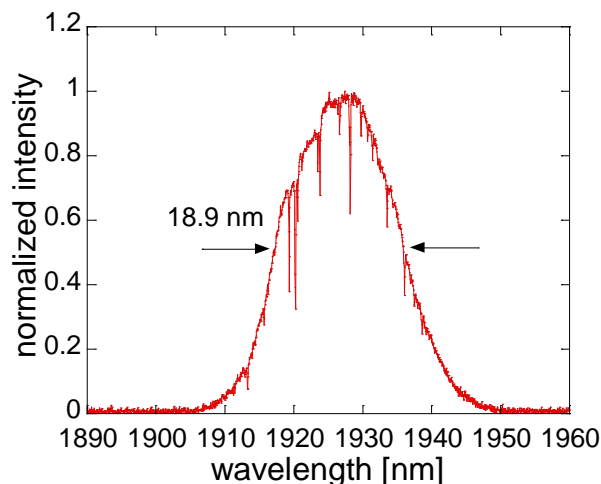


図 7. NLP のスペクトル

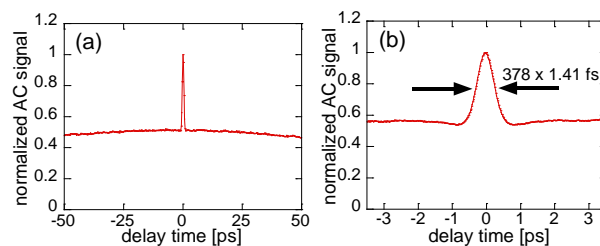


図 8. NLP の自己相関波形 (a) とその拡大 (b)

3.2 波長可変 NLP 実験

3.2.1 実験の概要図

実験系は図 5 と同様である。エンドミラーとして用いている HR ミラー、SESAM へと集光しているレンズ系によって生じる色収差とファイバーコアへの結合によりスリット効果によってバンドパスフィルターとして働き、HR ミラー、SESAM を Z 方向に動かすことによって波長可変バンドパスフィルターとして作用させることができる。ファイバーからのコリメートレンズには H-LAK54 で作製された物を、ミラーへの集光レンズには N-BK7 で作製された物を用いた。そして、このレンズ系は 35 nm 程度のバンド幅を有すると見積もられる。

3.2.2 結果と考察

得られた波長可変動作時のスペクトルを図 9、10 に、横軸にミラーの移動量、縦軸に出力とピーク波長をプロットしたものを図 11 に示す。HR ミラー使

用時は、縦マルチモードで発振しており、5 nm 程度の発振範囲を有している。そして HR ミラーを 350 μm 動かすことによってピーク波長において 1893 nm ~ 1949 nm の範囲で 57 nm の波長可変動作を得られた。また、図 11(a)よりミラーの移動量に対して線形的にピーク波長は変化しており、出力も 150 mW 以上を維持していた。次に NLP 動作時の結果を見てみる。SESAM を 380 μm 動かすことによって 1895 ~ 1942 nm の 47.5 nm の波長可変範囲を得ることができた。スペクトルを見てみると波長可変動作時には常に 10 nm 以上のスペクトル幅を有しており、マルチパルスなどの見られるような特殊な構造がなく滑らかなスペクトル形状をしている。ディップは水の吸収である。最大でスペクトル幅は 18.9 nm まで広がっていた。波長可変域の限界に近づくにつれて次第にスペクトル幅は狭くなり、特に長波長側の可変幅限界付近では著しく短くなっていった。出力の方を見てみると、最大出力は 195 mW が得られ、そこから波長をシフトさせていく徐々に低下していった。それでも波長可変動作時において出力 150 mW 以上を維持していた。波長可変性に対して、色収差を考慮に入れた ABCD 行列を用いての計算もしており、実測値は図 11 に緑色で示している計算値のプロット点とも非常によく一致をした。図における傾きを求めてみても 1.7×10^{-4} となり、計算値とも一致した。そのため今回の波長可変動作はレンズの色収差によって引き起こされたものであると判断した。これによりレンズの色収差を用いたパルス動作時での世界初の波長可変動作を達成した。今回得られた波長可変範囲の限界を決めている原因はいくつか考えられ、1 つは利用している Tm ファイバーのスペック的な問題。他にはミラーや WDM の対応波長といった事があげられる。使用している SESAM は 1850 nm 付近から急激に反射率が下がるという特性を持っているため NLP 波長可変動作の短波長限界は SESAM による可能性があるが、反射率低下が本格的に生じるよりも長波長側でしか発振出来ないため断定はできない。

