

Tm 添加ダブルクラッドフッ化物ファイバーを用いた

Mamyshev 発振器の開発

1933017 内園裕也

主任指導教員：戸倉川正樹 指導教員：白川晃

1. はじめに

現在波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯で動作するレーザーは様々な分野、例えば強い水の吸収があることからレーザーメス、大気に対する透過率が高い波長帯(大気の窓: $2\sim 2.5\ \mu\text{m}$)を含むことから自由空間通信に利用されている。更に非線形波長変換によって $3\sim 20\ \mu\text{m}$ 帯という様々な分子の振動吸収線が多数存在する領域の光を発生させることが可能であり、環境計測や呼吸分析にも応用が期待されている。このようなアプリケーションは数百 fs 程の短パルス性や $\mu\text{J}\sim\text{mJ}$ の高エネルギー性を有したモード同期超短パルス光を利用することによって、応用の裾を広げ得る。

モード同期ファイバーレーザーでは共振器内の分散値を制御することでエネルギーのスケールが行われてきた。異常分散中でのソリトンモード同期ではパルスエネルギー $1\ \text{nJ}$ 以下[1]、0 分散近傍でのストレッチパルスモード同期では数 nJ [2]、更に、大きな正常分散中での散逸ソリトンモード同期があり、数十 nJ [3]の報告がされている。散逸ソリトンの中に全て正常分散を示す素子で構成された全正常分散モード同期ファイバーレーザー(ANDiFL:All Normal Dispersion Fiber Laser)があり、共振器中をパルスが常にチャープした状態で伝搬することから非線形光学効果を抑制でき、より一層の高パルスエネルギーの発生が可能となる。波長 $1\ \mu\text{m}$ 帯における ANDiFL では $100\ \text{nJ}$ [4]が報告されている。しかし波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯ファイバーレーザーで ANDiFL を実現しようとする、一般的に使用されているシリカファイバーでは材料分散の異常分散値が大きく困難なものとされていた。我々の研究室では Tm 添加 ZBLAN ファイバーをコア径制御により正常分散とし波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯 ANDiFL[5]を実現している。

本研究は上記の ANDiFL を更に発展させ更なる短パルスと高エネルギー化を目指し、正常分散ダブルクラッド ZBLAN ファイバーを用いた Mamyshev 発振器を目指した。

2. 原理

2.1 ダブルクラッドファイバー

ダブルクラッドファイバーは、図 1 に示されるような屈折率分布を有しており、内部クラッドと外部クラッド、二つのクラッドを有している。コアはビーム品質の良い信号光を、内部クラッドはビーム品質の低い励起光を伝搬させることができる。コアに活性イオンを添加し、ビーム品質は悪いが高出力な LD 光をクラッドに結合することによってシングルクラッドファイバーでは得られない、高出力な増幅動作を可能とする。

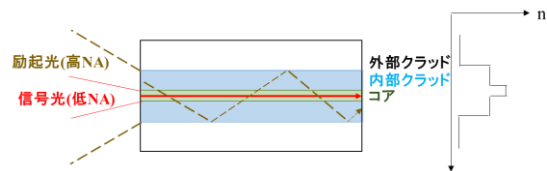


図 1. ダブルクラッドファイバーの構造と屈折率分布

2.2 ZBLAN ファイバー

ZBLAN ファイバーとは $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ を主成分として構成されたフッ化物ファイバーである。ZBLAN ファイバーのフォノンエネルギーは約 $500\ \text{cm}^{-1}$ であり、シリカガラスの $\sim 1000\ \text{cm}^{-1}$ の半分程度ある。そのためシリカファイバーが $2\ \mu\text{m}$ 以上では実用的な透過を示さないのに対し、ZBLAN ファイバーでは $\sim 4\ \mu\text{m}$ まで実用的な透過を示す[6]。また、活性イオンを添加した際 ZBLAN ガラスはマルチフォノン緩和による非放射緩和がおき難く、上準位寿命が石英ガラスより長くなりやすい。そのため低閾値、高効率なレーザー動作が可能になる。このことから中赤外領域での広帯域光発生やレーザー利得媒質として有用である。その一方で、潮解性、低機械強度、低融点などといった取り扱いに慎重にならなければならない特徴も有している。

また、本研究で着目した ZBLAN ガラスの特徴は、材料分散の値がシリカガラスと比べて中赤外領域において低い値を持っていることである[7]。波長分散は導波路分散と材料分散の和で表され、シリカファイバーでは波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯において、材料分散の負の値が高く大

