

非線形偏波回転モード同期レーザーの 波長板角度依存性評価

1810298 佐藤航希

1 はじめに

一般的にファイバーレーザーで使用されるシリカファイバーでは、波長 $2\ \mu\text{m}$ で材料分散が大きな負分散を示すが、本研究では、波長 $2\ \mu\text{m}$ で材料分散が小さい ZBLAN ファイバーを使用することで、波長 $2\ \mu\text{m}$ 下で共振器全体が正常分散となるような共振器を組んだ。

モード同期ファイバーレーザーから得られるパルスのエネルギーは共振器の分散量に大きく依存し、一般に共振器内の分散値が高いほど、パルスのエネルギーが大きくなる。正常分散下では、SPM、分散ともにパルスに正のチャープを与える。よって時間幅は長いものとなり、非線形光学効果が抑制されるため、パルス全体で高いエネルギーを蓄えることが出来る。これにより、ソリトンやストレッチパルスでは実現できなかった、数 $10\ \text{nJ}$ のオーダーのエネルギーを得ることが可能となる。

本研究の先行研究 [2] では、Tm:ZBLAN ファイバを用いた、全正常分散下でのモード同期が確認され、スペクトル幅 $\sim 35\ \text{nm}$ を得られている。しかし、得られたパルス発振は不安定であり、またダイクロミックミラーによる長波長成分の損失を受けていることが課題点として挙げられた。本実験では、以前の実験系を変更することでより短パルスでの発振を目指した。励起パワー、波長版を調整することでいくつかのパルス発振が確認できたが、いずれのパルスも Q スイッチであった。よって今後のモード同期実験を建設的に進めるため、特徴的な発振が確認できる時の波長板角度、また出力の依存性を確認した。[1][6]

2 Tm^{3+} の励起-発光過程

Tm^{3+} 添加ファイバーは図1の「ツリウムのエネルギー準位図」より、波長 $793\ \text{nm}$ 付近の光が入射されたとき 3H_6 から 3H_4 へ励起される。一方、 3H_4 からの緩和過程では隣接する Tm イオンの励起に寄与する。 3H_4 から 3F_4 へ非発光で遷移することで、隣接するイオンの 3H_4 イオンを 3F_4 へ上げる。励起された 3F_4 のイオンが、 3H_6 へ緩和する際に $2\ \mu\text{m}$ 帯の発光を行う。これらはクロス緩和と呼ばれ、光子1つに対し2つの光子を引き上げるため、高い量子効率となる。[5]

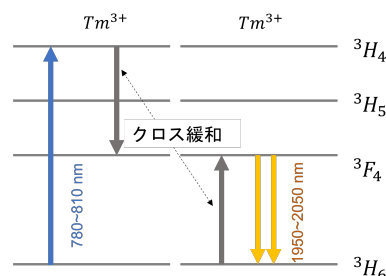


図 1. ツリウムのエネルギー準位図

3 フッ化物ファイバ

フッ化物ガラスとは ZrF_4 系 AlF_3 系などの他成分で構成されるガラスであり、石英ガラスと比べ、フォノンエネルギー半分程度であるため、長波長帯域への透過を許し、また多フォノン緩和速度は低下するために、輻射遷移の確立が高い。本研究では ZrF_4 系を主成分とする ZBLAN ($\text{ZrF}_4 - \text{BaF}_2 - \text{LaF}_3 - \text{AlF}_3 - \text{NaF}$) を使用した。

3.1 モード同期

レーザー光の特徴は、光子の誘導放出による光のコヒーレンスにあるが、通常、共振器で発振しているレーザーはいくつかの縦モードを有しており、縦モード間の位相はそれぞれランダムである。そこで、モード同期法と呼ばれるようなレーザー共振器の光周回時間と同じ周期で変調を加える手法を用いることで、縦モード間の位相が揃いパルスが得ることが出来る。レーザー光をパルス発振させる方法として、直接変調法や Q スイッチ法などがあげられるが上記の方法では得られるパルス幅がそれぞれ $\mu\text{s} \sim \text{ms}$, $\mu\text{s} \sim \text{ns}$ である。一方本研究で目指した、モード同期法では $\text{fs} \sim \text{ps}$ と非常に短いパルス幅を得られる。[3]