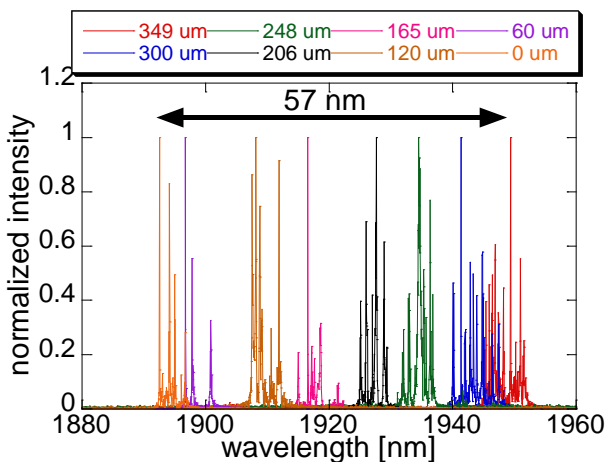


図 9 CW 波長可変動作時のスペクトル

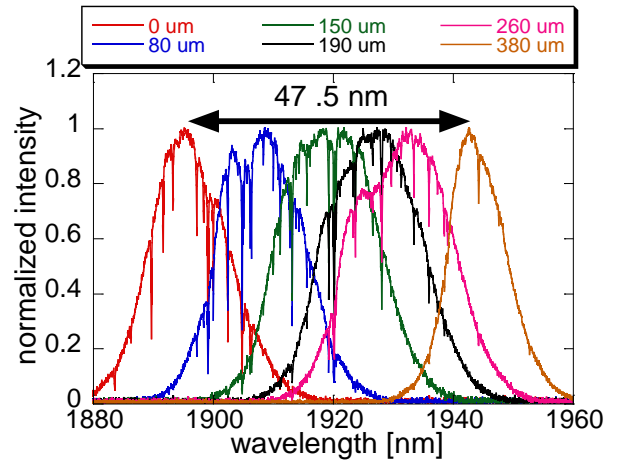


図 10.NLP 波長可変時のスペクトル

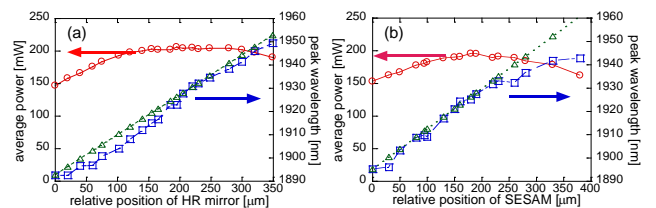


図 11. ミラーの位置と出力とピーク波長

(a) HR ミラー使用時、(b)SESAM 使用時。赤が出力、青が実測したピーク波長、緑が計算したピーク波長

3.3 非線形ループミラーを用いたゼンファイバー型共振器の作製

3.1、3.2 の項で作製した共振器は、自由空間が含まれている、ファイバー端面を OC として用いているため融着が不可能といった部分があった。そこで新たにそうした点を克服した増幅器等への直接融着可能な全ファイバー型共振器の作製を行った。

3.3.1 実験構成

共振器の構成図を図 12 に示す。可飽和吸収機構として非線形ループミラーを用いた八の字型の全ファイバー共振器を作製した。励起光源としては Er:Yb ファイバー-MOPA を使用し、1.5 m の Tm ファイバーを励起した。出力は 60/40 の分岐比を持つ WDM を使用して 40 側のポートから取り出しており、出力先を直接融着可能にしている。非線形ループミラーは分岐比が 10/90 の WDM を用いており、モード同期の閾値を下げ、比較的モード同期を得やすい状態にしている。また、ループは 114 m のシリカファイバーを使用しており、偏波コントローラー(PC)を取り付けて非線形性の調整を行えるようにしている。