きな異常分散値を示していた。一方 ZBLAN ファイバーは材料分散値が小さく、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正常分散を得ることが可能である。シリカガラスファイバーと ZBLAN ファイバーの分散特性について計算結果を図 2 にそれぞれ示す。その際、コア径 6 μm 、NA0.16 と実験に使用するものと同じ値に設定してある。図 2 の通り、ZBLAN ファイバーは波長 2 μm 帯において正常分散を示している。シリカファイバーにおいて正常分散を得るためにはコア径を約 3 μm 以下にしなければならないが、ZBLAN ファイバーは 6 μm 以下で得られるので大きなコア径が選択できより高出力化が期待できる。

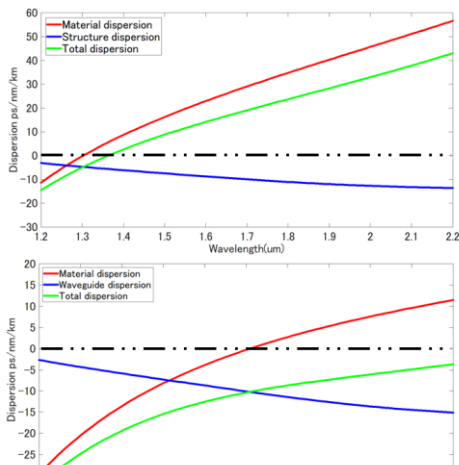


図 2. 上：シリカファイバー、下：ZBLAN ファイバーの分散特性

2.3 全正常分散モード同期

全てを正の分散を示す光学素子で共振器を構成することで、正常分散、SPM（自己位相変調）により、正チャープした時間幅の長いパルスが伝搬し非線形性を抑えることができ、さらには正常分散、利得、自己位相変調の調整でシミュラトン動作も可能であり、より高いエネルギーを得ることができる。このチャープしたパルスは回折格子やプリズムを用いて圧縮することができる。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。SPM に共振器内で形成されるスペクトルは広がっていく。そのためその共振器一周によるスペクトル幅の広がりを補

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。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を落とすような一種の可飽和吸収体の性質も持つ。

2.4 Mamyshev 発振器

本研究で用いる Mamyshev 発振器は共振器内に異なる中心波長の 2 種のフィルターと 2 本の正常分散利得ファイバーを有している (図 3)。

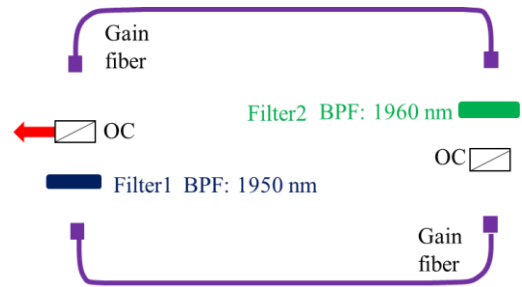


図 3. Mamyshev 発振器の概略

この 2 つのフィルターによって狭線幅の CW 光は強い損失を与えられ共振器を周回できない。パルス光を考えると (図 4)、Filter1 を通過したパルスのスペクトルは抽出され狭帯域になり、利得ファイバー中で SPM により広がっていき、やがて Filter2 を通過できるまで広がっていく。Filter2 を通過したパルスも上記と同様で Filter1 を透過できるまで広がっていく。

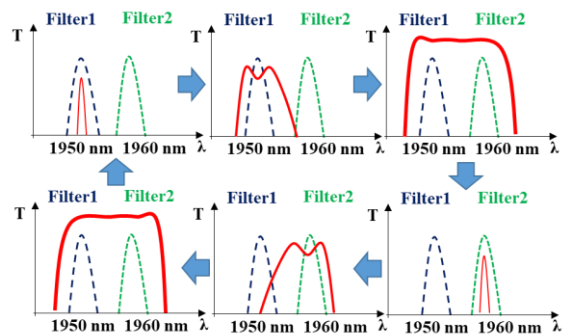


図 4. Mamyshev 発振器でのスペクトル変化 (赤：スペクトルの変動。青、緑：フィルターの透過率)

その結果、スペクトルが広がるようなパルス光のみ周回でき、広帯域なスペクトル幅をもった高エネルギーパルス発振が得られる。

ANDiで構成されたMamyshev発振器は波長1 μm 帯では $\sim 1 \mu\text{J}$ の報告がされている[8]。現在波長2 μm 帯で報告されているMamyshev発振器のパルスエネルギーは $\sim 4 \text{ nJ}$ [9]であり、これは正常分散と異常分散を有する素子で構成されている。波長2 μm 帯でANDiでのMamyshev発振器を構築することで更なる高エネルギーが期待される。Mamyshev発振器の特徴として、CW発振を抑制しているため、CWのシード光が発生しないのでパルスシード光を入れる必要があるが、近年セルフスタートの報告例が多々あり[10]、本研究もそれらを参考にセルフスタートを試みる。本研究では初めに透過型フィルターの中心波長をそろえた状態で非線形偏波回転によるセルフスタートモード同期発振を起こし、そこからフィルターの中心波長を変えていくセルフシード型のMamyshev発振器を検討する。

