

非線形偏波回転を用いた

ソリトンモード同期 Tm ファイバーレーザーの開発

戸倉川研究室 相楽啓

1. 序論

波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯で動作するレーザーは、LIDAR、空間通信、ガス検知、医療や加工など様々な分野への応用が可能であり、大きな注目を集めている。上記の応用において高平均出力、高パルスエネルギー、高コヒーレントな超短パルス動作することは重要な要素である。また、この波長帯では、シングルモード動作時において、現在主要となっている $1\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 帯のレーザーに比べてファイバーコア断面積の拡大が容易であるため、非線形効果の抑制が可能であり、さらなる高出力化が期待されている。さらに一般的にこの波長域の光はシリカガラスファイバーに対して異常分散領域を示すため、非線形効果である自己位相変調との釣り合いによりソリトンパルスの形成が可能である。そこで、私は非線形偏波回転を用いたリング型共振器構成により波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯で動作するソリトンモード同期 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 と表記)をファイバーのコアに添加したものが Tm 添加ファイバーである。Tm は波長 $793\ \text{nm}$ の光で励起を行うことで、波長 $1.9\sim 2.1\ \mu\text{m}$ の光を放出するための利得媒質として優れてい

る。このため高出力な $\sim 800\ \text{nm}$ の LD による直接励起が可能といった利点を有している。Tm イオンのエネルギー順位を図 1 に示す。図 1 のように隣接する Tm イオンとのエネルギー交換を行うクロス緩和と呼ばれる緩和過程により、1つの電子の励起で、2つの光子が得られるような量子効率が 2 の動作が可能である。また、Tm シリカガラスファイバーにおける $3F_4\sim 3H_6$ のエネルギー準位間の放出断面積及び吸収断面積を図 2 に示す。放出断面積が $1600\sim 2100\ \text{nm}$ の幅広い放出断面積を有しているため、フェムト秒オーダーの超短パルスの生成が可能となっている。

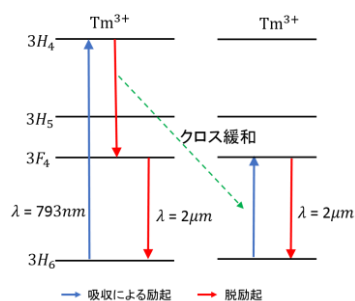


図 1 Tm³⁺のエネルギー準位[1]

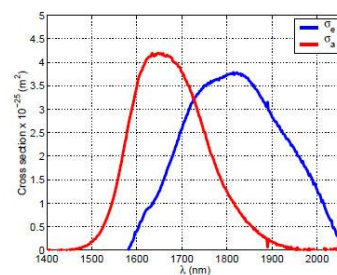


図 2 Tm シリカガラスファイバーの放出断面積及び吸収断面積[2]

2.2 非線形偏波回転

光パルスが光ファイバー中を伝搬すると、非線形光学効果である自己位相変調と相互位相変調によって、パルスに軸方向で異なる位相変化が生じ、偏光状態が変化する。これは非線形偏波回転と呼ばれ、これを利用し、偏光状態を制御することでモード同期を得ることができる。偏光制御素子としては波長板である $\lambda/4$ 板、 $\lambda/2$ 板及び偏光依存型ビームスプリッター(PBS)を組み合わせることでモード同期が可能である。図3に非線形偏波回転モード同期ファイバーレーザーの例を示す。ファイバー伝搬後では、光強度の高いパルス成分とCW状態である光強度の低いパルスの裾部分では偏光状態が異なっている。そこで、パルス成分はPBSを透過させ、CW成分にはPBSで反射させることで、CW成分にパルス成分よりも大きな損失を与えるような波長板の組み合わせをすることでパルス発振を抑制し、選択的にパルス発振を得ることができる。

