

Tm 添加正常分散シリカファイバーを用いた 波長 2 μm 帯モード同期レーザーの分散依存性評価

戸倉川研究室 平山貴之

1. はじめに

ファイバーレーザーはその導波路構造によって小型・堅牢かつ高効率・高出力な動作が可能であるが、モード同期による超短パルス動作においては、非線形光学効果によってその性能が制限され易い。共振器の分散値を制御しモード同期の状態を散逸ソリトンモード同期やストレッチモード同期とすることによってこの制限を緩和することが可能である。このとき利得ファイバーを正常分散にすると、増幅動作中のソリトン圧縮を抑制することができ、さらに非線形光学効果が抑制できる。しかし波長 2 μm 帯では一般的なシリカファイバーは大きな異常分散を有し、利得ファイバーとして実用的なコアサイズで正常分散を得ることは難しかった。

我々は W 型屈折率分布による導波路構造によって波長 2 μm で正常分散を示すシリカガラスファイバーを用いたモード同期レーザーの開発を行いパルス幅 300 fs 程度得ることに成功していたが[1]、2021 年に我々と同様な共振器構成でありながら異常分散利得ファイバーを用いたストレッチパルスモード同期レーザーにおいて 74 fs 以下のパルス発生が報告された[2]。我々は正常分散の利得ファイバーを利用しており、最適化によってこれを超える超短パルス動作も期待される。そこで本研究では共振器中のファイバー間の融着条件や分散値の最適化のもとモード同期レーザー実験を行った。

2. 原理

2-1. 波長分散

波長分散とは、光波の位相速度が波長に依存する現象のことである。超短光パルスは多数の周波数の光の位相が揃った状態で得られており、この波長

分散の影響を受けるとパルス形状の変化、パルスの広がりが起きてしまう。

光ファイバーにおける分散は材料分散と導波路分散にわけることができ、それらの和が波長分散となっている。波長分散は分散性媒質の屈折率が波長依存性を持つことに起因する。媒質の共鳴周波数から十分離れた周波数では、屈折率は以下のセルマイヤ方程式で表される。

$$n(\lambda)^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - (l_i)^2} \quad (1)$$

2-2 W 型屈折率による分散制御ファイバー

本実験で使用した Tm ファイバーの屈折率分布を図 1 に、分散曲線を図 2 に示す。一般的なステップインデックス型と異なり、コアの隣に屈折率の

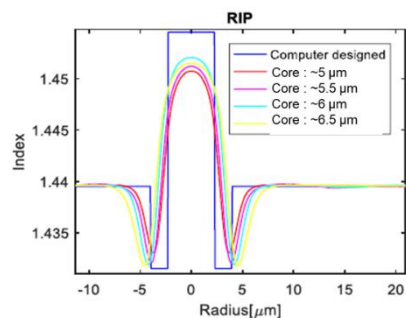


図 1. W 型屈折率分布[3]

矩形：デザイン、曲線：実測測値

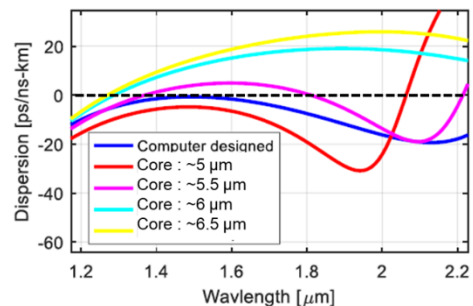


図 2. 各コアサイズにおける分散曲線[3]

低いトレンチクラッドが存在している。コアを伝搬する際に染み出した光がここを伝搬することによって実効屈折率が低下するが、この染み出しは長波長になるほど大きくなるために長波長の光ほど実効屈折率が低下し、正常分散の効果を得ることができる。