4 非線形偏波回転による受動モード同期

ファイバー内を伝播するパルスは、光の強度に起因して位相変調を受ける。光パルスを軸方向に分解したときに、直交する偏光成分が異なる強度であれば、それぞれの位相は異なる変調量となるために位相差が生じる。この各偏光の位相変調の様子は偏光の回転のように見えることから非線形偏波回転と呼ばれ、この現象はモード同期を得る手法として使われる。[4]

以下の図2のように、波長版を調整することでパルス、CW 成分をそれぞれ S, P 偏光で分けると、PBS は S 偏光を反射させ、P 偏光を透過するために、強度の高いパルス成分は共振器を周回し、強度の低い CW 成分は取り出される。こうして非線形偏波回転により生じた偏光を制御することで CW 発振を抑え、パルス発振を得る事が出来る。

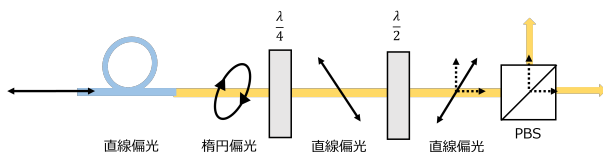


図 2. 波長版による偏光の操作

5 実験系

本実験では図3で示される共振器の構成で実験を行った。

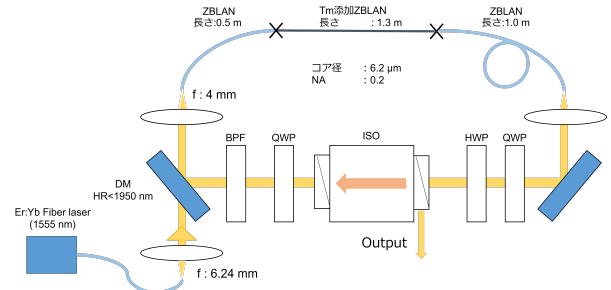


図 3. 本実験の共振器（前方励起）

利得ファイバーには Tm:ZBLAN ファイバー（コア径: $6.2 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 、NA: 0.2、 $l=1.3 \text{ m}$ 、 $\text{GVD} \sim 5500 \pm 2000 \text{ fs}^2/\text{m}$ ）を用いた。

利得ファイバーの両端には、前方に 0.5 m、後方に 1 m のシングルモード ZBLAN ファイバー（コア径: $6.2 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 、NA: 0.2）をそれぞれ機械的に接続した。共振器に組み込まれるこれらの ZBLAN ファイバー全長の分散値は、 $126500 \pm 4600 \text{ fs}^2$ である。励起光源には 1555 nm Er:Yb ファイバーレーザーを利用し、ダイクロイックミラー（DC）を透過させ Tm:ZBLAN ファイバーの励起を行った。レーザー発振はアイソレータにより、図版時計周りに一方向性を持たせ、アイソレータの入口側にある偏光ビームスプリッタから出力を取り出している。また、共振器一周で生じるスペクトル広がりを補償するためにバンドパスフィルター（BPF）をレーザー光がファイバーに再結合される前の位置に挿入した。

実験では、バンド幅の異なる 3 種類のフィルター {C:1870 nm、BW:35 nm} or {C:1912 nm、BW:10 nm} {C:1928 nm、BW:11 nm} (C: 透過中心波長、BW: Band Width) をそれぞれ用いて実験を行った。

共振器の出力特性を確認するため、BPF 無しの場合と BPF: 1870 nm ,1912 nm ,1928 nm の3 枚、それぞれの条件で測定したものを図4~7に載せる。以前の共振器で得られていた出力と、反時計回りに変更した共振器のスロープ効率を表1にまとめる。

