

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

戸倉川研究室 相楽 啓

1. はじめに

モード同期ファイバーレーザーの出力制限にはファイバー中の非線形効果の影響が挙げられる。非線形性を抑制・制御する方法として共振器内の分散量を考慮した共振器構成が必要になり、過去に様々なモード同期が開発されてきた[Fig. 1]。代表的なモード同期であるソリトンモード同期ではパルスエネルギー 1 nJ 以下、この限界を超えることに成功したストレッチパルスモード同期では数 nJ 、さらに高エネルギー化を実現した全正常分散モード同期で波長1 μm 帯において 190 nJ [1]が報告されている。このように共振器内の分散値を調整し、発振モードを変化させることで出力スケールが向上されてきた。しかし、波長2 μm 帯のファイバーレーザーで一般的に使用されるシリカガラスファイバーは材料分散の異常分散値が大きく、上述の正常分散領域でのモード同期発振が困難であった。そこで本研究では、シリカガラスファイバーの代わりにフッ化物(ZBLAN)ファイバーを使用した。ZBLAN ファイバーは材料分散がシリカガラスと比較して小さく、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。これによって、原理的に困難であった波長 2 μm 帯全正常分散モード同期ファイバーレーザーの実現を目指し、波長 2 μm 帯モード同期ファイバーレーザーの出力スケール向上に取り組んだ。

2. 全正常分散モード同期

この発振モードは、共振器内で形成されるパルスは自己位相変調および正常分散により、正チャープした時間幅の長いものになる。これにより出力制限に影響を与える非線形性を抑制することができ、より高いエネルギーを蓄えることが可能になる。このチャープしたパルスは共振器外部で回折格子やプリズムを用いることで圧縮することにより超短パルスを得ることができる。全正常分散モード同期では、バンドパスフィルターが重要な素子の一つである。形成されるスペクトルは自己位相変調により広がっていく。そのためその共振器一周によるスペクトル幅の拡がりを補償し、定常発振を促すためにバンドパスフィルターの挿入が必要となる。共振器内を周回する光スペクトル変動を Fig.2 に示す。さらにフィルターはパルス形成の役割も担っている。正チャープしたパルスの時間的強度分布とパワースペクトルは似た形状となるため、フィルターを透過することによりパルスの裾

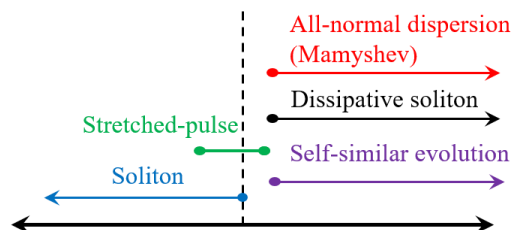


Fig.1 分散値に応じて変化する発振モード

を落とすような可飽和吸収体の性質も持つ。

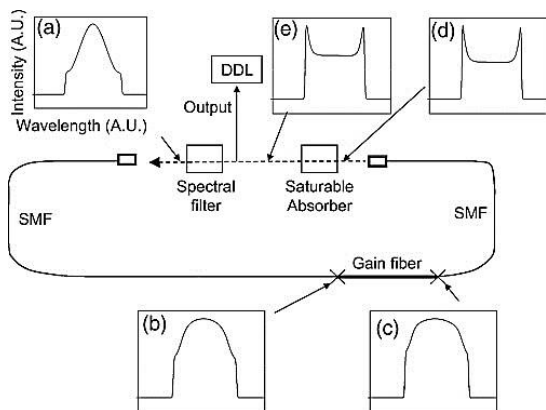


Fig.2 全正常分散モード同期ファイバーレーザー共振器内のスペクトル変動[2]