2-3 非線形偏波回転

パルスが光ファイバー中を伝搬すると、非線形光学効果によって複屈折が誘起され直交する偏光成分に位相差が生じる。この偏光成分の変化が光強度に依存することを利用してモード同期を得るのが非線形偏波回転である。図3に非線形偏波回転を用いたモード同期の概念図を示す。光ファイバー中を伝搬した光は、光強度に依存して偏光回転が発生した状態となっている。この光を、波長板によって偏光状態を変えた後に PBS を透過させた後に共振器の光ファイバーに再結合する。この際に光強度が低い部分は PBS において大きな損失を生じ逆に光強度の高い部分は PBS において低い損失を生じるように波長板を制御することによって、モード同期作を得ることができる。

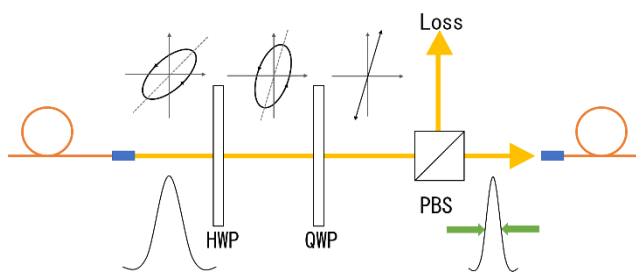


図3. 非線形偏波回転によるモード同期概念図

3. 実験

3-1. モード同期レーザー実験構成

実験構成を図4に示す。共振器はリング型であり利得ファイバーとして、前述の Tm 添加正常分散シリカファイバー(NDTF)を用いた。この NDTF を、波長 1.55 μm の Er:Yb fiber MOPA で、WDM を通して後方励起した。WDM は異常分散を有する SMF28 で作られており、NDTF のみでは共振器全体が大きな異常分散となってしまうため、これを補正するた

めに、波長 2 μm 帯で正常分散を示す UHNA7 を融着した。UHNA7 と WDM の両端には寄生発振防止のため SMF28 を使用した APC パッチコードが融着されている。各ファイバーの長さを調整することによって、分散量や非線形光学効果の大きさを制御可能であり、今回 SMF28 の長さを調整し共振器全体の分散量を制御している。

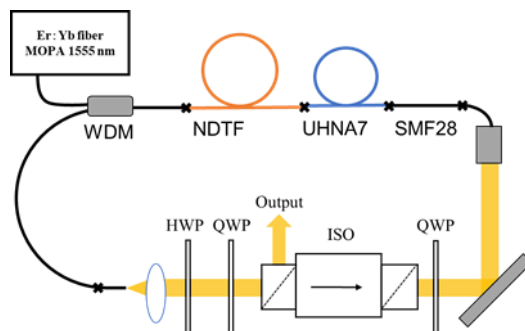


図4. 実験構成

3-2. 融着条件の改良

共振器中の光ファイバーの各パラメータは表1となっており、コアサイズ、NA の異なるファイバーが使用されている。コア径が異なるファイバー同士の融着については、融着条件によって損失が大きく変化することが知られている、融着の際の放電時間を長くするとコアからクラッドに不純物として含まれるイオンの拡散が促され、実効的にコア径が広がり融着損失を減らすことが知られている。そこで、各ファイバー間の融着を放電時間を増加させ複数回行い、その都度レーザー出力を測定した。このとき NDTF と WDM 側の SMF28 の間の融着において、融着条件によって出力が大きく揺らぎが観測された。何度か融着を行ったところ最終的に表2のような出力の変化が見られた。再融着前後で出力が30%ほど向上したことから、融着状態の改善が為されたと考えられる。

表1. 共振器中の各ファイバーパラメータ

Fiber	SMF28	NDTF	UHNA7	Total
Core size (μm)	~8	~5	~2.4	-
N.A.	0.14	0.24	0.41	-
Dispersion (ps^2/m)	-0.007	0.02	~0.04[4]	~0.124 (ps^2)
Length (m)	1.8	4.4	3.7	~10.0

表 2. 融着前後におけるレーザー出力の励起出力依存

	610 mW 励起時の レーザー出力	700 mW 励起の レーザー出力
先行研究[1]	55 mW	74 mW
融着前	50 mW	66 mW
融着後	64 mW	87 mW