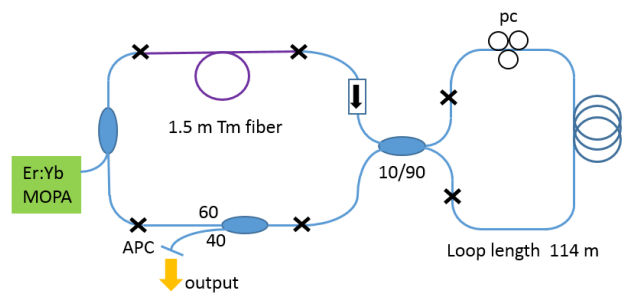


図 12 非線形ループミラーを用いた全ファイバー共振器の構成図

3.3.2 実験結果

励起パワー3.1 W時に最大平均出力 200 mW、スペクトル幅 18.9 nm、繰り返し周波数 1.6 MHz、パルスエネルギー125 nJのNLPを得ることができた。その際のスペクトル、時間波形、自己相関波形をそれぞれ図 13、14、15 に示す。スペクトルを見ても、周期的な構造がみられる。これは共振器内で使用しているアイソレーターが偏光依存性を持っており、それによってスペクトル上に周期的な構造が出てしまっていると推測している。また、中心波長がSESAMを用いた系の時よりも短波長側にシフトしている。これは、OCの取り出し効率が上がったためであると推測している。次に時間波形を見ると変調などがのっておらず安定した動作をしているのがわかる。自己相関波形に関しては、鋭いピークと広い土台の成分を確認することができ、ピーク部分は467 fsの時間幅を持つパルスに相当する幅を有している。

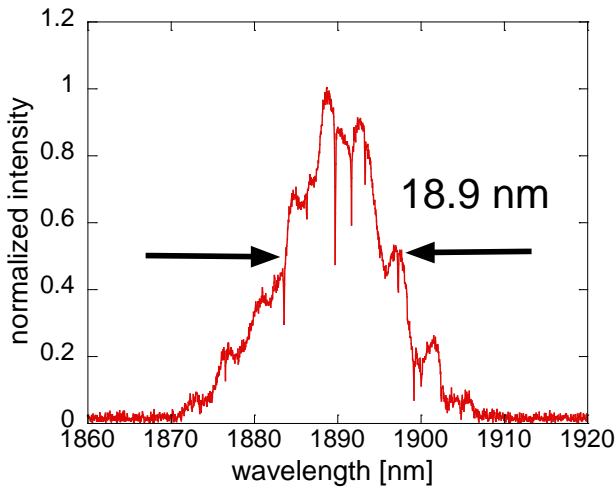


図 13 非線形ループミラーを用いたNLPのスペクトル

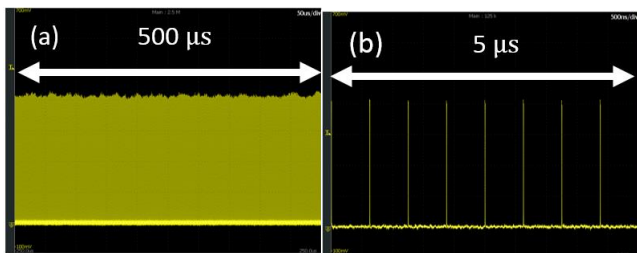


図 14 時間波形(a)とその拡大(b)

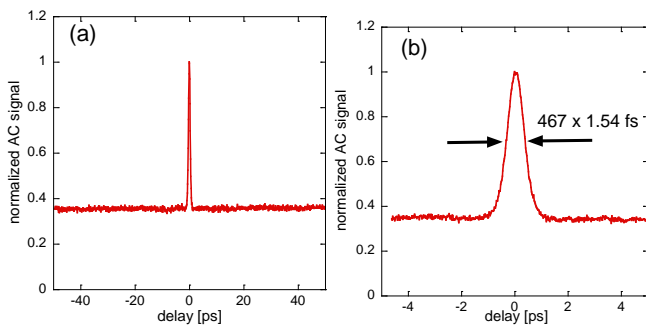


図 15 自己相関波形

3.4 ファイバー増幅実験

3.4.1 増幅器の構成

作製した増幅器の構成を図 16 に示す。先ほどのNLP光源を直接融着し、アイソレーターを通したのちに利得媒質で増幅を行う全ファイバー構成の増幅器を作製した。利得媒質は1 mのTmダブルクラッドファイバー(NA:0.13,コア径:13 μm,第一クラッド径:127 μm,吸収:19 dB@790 nm)を用いて793 nmのLDによって励起を行った。また、アイソレーターと利得媒質の間にWDMを組み込み、3%程度を取り出して種光のモニターを行った。実験を行っていくうえで、ダブルクラッドTmファイバーの融着点において熱が発生し、燃えることが確認されたのでリコートを行ったうえで利得ファイバーの大部分ごと融着点を水冷している。