3. フッ化物(ZBLAN)ファイバー

ZBLAN ファイバーの特徴として、フォノンエネルギーが小さい点が一つ挙げられる。石英ガラスの最大フォノンエネルギーはおよそ 1000 cm^{-1} に対し、ZBLAN ガラスでは約 500 cm^{-1} であり、半分程度のフォノンエネルギーを有している。これにより、波長 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以上では実用的な透過率を持たない石英ガラスファイバーに比べて、波長約 $4\text{ }\mu\text{m}$ の広い透過帯域を有している[3]。このことから超広帯域光発生や中赤外レーザーの増幅媒質として有用である。また、ZBLAN ファイバーに希土類を添加した際、石英では多フォノン緩和により非輻射放出となる多くの遷移が、ZBLAN ファイバーでは発光を示すことができ、高いスロープ効率で動作が可能である。さらには、低閾値レーザー発振が可能という報告もある[4]。これらのことからシリカファイバーよりもZBLAN ファイバーが優れたパフォーマンスを示すことが知られている。その一方で、潮解性、低機械強度、低融点といったファイ

バーとしては扱いづらい特徴も持っている。また、本研究で着目した ZBLAN ファイバーの特徴は、前述したように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[5]。ファイバーの分散値は材料分散と導波路分散の和で表される。石英ガラスファイバーでは波長 $2\text{ }\mu\text{m}$ 帯において、材料分散の負の値が高く全体で大きな異常分散値を示していた。しかし、ZBLAN ファイバーにおいては材料分散値がおおよそ 2 倍小さい、この値は導波路分散を制御すること、つまりはファイバーのコア径及び NA を適当な値に調整することによりファイバー全体で正の分散を示すことが可能である。ファイバーの分散量の計算結果を示す。ZBLAN ファイバーのコア径を約 $6.4\text{ }\mu\text{m}$ に以下にすることで正常分散を示すことが可能となる。

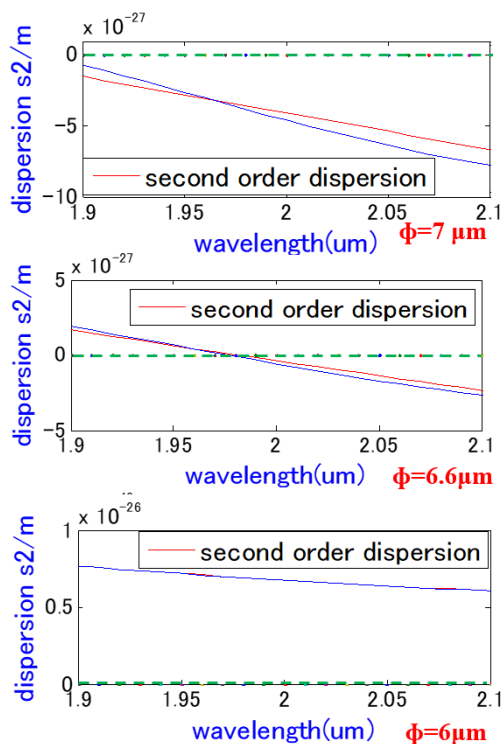


Fig.3 異なるコア径における ZBLAN ファイバーの分散値

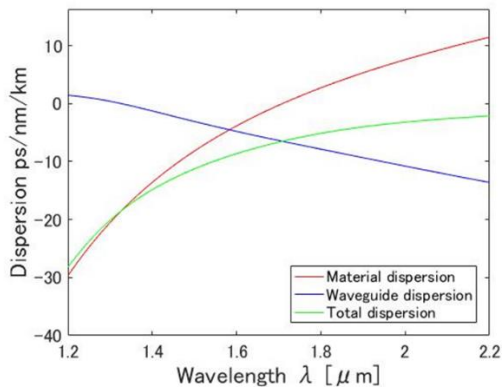


Fig.4 ZBLAN ファイバーの全分散特性(コア径：
6.2 μm)