3-3. 分散値 0.124 ps²時のモード同期実験

再融着によってファイバー長が変化し、共振器の総分散量は 0.124ps²となった。この時の出力特性は図 5 に示されスロープ効率 22 %、700mW 励起時に最大出力 87 mW を得た。

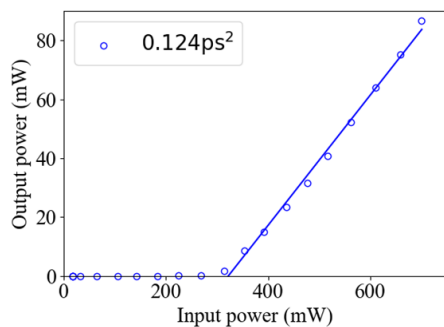


図 5. 出力特性

この状態で三枚の波長板の角度を調整することで、モード同期発振を試みた。この時、図 6、図 7 に示される時間波形が計測された。また、その時のスペクトルを図 8 に示す。図 6 に示されるように短時間での不安定なパルス発振を得ることができたものの、図 7 のようにロングスパンで見ると不安定な挙動となっており、安定したモード同期を得られたとは言えない。また、スペクトルを見ると二波長の成分が見えていることからこれらの波長のビートのようなものが見えていたものと考えた。モード同期を得られなかった原因として、正常分散量が大き

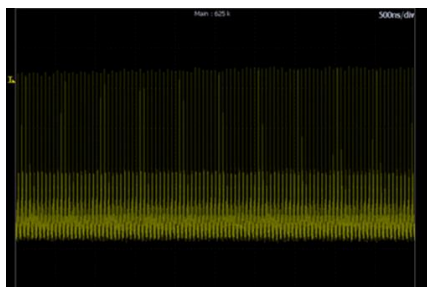


図 6. 分散値 0.048 ps²の時の出力波形(500 ns/div)

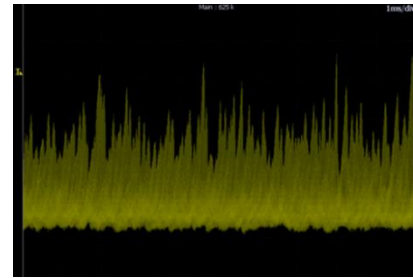


図 7. 分散値 0.048 ps²の時の出力波形(1 ms/div)

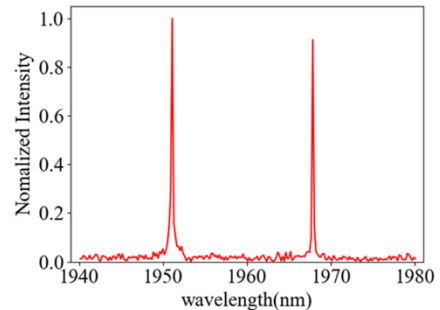


図 8. 分散値 0.048 ps²のスペクトル

すぎてパルスが崩壊してしまったこと、共振器長が短く非線形偏光回転量が小さいことを考えた。

3-4. 分散値 0.048 ps²時のモード同期実験

正常分散量を減少させるとともに、共振器長を長くして非線形偏光回転量を大きくするために、SMF28 を追加で 1 m 融着した。表 3 に、SMF28 を追加した後の共振器の各パラメータを示す。

表 3. SMF28 追加後の各ファイバーパラメータ

Fiber	SMF28	NDTF	UHNA7	Total
Dispersion (ps ² /m)	-0.007	0.02	~ 0.04[4]	~ 0.048 (ps ²)
Length (m)	2.8	4.4	3.7	~ 11.0

