

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

戸倉川研究室 小澤一郎

1. はじめに

モード同期ファイバーレーザーは狭いコアの中に光が閉じ込められるため非線形光学効果の影響を受けやすく、それにより出力が制限されてしまう。この影響を抑制するため、共振器内の分散を異常分散から正常分散領域に近づけていくことで出力スケールリングが向上されてきた。しかし、波長 2 μm 帯では一般的に使用される石英ファイバーでは材料分散の異常分散値が大きく、正常分散領域でのモード同期発振が困難であった。そこで、導波路分散を制御することで波長 2 μm 帯において正常分散を示すことが可能になる ZBLAN ファイバーを使用した。本研究室における先行研究[1]では、すでに全正常分散 Tm:ZBLAN モード同期レーザーの開発を達成しており、パルスエネルギー 0.8 nJ、スペクトル幅 ~80 nm(中心波長 1880 nm)のパルスを得ることに成功している。本研究では、更なる高出力化のため、これをダブルクラッド Tm:ZBLAN ファイバーを用いてファイバー増幅することを検討した。そのため、モード同期レーザー光源の動作波長を増幅器に最適な波長 1900 nm 以上で動作するよう改良を行った。

2.1 全正常分散モード同期

モード同期ファイバーレーザーは非線形光学効果の影響を抑制するために、共振器内の分散値をコントロールすることで様々なモード同期レーザーが開発されてきた。代表的なソリトンモード同期は、共振器の分散が常に異常分散領域であり、異常分散

による負チャープと自己位相変調による正チャープのつり合いによりパルスを得る。ソリトンモード同期よりも高出力化を目指して開発されたのがストレッチパルスモード同期であり、これは共振器内に正常分散と異常分散を持つ素子をそれぞれ組み込み、共振器全体での分散値が 0 になるように構成されたものである。そして、すべての光学素子が正常分散を持つ素子で構成された全正常分散モード同期により、ソリトンやストレッチパルスでは得られなかったパルスエネルギーを得ることができるようになった。全正常分散モード同期では、共振器内の正常分散および自己位相変調により常に正チャープを受け、時間幅の長いパルスが得られるため、ピークパワーを抑制したまま大きなパルスエネルギーを得ることが可能である。このチャープしたパルスを共振器外部で回折格子やプリズムを利用し圧縮することで超短パルスを得ることが可能である。全正常分散モード同期においては、共振器一周によるスペクトル広がりへの補償および定常発振を促すために、バンドパスフィルター(BPF)の挿入が必要である。

2.2 Tm:ZBLAN ファイバーレーザー

希土類元素であるトリウム(以下 Tm と表記)は波長 790 nm、1180 nm また 1550 nm 付近で励起し、1.8~2.1 μm で発光するため利得媒質として優れている。また、波長 1600~2100 nm の広い蛍光スペクトルを有していることから、超短パルスを生成することに有利な性質を持っている。

Tm³⁺の特徴として、³H₄ から ³F₄ 準位へ

比輻射緩和する際に、隣接する Tm^{3+} とエネルギーを交換し、 3H_6 にある光子は 3F_4 へ遷移される。すなわち一つの光子を吸収することで二つの光子を発光することができる。このような過程をクロス緩和といい、高濃度でドーピングすることで高い発光効率を得ることができる。

Tm 添加ファイバーの特徴の一つに、反転分布の状態により利得帯域が変化する点がある。 Tm の利得スペクトルが反転分布により変化する様子を図 1 に示す。

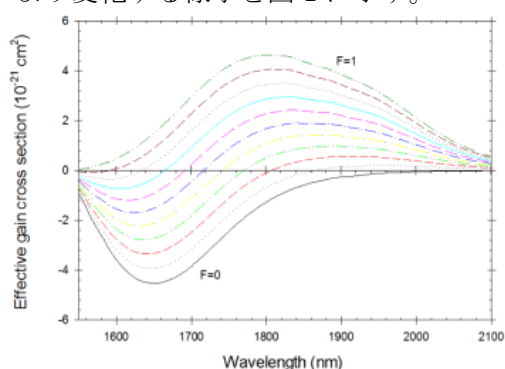


図 1. 利得スペクトル[2]

図 1 の短波長側では吸収の影響により利得が消失し、長波長側でのみ実行的な利得を持つことがわかる。本実験で想定しているのは反転分布を高め難いダブルクラッド $Tm:ZBLAN$ ファイバーを用いたファイバー増幅である。そのため、図 1 に示すように波長 1900nm 以上の長波長側でレーザー光源が必要であり、本実験ではそのための波長最適化を行った。

次に、本研究で用いた ZBLAN ファイバーについて説明していく。ZBLAN ファイバーとは、フッ化物ガラスを素材としたガラスファイバーのうち、 ZrF_4 を主成分としたものを ZBLAN($ZrF_4-BaF_2-LaF_3-AlF_3-NaF$)ガラスファイバーと呼ぶ。ZBLAN ファイバーは波長 4 μm 付近までの広い透過帯域を有し、近赤外域に加えて可視、赤外領域での発光も得られる。こうした優れた特性を持つ一方、潮解性、低機械強度、低融点といった扱いづらい特徴もある。