4. 全正常分散モード同期ファイバーレーザーの開発

4.1 実験構成

本研究で構築した実験系を Fig.5 に示す。利得ファイバーに 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。そのファイバーの両端には、1 mと0.5 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 ZBLAN ファイバー全長の分散値は、 $126500 \pm 4600 \text{ fs}^2$ である。ファイバー以外の光学素子の分散については、ファイバーの分散値に比べて非常に小さいことから本実験では考慮しなかった。励起光源には 1555 nm Er:Yb ファイバーレーザーを利用し、ダイクロミックミラー(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ー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。本実験では、バンド幅の異なる二種類のフィルター(λ_c : 1885 nm、BW: 10 nm or λ_c : 1870 nm、BW: 35 nm)(λ_c : 透過中心波長、BW: Band Width)をそれぞれ用いて実験を行った。

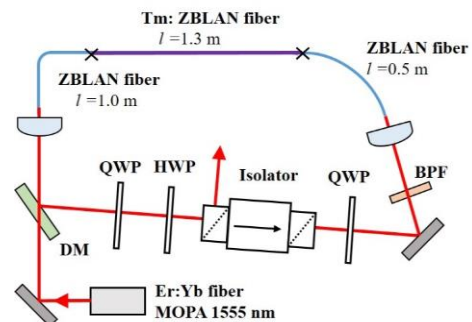


Fig. 5 全正常分散 Tm:ZBLAN モード同期ファイバーレーザー

4.2 バンドパスフィルター (BW: 10 nm)

モード同期によって得られたパルストレインと出力特性を Fig.6,7 にそれぞれ示す。励起パワー199 mW時に平均出力 47 mWのモード同期動作を確認でき、励起パワーを上げていくことで最高出力 67 mWが得られている。適正な波長版の組み合わせであれば、セルフスタートが可能となっている。繰り返し周波数は 70.6 MHzであり、パルスエネルギーは 0.9 nJと見積もられる。低出力時と高出力時のスペクトルを共に Fig.5 に示す。正常分散領域のモード同期で報告がある Cat-ear型の構造を確認することができた。励起パワーを上げていくことでスペクトル幅が広がっていき、最高出力時でおおよそ 50 nmを得ることができた。この広がり利得ファイバー中での増幅動作と自己位相変調の影響によるものである。ま

た、2つのスペクトルにそれぞれ見られる細かなディップについては、共に位置が一致していることからこの波長域の水の吸収によるものだと考えられる[5]。

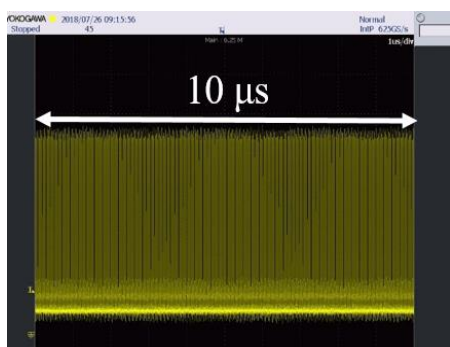


Fig.6 パルストレイン

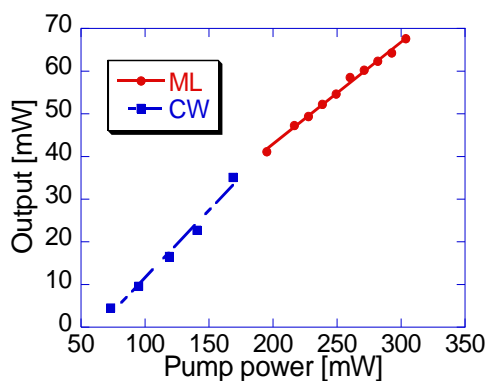


Fig.7 出力特性 (BW:10 nm)

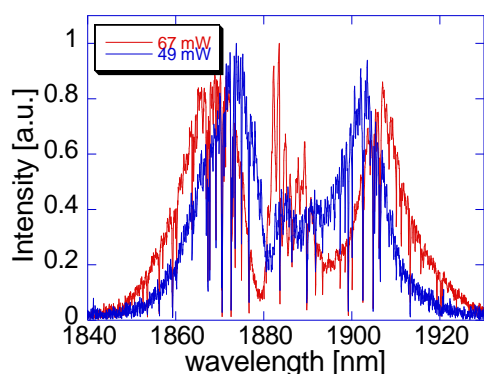


Fig.8 異なる出力時のスペクトル

4.3 バンドパスフィルター (BW: 35 nm)