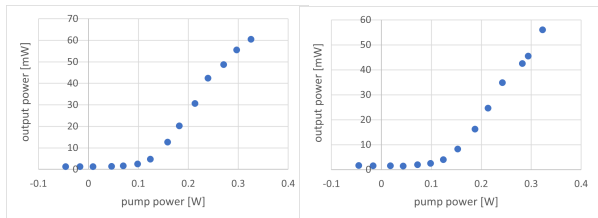


図 4. BPF 無し

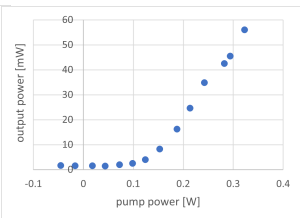


図 5. BPF:1870 [nm]

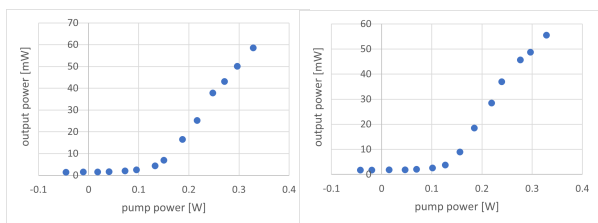


図 6. BPF:1912 [nm]

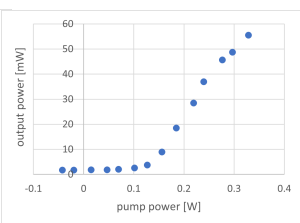


図 7. BPF:1928 [nm]

各 BPF での出力特性のグラフ

表 1: 各共振器の出力特性の比較

BPF 中心波長 [nm]	無し	1870	1912	1928
以前の共振器 [%]			24.8	25.1
本実験の共振器 [%]	29.3	26.5	28.9	25.6

表1より、共振器を修正した後も同等の出力特性が得られている。波長板の位置によって出力の最大値は変化するため、多少の変化については興味がない。またモード同期が実現した時の繰り返し周波数は共振器長から光速を割ったものであるが、共振器長はZBLANファイバの屈折率は波長1~2 μm の範囲で1.5程度であるため $NL = (0.5 + 1.3 + 1.0) \times 1.5 + 0.4 = 4.6$ から繰り返し周期は

$$T = \frac{NL}{c} = \frac{4.6}{2.9 \times 10^8} \frac{[m]}{[m/s]} = 1.58 \times 10^{-8} [s]$$

であり、16 ns 付近の繰り返し周波数をもってモード同期の判定をした。

励起パワーを変更し、波長板を回転することで3種類の各バンドパスフィルタから特徴的なパルス発振が得られた。本紙では、BPF(λ_c :1870 nm:BW: 35 nm) 挿入下での、励起パワー 331[mW],460W[mW] 時、それぞれのパルス発振時のパルストレインとスペクトルを載せた。また、これらのパルスに加え、各BPFで確認できたパルス発振の周期とスペクトルの中心波長を表2まとめる。

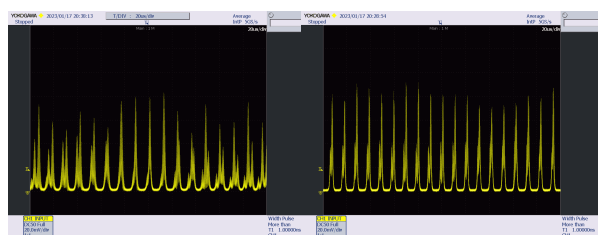


図 8. 331 [mW] 励起時 図 9. 460 [mW] 励起時

パルストレイン 20 μs/div BPF(1870 nm)

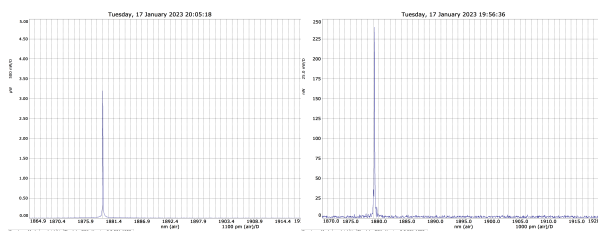


図 10. 331 [mW] 励起時 図 11. 460 [mW] 励起時

スペクトルの変化

表 2: 各 BPF で得られたパルスの周期と中心波長

BPF 波長 [nm]	1870		1912		1928	
入力電力 [mW]	331	460	334	456	334	456
パルス周期 [μ s]	11.8	10	14.28	11.11	12.5	9.09
中心波長 [nm]	1879	1879	1904	1900	1887	1887