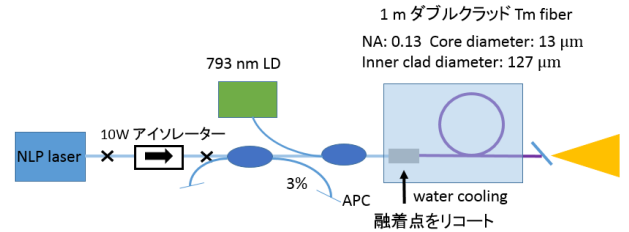


図 16 増幅器の構成図

3.4.2 結果

得られた増幅特性を図 17 に示す。最大出力 10.2 W、スロープ効率 44%、パルスエネルギー6.4 μJを得ることができた。冷却をしていない時の出力と比較すると同励起強度時にも違いが表れ、冷却による効率の上昇も確認できた。

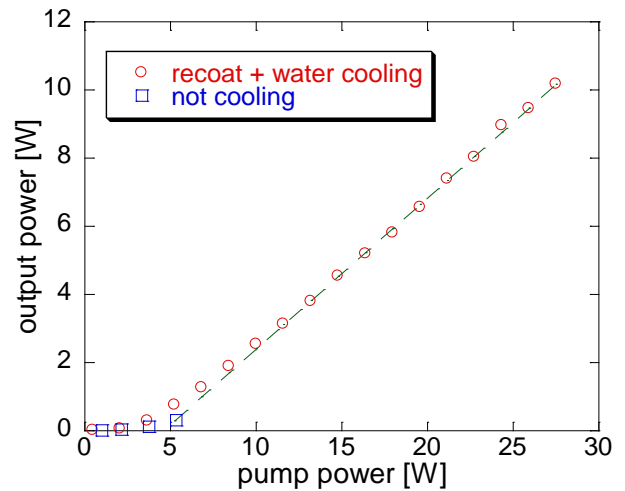


図 17 冷却なし(青)と冷却あり(赤)の時の増幅特性

また、増幅前後のスペクトルを図 18 に示す。これを見ると増幅後は、スペクトルに細かな構造がみられる。この原因としては、増幅に用いているダブルクラッドTmファイバーのVナンバーが2.5程度であり、マルチモード間の干渉が生じている可能性やNLPの細かなマルチパルスによる干渉の結果等が考えられる。そしてスペクトルの幅は13 nm程度となっており、増幅前の幅からの大きな変化は見られなかった。さらなる増幅前のスペクトルと比較を行って

みると増幅によって短波長側が減衰し、長波長側が成長していることがわかる。こちらの原因に関しては、利得ファイバーがダブルクラッドファイバーであるため大きな反転分布を作ることが難しく、再吸収等の影響によって短波長側では実効的な利得が低く損失になってしまい、長波長側では再吸収の影響が小さくなり実効的な利得が高くなっているためであると考えた。

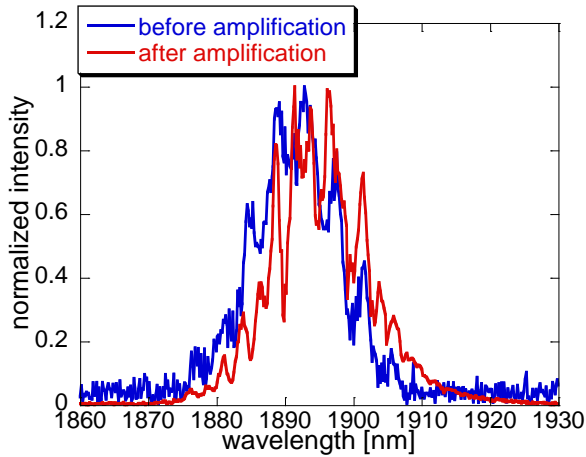


図 18 増幅前(青)と増幅後(赤)のスペクトル

さらに増幅前後の時間波形を図 19 に示す。これを見ると増幅前は比較的矩形や台形に近い形状をしており、前端にピークが存在する。一方増幅後の波形は三角形に近い形状に変化しておりピークも後端にシフトしている。パルスの幅についても増幅前の幅は 5.5 ns だったのに対して増幅後の幅は 4.8 ns と短くなっていた。しかし、このパルス波形はゼロ点を合わせられていないため、ピーク位置が実際にシフトしているのか、パルス前端に増幅前はなかった成分が出てきておりそれによって後端にピークがシフトして見えたのかはわかっていない。得られたパルス幅とパルスエネルギーからピーク強度を見積もると 1.3 kW となった。NLP 動作をしていることを考慮すると実際のピーク強度はさらに高い値であると考えられる。