3 リング型 Mamyshev 発振器の開発

3.1 Tm:ZBLAN の出力、波長可変特性

Mamyshev発振器を構築する前に、使用するZBLANファイバーの出力、波長可変特性を測定した。実験系を図5に示す。ZBLANファイバーはTm添加ダブルクラッド構造(コア径:長軸 $6.3 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 、短軸 $5.7 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 、NA:0.16、内部クラッド径:125 μm 、NA:0.5、長さ:6.5 m、5.6 m、GVD: $\sim 15 \text{ fs}^2/\text{mm}$)である。また、今回使用するZBLANファイバーは楕円型であるが、楕円率が ~ 0.05 と非常に小さいことから偏波保持特性は低いものと思われる。励起光源は波長793 nm、最大出力4 WのLDを使用し、ダイクロイックミラー(DM)と透過し利得ファイバーを励起している。反射型回折格子(溝本数600本/mm)をLittrow配置しDM(45度 $750\text{-}850 \text{ nm} < 0.07\% \text{ AR}$ 、 $1720\text{-}2300 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm} > 99.9\% \text{ HR}$)から反射してくる光を測定した。中心波長1953 nm時、最大出力630 mW、スロープ効率 $\sim 32\%$ であった。出力が飽和に至るまで励起出力を増加させなかったのは、高励起に伴う温度上昇によって生じる端面の劣化を考慮したためである。波長可変幅は73 nm(1921 nm \sim 1994 nm)が得られた。その時の出力の最大値は200 mWである。中心波長