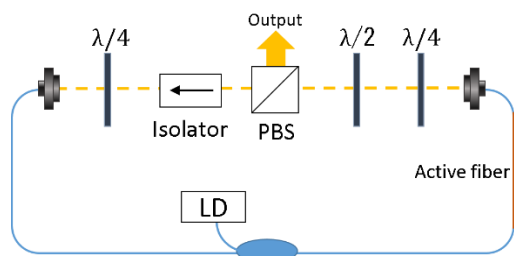


図3 非線形偏波回転を用いたモード同期ファイバーレーザー共振器の例

3 実験

3.1 実験方法

本研究では非線形偏波回転を用いてリング型共振器を構成した。実験系を図4に示す。使用した T_m 添加ファイバーはダブルクラッド

ドファイバーでコア径 $10\ \mu\text{m}$ 、クラッド径 $100\ \mu\text{m}$ 、添加濃度 2Wt.%、NA:0.14、長さ 2 m である。発振波長 $793\ \text{nm}$ のレーザーダイオード(以下 LD 表記)を用い励起コンバイナーに通してこの T_m 添加ファイバーを後方励起した。非線形偏波回転を得るためにシングルモードファイバー(以下 SMF と表記)をコンバイナーの後に 11.5 m 融着した。使用した SMF は CORNING 社の SMF28 でコア径 $8.2\ \mu\text{m}$ 、クラッド径 $125\ \mu\text{m}$ 、NA が 0.14 である。また、それぞれのファイバーの端面には APC ファイバーを融着することでフィードバックを防ぎ、寄生発振を抑制している。SMF28 ファイバーからの出射光は焦点距離 $f = 4.6\ \text{mm}$ のレンズによりコリメートさせ、 $\lambda/2$ 板、 $\lambda/4$ 板、アイソレータ、 $\lambda/2$ 板を透過し、金属ミラーで反射させ、 $f = 4.6\ \text{mm}$ のレンズで集光しファイバーに再結合させている。また、アイソレータにより光は図1中時計回りの一方向性を持たせ、出力はアイソレータの入口側にある偏光ビームスプリッターから取り出した。モード同期発振が得られるように各種波長板及び励起パワーをそれぞれ調整した。

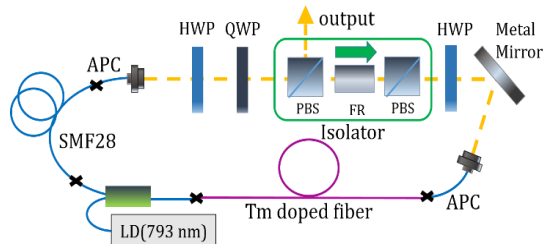


図4 非線形偏波回転を用いたソリトンモード同期 T_m ファイバーレーザー

3.2 実験結果

励起パワーが 1.54 W 時において、モード同期を得ることができた。この時の平均出力は 1.2 mW である。さらに、励起パワーを上げ、波長板の調整を行ったところ、励起パワー 3.1 W 時において、平均出力 101.1 mW、中心波長 19886 nm、パルスエネルギー 8.0 nJ のパルスを得ることができた。この時のパルス列を図 5、6 に示す。

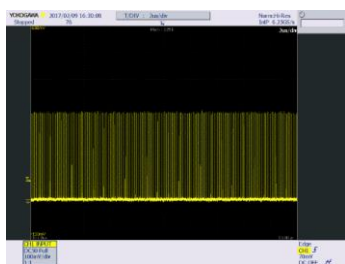


図 5 パルス列(2 μs/div)

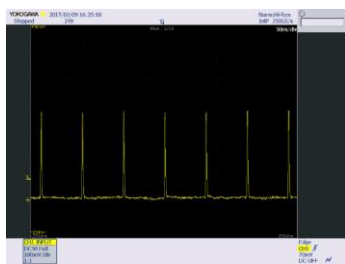


図 6 パルス列(50 ns/div)

このように非常に綺麗なパルス列を得ることができた。また、この安定なモード同期状態は 3 時間ほど経過しても、崩れることはな

かった。また、モード同期時における出力特性の一例を図 7 に示す。スロープ効率 は 5.9% であり、波長板を調整することなく、励起パワーを上げていくと平均出力が 29.5~98.3 mW までモード同期状態を保つことができた。励起パワーを上げていく際に、モード同期が崩れてしまうこともあったが、励起パワーを上げ下げすることで再びモード同期を得ることができた。

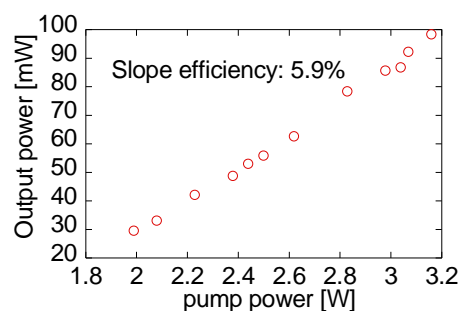


図 7 出力特性(モード同期時)

スペクトルを図 8 に示す。中心波長は 1986.5 nm であり、中心波長の両側に細かな構造が乗った非常に大きなサイドバンドが確認された。しかし、これはソリトンモード同期においてよく報告されているケリーサイドバンドと呼ばれるものとは、幾つか異なる点があり、それとは違うものではないかと考えている。次に自己相関計を用いてパルス幅の測定を行った。測定した自己相関波形を図 9 に示す。平均出力 101.1 mW 時において、 sech^2