本研究で着目した ZBLAN ファイバーの特徴は、材料分散が中赤外領域において低い値を持っていることである。石英ガラスファイバーでは波長 2 μm 帯において材料分散の負の値が大きいため、全体で大きな異常分散値を示していた。しかし、ZBLAN ファイバーでは導波路分散を制御することで、波長 2 μm 帯において正の分散を示すことが可能である。ZBLAN ファイバーの全分散特性を図 2 に示す。

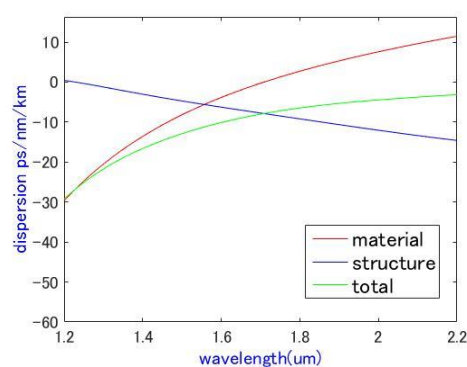


図 2. ZBLAN ファイバーの全分散特性

3.1 波長最適化実験

本実験では最初に図 3 で示される実験系①で実験を行った。

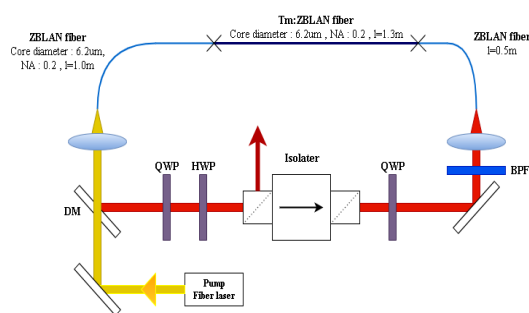


図 3 増幅用全正常分散モード同期ファイバーレーザー光源の実験系①

利得ファイバーとして $Tm:ZBLAN$ ファイバー(コア径: $6.2 \pm 0.2 \mu m$ 、 $NA: 0.2$ 、 $l=1.3m$ 、 $GVD \sim 5500 \pm 2000 fs^2/m$)を用いた。そのファイバーの両端には、1m と 0.5m のシングルモード ZBLAN ファイバー(コア径: $6.2 \pm$

0.2 μm 、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 ZBLAN ファイバー全長での分散値は、 $126500 \pm 4600\text{fs}^2$ である。励起光源として 1555nm 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)を通過させ Tm:ZBLAN ファイバーの励起を行った。本実験では、先行研究[1]よりも長波長側の中心波長をもつ2種類のバンドパスフィルター(λ_c :1912nm、BW:10nm or λ_c :1928nm BW:11nm)を用いて実験を行った。

まず、中心波長 1912nm の BPF を使用した際の実験結果について述べる。CW 発振において、スロープ効率 24.8%、最大出力 76.5mW を得た。発振波長は 1904nm であった。また、不安定ではあったが数 10 秒から数分程度の短時間の間、モード同期動作を確認した。その際のパルストレインを図 4 に、スペクトルを図 5 に示す。これによりスペクトル幅 35nm を得たが、数分の時間の経過でモード同期が解除されてしまった。

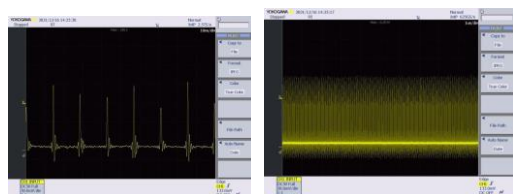


図 4. パルストレイン(左:10ns/div,右 1 μs /div)

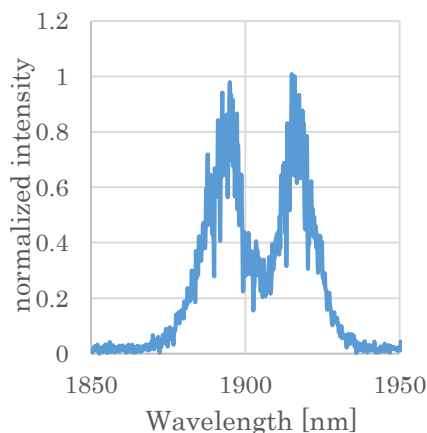


図 5. 370mW 励起時のスペクトル

次に、中心波長 1928nm の BPF を使用した際の結果について述べる。CW 発振においてスロープ効率 25.1%、最大出力 65.94mW を得た。発振波長は 1925nm であった。また、不安定ではあったが数 10 秒から数分程度の短時間の間、モード同期動作が確認された。その際のパルストレインを図 6 に、入出力特性及びスペクトルを図 7 に示す。これによりスペクトル幅 30nm が得られた。しかし、こちらも数分の時間の経過で自動的にモード同期が解除されてしまった。