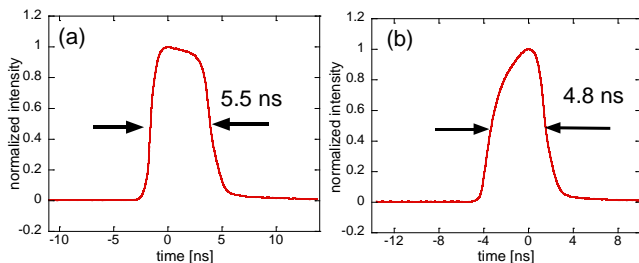


図 19 増幅前(a)と増幅後(b)のパルス波形

続いて増幅におけるパルス幅の変動を見てみると。図 20 は増幅動作時のパルス幅の変化を示したグラフである。これを見ると増幅を行っていくにしたがってパルス幅が周期的に変動していることがわかる。増幅前のパルス幅が変化してないことを考えるとこれは増幅によって引き起こされたものであると思われる。しかし、なぜこのようにパルス幅が周期的な変動を示しているのかについて原因はわかっていない。

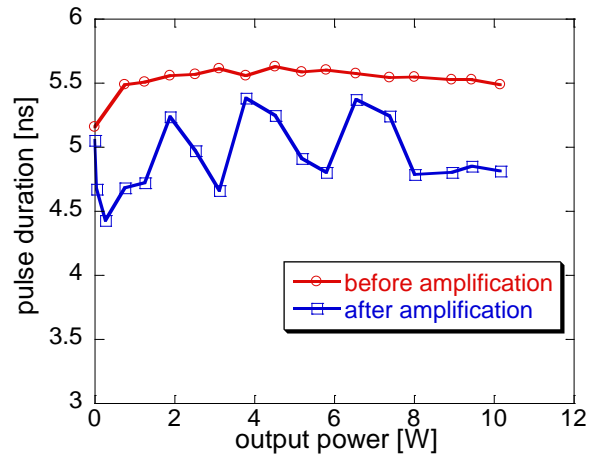


図 20 増幅によるパルス幅の変動

4.まとめ

本研究では波長 2 μm 帯高出力モード同期 Tm ファイバーレーザー及びファイバー増幅器の開発を行った。SESAM を用いた直線型の共振器を作製し、最大出力 195 mW、スロープ効率 7%スペクトル幅 18.9 nm、繰り返し周波数 20.5 MHz、パルスエネルギーは 9.3 nJ の NLP 動作を得ることができた。また、同実験系のレンズによる色収差を利用して NLP 状態で 47 nm に及ぶ波長可変動作を達成した。レンズの収差を用いての波長可変パルス動作はこれが初めての報告である。こちらの系に関してはレンズ系による SESAM への集光度合いの調整や、色分散の調整を行うことによってソリトンモード同期や異なる波長可変特性を得ることができると考えている。非線形ループミラーを用いたリング型共振器を作製し、平均出力は 200 mW、スペクトル幅 13.9 nm、繰り返し周波数 1.6 MHz、パルスエネルギー 125 nJ の NLP 動作を得ることができた。これらの値はソリトンモード同期等では直接共振器から得ることが難しい値となったおり、増幅を行うことによって最大出力 10.2 W、スロープ効率 44%、繰り返し周波数 1.6 MHz、パルスエネルギー 6.4 μJ を得ることができた。パルス幅は 4.8 ns となり、ピーク強度は 1.3 kW 以上であると思積られる。

参考文献

- [1] Vladimir Goloborodko *et.al.*, Appl. Opt. **42**, 2284-2288 (2003)
- [2] Shay Keren *et.al.*, Opt. Lett. **26**, 328-330 (2001)
- [3] Hernandez-Garcia, J.C., Pottiez, O., Estudillo-Ayala, J.M. Laser Phys, (2012) 22: 221. doi:10.1134/S1054660X1123006X
- [4] 住村和彦, 西浦匡則著, ” 解説 ファイバーレーザー -基礎編- ”, オプトロニクス社
- [5] N. J. Doran and David Wood, Optics Letters **13**, 56-58 (1988)
- [6] Shay Keren *et.al.*, Opt. Lett. **27**, 125-127 (2002)
- [7] Hernandez-Garcia, J.C., Pottiez, O., Estudillo-Ayala, J.M. Laser Phys, (2012) 22: 221. doi:10.1134/S1054660X1123006X
- [8] Søren Dyøe Agger and Jørn Hedegaard Povlsen, OPTICS EXPRESS , **14**, No. 1, 50-57, 2006