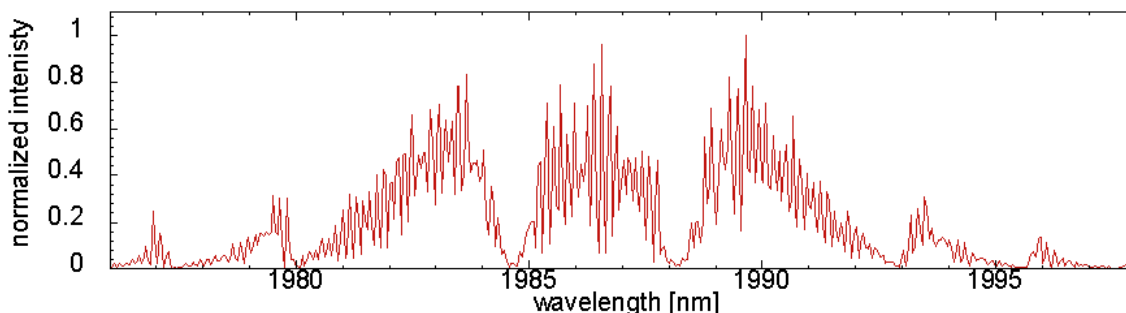


図 8 スペクトル(101.1 mW 時)

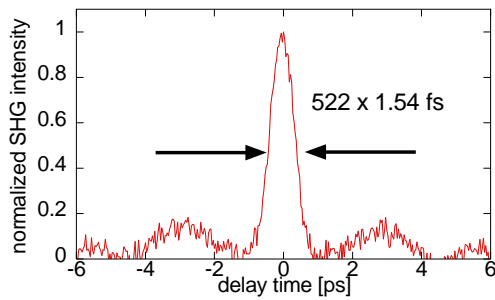


図9 自己相関波形(101.1 mW時)

型のパルスを仮定すると 522 fs のパルス幅を得ることができた。また、パルスの中心部の両側にマルチパルスのような構造が確認できた。そこで、スペクトルとの相関を考えると、サイドバンドの構造が中心部から約 4 nm 離れたところに確認できる。そこでその中心波長からの距離を $\Delta\lambda$ とすると、それに対応した周波数幅 $\Delta\nu$ は、次式で表すことができる。

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \nu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} c \quad (1)$$

これから、周波数 $\Delta\nu$ は 3×10^{11} Hzと算出され、この逆数を求めることで、自己相関波形における中心からの時間 Δt が表される。計算を行うと、 $\Delta t = 3$ psという値が得られた。このことからスペクトル上のサイドバンド構造が時間軸上での構造と一致していると理解できる。つまり、サイドバンドの構造が、自己相関波形に現れているマルチパルスに寄与しているのではないかと推測される。次に RF スペクトルの測定を行った。測定結果を図 10 に示す。S/N 比が 55 dB の繰り返し周波数に対応したパルスのみが確認できた。

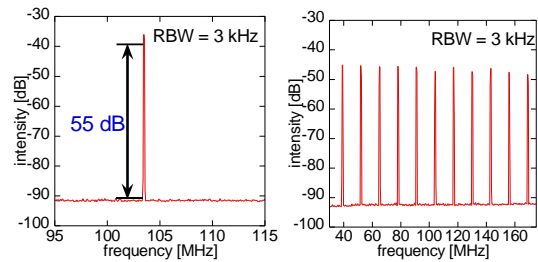


図10 RF スペクトル(101.1 mW時、
左図：span25 MHz、右図：span150 MHz)

4 結論と今後の展望

本研究では、非線形偏波回転を用いたソリトンモード同期 Tm ファイバーレーザーの開発を行った。現在得られている最大平均出力は 101.1 mW(3.1 W 励起時)、繰り返し周波数は 12.6 MHz、シングルパルスを仮定すると 8.0 nJ のパルスを得ることができている。モード同期において得られているスペクトル上には細かな構造が乗った非常に大きなサイドバンド構造が確認されている。そこで、今後はこの構造の分析を含め、共振器内に正常分散ファイバーを組み込んだ実験を行う予定である。また、更なる高出力化及び短パルスを目指す。

5 参考文献

- [1] 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
- [2] Søren Dyøe Agger and Jørn Hedegaard Povlsen, *Optics Express* **14**, No.1, 2006, 50-57
- [3] Hui Liu, Zhanwei Liu, Erin S. Lamb, and Frank Wise, “Self-similar erbium-doped fiber laser with large normal dispersion”, *Opt Letter*, **36**(19), 1019-1021, (2014)
- [4] Yuxing Tang, Andy Chong, and Frank W. Wise, “Generation of 8 nJ pulses from a normal-dispersion thulium fiber laser”, *Opt Letter*, **40**(10), 2361-2364