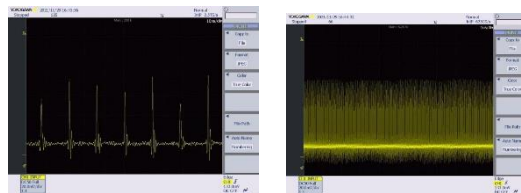


図 6. パルストレイン(左:10ns/div,右 1 μs /div)

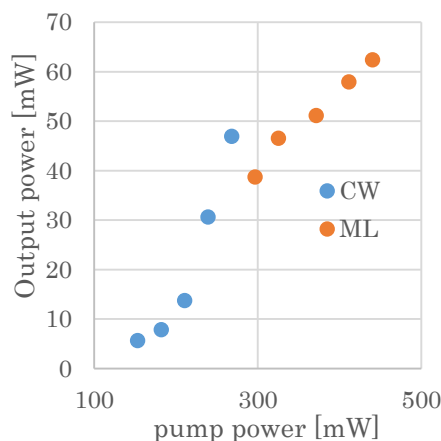


図 7. 出力特性

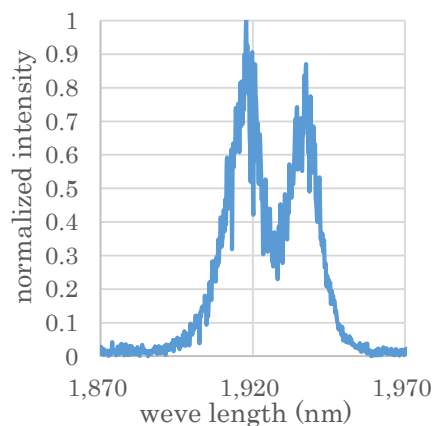


図 8. スペクトル

3.2 実験系の変更(反対周り共振器)

図 3 に示される実験系①の問題点として、ダイクロミックミラー (DC) の帯域が 1950nm までと狭く、これにより ZBLAN ファイバー中で広がったスペクトルの長波長成分が損失を持ってしまふ点があった。そのため、広がったスペクトルがダイクロミックミラーを通過する前に出力されるよう、図 9 に示される反対周りの共振器設計に変更して実験を行った。

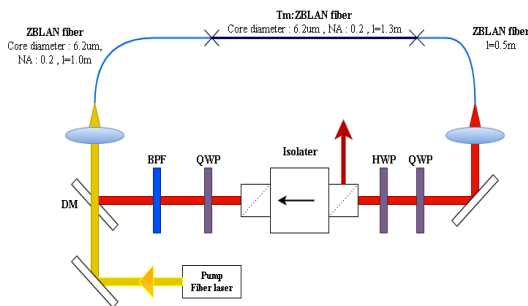


図 9. 反対周り共振器に変更後の実験系②

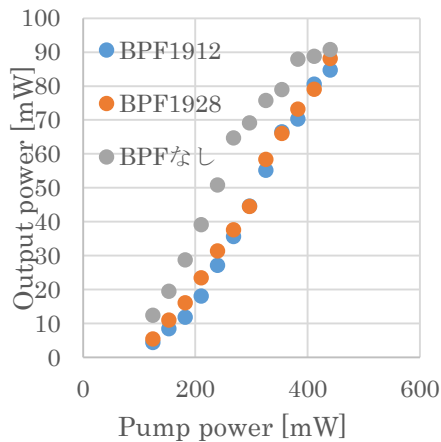


図 10. 出力特性

実験系を変更したことで、いずれの BPF を用いた場合でも CW 発振の出力は向上した。一方でモード同期動作を確認することができなくなってしまった。これは変更前の実験系①では利得ファイバーの後ろのパッシブファイバーが長さ 1m であるのに対し、変更後の実験系②では長さ 0.5m になってしまい非線形効果が低下したためであると考えられる。

4. 結論

本研究において、ダブルクラッド Tm:ZBLAN ファイバーを用いたファイバー増幅のために、全正常分散 Tm:ZBLAN モード同期ファイバーレーザーが波長 1900nm 以上で動作するよう、波長最適化を行った。

最初の実験系において中心波長 1912nm、の BPF および中心波長 1928nm の BPF 使用時に、それぞれスペクトル幅 35nm(中心波長 1905nm)、30nm(中心波長 1926nm)のパルスを得ることができたが、数 10 秒から数分で解除される不安定なモード同期であった。

安定化とさらなるスペクトルの広帯域化のため、ダイクロミックミラーの帯域を考慮し、反対周りの共振器に変更したが、こちらはモード同期発振に至っていない。これは実験系の変更により、利得ファイバーの後ろのパッシブファイバーの長さが短くなり非線形効果が低下したためであると考えられ、ファイバー長の最適化によって安定化が見込まれる。

参考文献

- [1] 相楽啓、”ZBLAN ファイバーを用いた波長 2 μm 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、(2019)
- [2] J.M.O.Daniel, N.Simakov, M.Tokurakawa, M.Ibsen and W.A.Clarkson, “Ultra-short wavelength operation of a thulium fiber laser in the 1660-1750nm wavelength band”, Optics Express, 23, 18269-18276, (2015)