本実験で得られたパルス発振の繰り返し周波数は μ s のオーダーであり、これは期待するモード同期の繰り返し周波数 16 ns とは明らかに異なるため、Q スイッチ発振と考えられる。上記のようなパルス発振が引き起こされるような波長板の角度は広く許されている。発振条件と出力電力の相関を、また波長板の角度と偏光ビームスプリッタから取り出している光出力の関係を調べるため、BPF=1912 [nm], W_{in} =331 [mW] に固定して波長板の角度と出力の関係を測定した。この関係を見るため測定したデータから 3d プロットしたものを図 12 に載せる。図 13 では、図 12 を色付き等高線で表示し、発振を確認した角度の条件を黒枠で追加している。

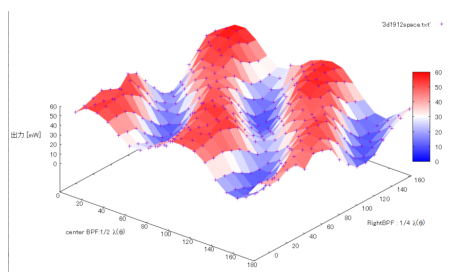


図 12. 波長板の回転と出力の関係

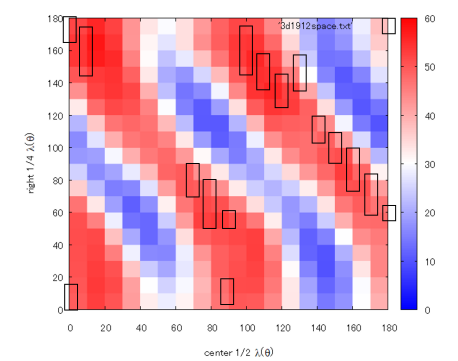


図 13. 発振条件と出力電力の相関

6 結論

本実験ではリング共振器を時計回りから反時計回りに変更し、ダイクロイックミラーでの狭窄を抑制することで、短パルスでの発振を目指した。3 種類の BPF (中心波長 1870, 1912, 1928 nm) を使用し、それぞれ出力は 50, 60 [mW] と以前の共振器系と同等の特性が確認できている。また、励起光パワーと波長板を調整することで 3 種類の BPF から、それぞれパルス発振が得られているが、いずれもパルス間隔は数 10 μ s であり、モード同期として期待されるパルス間隔である 数 10 ns と異なる。

このような Q スイッチと考えられるパルス発振が得られるときの波長板の角度条件を明らかにするため、励起出力を固定して波長板を回転させたときの出力データ、またパルス発振が得られた条件を確認した。これらの測定データは、出力が周期的な特性を持つこと、またパルス発振が高出力部分で起きることを示している。

現在、この相関関係から、モード同期パルス発振が期待できる波長版の角度の組み合わせを試行しながら、出力と波長板の角度の関係を明らかにし、広帯域でのモード同期レーザーの開発を目指す。

参考文献

- [1] 相楽啓 ”ZBLAN ファイバーを用いた波長 2 μ m 帯全正常分散モード同期ファイバーレーザーの開発” 電気通信大学修士論文 (2020)
- [2] 小澤一朗 ”ファイバー増幅用全正常分散 Tm:ZBLAN モード同期ファイバーレーザー光源の波長最適化” 電気通信大学卒業論文 (2021)
- [3] 宅間宏 著、”レーザーの話” 出光科学叢書 (1971)
- [4] 國分泰雄 著、”光波光学” 共立出版 (1999)
- [5] 住村和彦 西浦匡則 著 ”ファイバーレーザー基礎編” オプロニクス社 (2011)
- [6] Nomura, Yutaka & Fuji, Takao. (2016). Efficient chirped-pulse amplification based on thulium-doped ZBLAN fibers. Applied Physics Express. 10. 012703. 10.7567/APEX.10.012703.