バンドパスフィルターをバンド幅35 nmのものに変更し、同様の実験を行った。適切な波長板の組み合わせを行うことで励起パワー216 ~ 329 mWの範囲においてモード同期発振を確認することができた。得られている最高出力は 67 mWであり、パルスエネルギーは 0.9 nJと見積もられる。測定したスペクトルと自己相関波形を Fig.10,11にそれぞれ示す。バンド幅 10 nm使用時と比較して約30 nm広がり、最大で 80 nmのスペクトルを確認した。スペクトルの中心部にピークがあるが、励起パワーを下げていくことでピーク成分を抑制することができ、中心が平坦な Car-ear 型のスペクトルも確認できている。また、自己相関計を用いて測定したパルス幅はガウス形を仮定すると 860 fsを得ることができた。スペクトル幅から考えると、チャープしたパルスが出力されていると判断できる。スペクトル形状やチャープしたパルスからも正常分散領域でのモード同期が実現できたと考えられる。

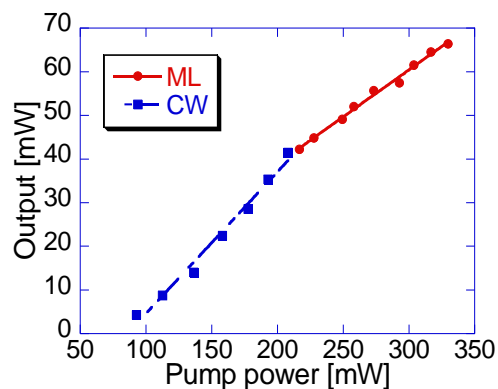


Fig.9 出力特性 (BW:35 nm)

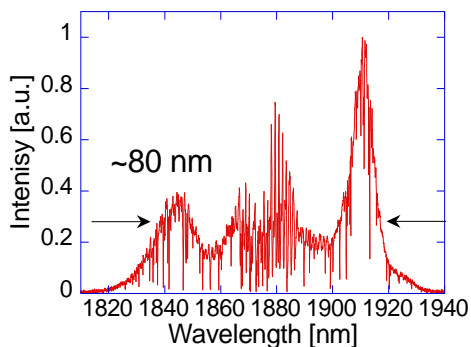


Fig.10 スペクトル

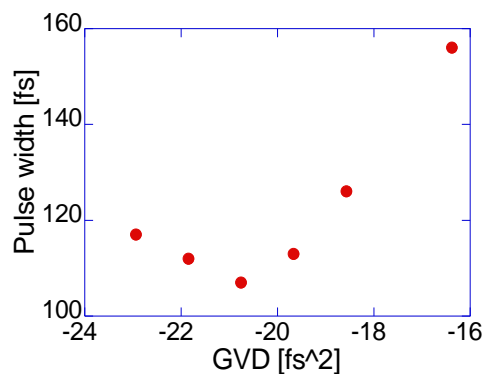


Fig.12 パルス幅変化

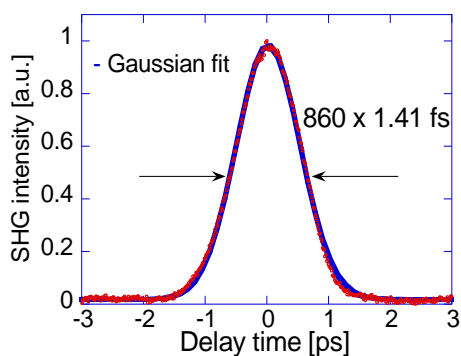


Fig.11 自己相関波形

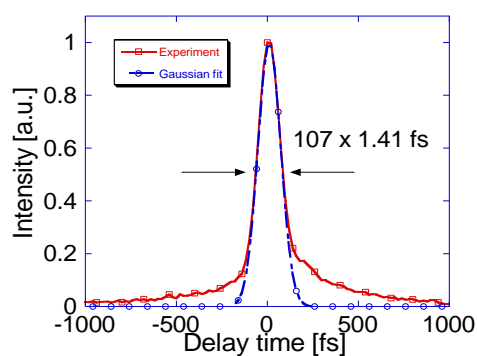


Fig.13 自己相関波形(圧縮後)