この時の出力特性は図 9 のようである。取り出し効率最大の状態で出力を測定し、スロープ効率

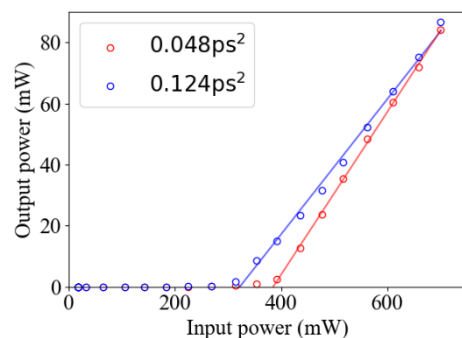


図 9 分散値を変化させた時の出力特性比較

26 %、700 mW 励起時に最大出力 84.2 mW を得た。この状態で波長板を調整してモード同期を試みた。出力の時間波形を図 10、11 に示す。また、スペクトルを図 12 に示す。この時、モード同期に近い波形を得ることができたものの、数分程度で波形が崩れてしまい長時間の安定したモード同期発振を得ることができなかった。また、スペクトルを見ると 0.124 ps²の時と同様に二波長の成分が見えていることから、二成分のビートのようなものが見えていると判断した。

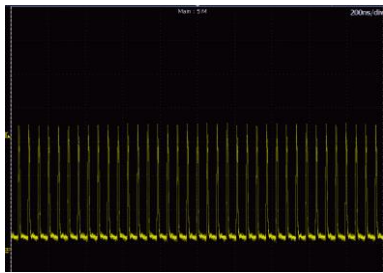


図 10 分散値 0.048 ps²の時の出力波形(200 ns/div)

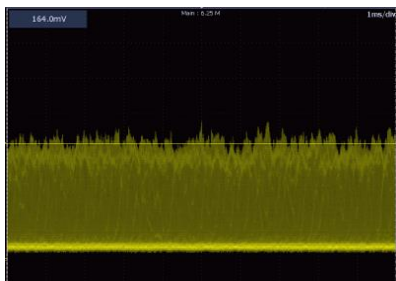


図 11 分散値 0.048 ps²の時の出力特性(1 ms/div)

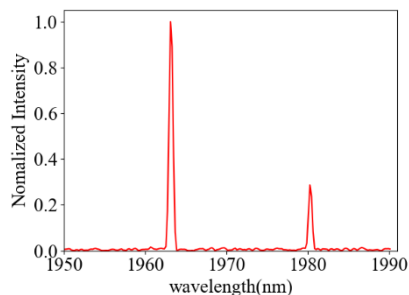


図 12 分散値 0.048 ps²のスペクトル

4. 考察

安定したモード同期を得られなかった要因として、利得ファイバーが外的要因に敏感であること、共振器の分散値および共振器長が最適でないことを考え、改善策としてファイバーの保持状態の最適化、共振器の分散値を 0 分散近傍にすることによる、共振器の最適化を考えた。また WDM

を無くし励起光を自由空間結合することによって共振器損失の低下と全分散量の低下が起これ、モード同期発振の実現が期待されるが、その場合は自由空間結合の増加による長期動作の不安定性が発生してしまうと考えられる。

4. まとめ

W 型屈折率分布 Tm 添加正常分散シリカファイバーを用いた波長 2 μm 帯レーザーについて、融着条件の改良および分散値依存性を評価した。まず、各種ファイバーの再融着を行い、先行研究[1]とくらべて出力が 15 %ほど増加し融着条件を改善することができた。また、共振器の分散値を変化させて、非線形偏波回転によるモード同期を試みたところ不安定なパルス発振を得ることができたものの安定したモード同期を得るには至っていない。今後は共振器の分散値および共振器長などのパラメータを変えることによって一層のパワースケーリングおよび短パルス化を目指す。

5. 参考文献

- [1] 佐藤匠(2021) Tm 添加分散シリカファイバーを用いた波長 2μm 帯モード同期発振器の開発とその高出力化 電気通信大学大学院基盤理工学専攻修士論文(未刊行)
- [2] Jinzhang Wang, et. al. "Generation of few-cycle pulses from a mode-locked Tm-doped fiber laser", Opt. Lett. Vol.46,2445-2448, 2021
- [3] Yuhao Chen, et al. "Normal dispersion thulium fiber for ultrafast near-2 μm fiber laser", CLEO 2018, AM2M2, 2018
- [4] Piotr Ciąćka, et al, "Dispersion measurement of ultra-high numerical aperture fibers covering thulium, holmium, and erbium emission wavelengths", Journal of the Optical Society of America B, Vol.35, 1301-1307, 2018