4.4 パルス圧縮

回折格子対(300 本/mm)を用いてパルス圧縮の実験を行った。回折格子対間の距離を調整し与える分散量を変化させていき、与えた分散量 -21000 fs^2 のときにパルス幅を 107 fs まで圧縮することができた。圧縮後の平均出力はおよそ 40 mW である。算出したフーリエ限界パルス幅の 99 fs に近い値まで圧縮できており、さらなる分散量の調整により短パルス化が期待できる。パルス幅からピークパワーは 5.3 kW 程度と見積られる。また、パルス裾に圧縮できていない成分が確認できるが、これは高次の分散の影響によるものだと考えられる。

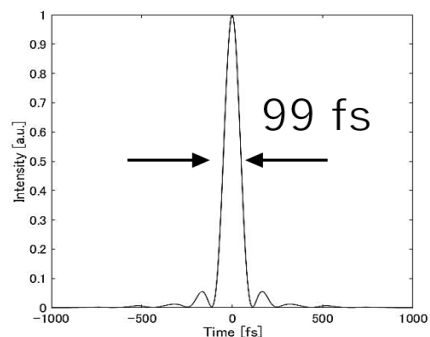


Fig.14 フーリエ限界パルス幅

5. まとめと今後の課題

波長 $2 \mu\text{m}$ 帯全正常分散モード同期ファイバーレーザーの開発を行った。バンド幅 35 nm のバンドパスフィルター使用時に最高出力 67 mW 、繰り返し周波数 70.6 MHz 、パルスエネルギー 0.9 nJ のパルスを得ることができ、およそ 80 nm の広がりを持ったスペクトルを確認した。また、直接出力さ

れるパルス幅はガウス形を仮定すると、 860 fs のチャープパルスが得られ、回折格子対により 107 fs まで圧縮することができる。

全正常分散領域におけるモード同期を実現することができたが、得られたパルスエネルギーとしては 0.9 nJ と通常のスリトンモード同期と同等の値となってしまった。原因としては、全体での分散量によるものだと考える。今回の実験構成では分散値が 0.12 ps^2 であり、正常分散ではあるが値の小さいものであった。そのためより高出力な光源開発を目指すのであれば、より分散量の大きく非線形を抑制できるファイバーを利用することが望ましく、ZBLANファイバーの導波路分散のさらなる制御が必要となる。また、共振器内にPBSを挿入し、共振器からの取り出しを高くすることが挙げられる。これにより共振器内の光強度を下げ、非線形を抑えることができ、さらなる高出力化が期待できる。

参考文献

- [1] Sidorenko, Pavel; Fu, Walter; Wright, Logan G; Wise, Frank W, “Multi-megawatt, self-seeded Mamyshev oscillator”, Specialty Optical Fibers, Paper, (2018)
- [2] Andy Chong, William H. Renninger, and Frank W. Wise, “Properties of normal-dispersion femtosecond fiber lasers”, Journal of the Optical Society of America B, **25**, 140-148, (2008)
- [3] Xiushan Zhu, and Ravi Jain, “Watt-level Er-doped and Er-Pr-codoped ZBLAN fiber amplifiers at the $2.7\text{--}2.8\text{ }\mu\text{m}$ wavelength range”, Optics Letters, **33**, 1578-1580, (2008)
- [4] B. M. Walsh and N. P. Barnes, “Comparison of Tm:ZBLAN and Tm:silica fiber lasers; spectroscopy

and tunable pulsed laser operation around $1.9\text{ }\mu\text{m}$,” Appl. Phys. B **78**, 325–333 (2004).

[5] Andreas Wienke, et al, Optics Letters, **37**, 2466-2468, (2012)