1921 nmで1948 nmの寄生発振が確認され、これ以上の短波長化は望めなかった。

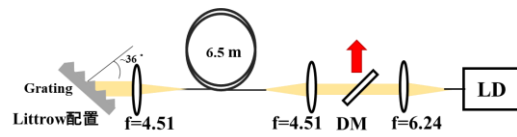


図5. 出力、波長可変特性の実験系

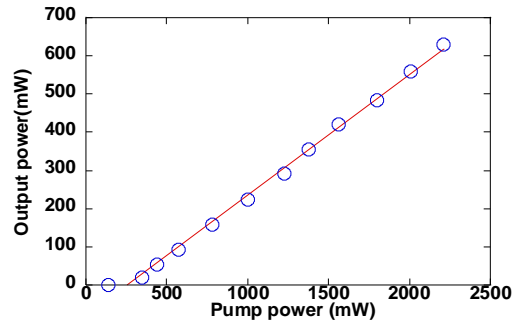


図6. ZBLANファイバーの出力特性

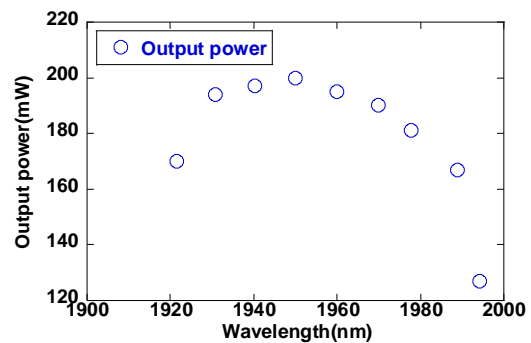


図7. ZBLANファイバーの波長可変特性

3.2 反射型回折格子を用いた Mamyshev 発振器

本実験は当初反射型回折格子をフィルターに用いてMamyshev発振器を構築予定だったが、図8のような実験系のアライメント中、端面の破壊が生じた(図9)。

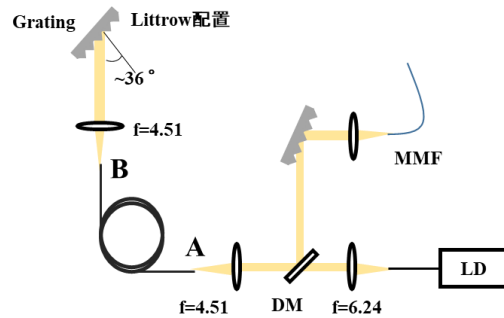


図8. 端面破壊時の実験図

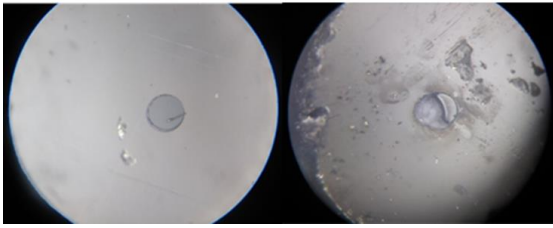


図 9. ZBLAN ファイバーの端面の劣化、破壊

左が入射端 A、右が射出端 B である。端面破壊の原因は、回折格子と MMF 端面間で発生したジャイアントパルスのフィードバックを受けたからだと考えられる。また、射出端 B の端面の溶けているような劣化は、回折格子の回折角がコアとコア以外に入射され、端面に付着したごみを燃やしたものだと考えられる。ジャイアントパルスの防止策として、アイソレーターを設置し、戻り光を遮断し Q 値の急激な増減を防ぐ対策をとり再度共振器を組んだ。また、使用するフィルターを回折格子からバンドパスフィルターに変更した。フィルターの変更により、反射型から透過型に変わったことで回折角によるファイバーへのダメージを減らし、フィルター幅を ~ 1.6 nm から 10 nm と広帯域にした。修理の際に利得ファイバーの一つが端面破壊だけでなく、ファイバー内に輝点を確認されたので、輝点の箇所を切断し利得長が 5.6 m となった。

3.3 実験構成

本研究で構築した実験系を図 10 に示す。発振器は arm1 と arm2 から構成されそれぞれに利得ファイバーとして ZBLAN ファイバー長さ 6.5 m、5.6 m を有し、 $\lambda/2$ 板、 $\lambda/4$ 板、アイソレーターを設置し、反時計回りに一方向性をもたせ、アイソレーターの入射側の偏光ビームスプリッターから出力を取り出している。arm1、arm2 でのそれぞれの取り出しを P1、P2 と設定した。フィルターには透過型バンドパスフィルター BPF1 (中心波長 1982 nm、バンド幅 10 nm 中心透過率 88%)、BPF2 (中心波長 1942 nm、バンド幅 10 nm 中心透過率 76%) を使用する。BPF1 を 20 度ほど傾けることによって BPF2 と中心波長を一致させ、CW が共振器を周回できるようにし、非線型偏波回転によりモード同期をスタートさせ BPF1 の角度を戻し Mamyshev 発振器をセルフスタートさせる。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

比べ極めて小さいことから考慮しなかった。

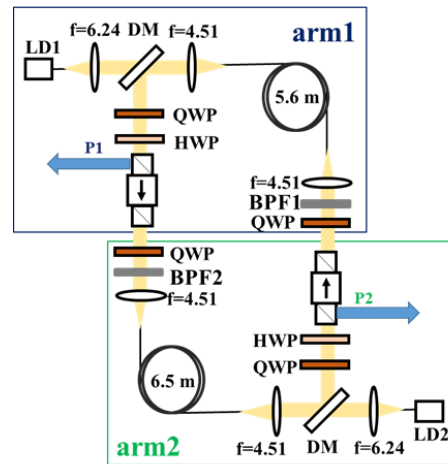


図 10. リング型 Mamyshev 発振器

3.4 リング型共振器の出力特性

図 10 の実験系において、フィルターを設置しない状態で共振器の出力特性を確認した。arm2 の励起出力を ~ 400 mW に固定し、arm1 の励起出力を 0 \sim 350 mW に増減させ、出力 P1、P2、発振波長を確認した。その際、波長板の操作によって取り出し効率を変化させることで P1、P2 のそれぞれのみでの取り出しが可能であった。P1 と P2 を同程度となるようにしたときの出力特性を(a)、出力 P1、出力 P2 を最大としたときを(b)、(c)とし、(a),(b),(c)それぞれのときの発振スペクトルは 1967 \sim 1969 nm であった。出力特性、(a)の発振スペクトルを図 11(d)に示す。(a)、(b)、(c)それぞれの最大出力は P1 \approx P2=30 mW、P1=57 mW、P2=63 mW であった。

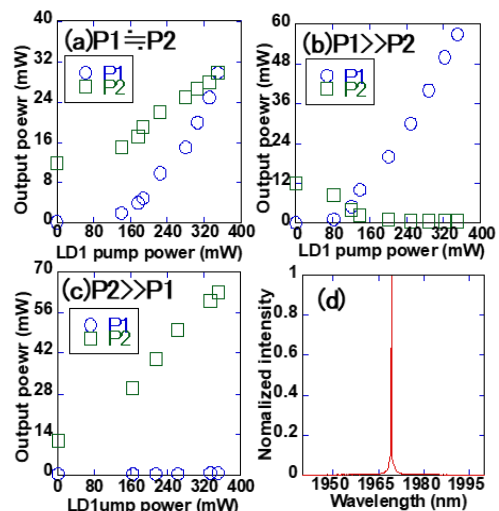


図 11. リング型共振器の出力特性

図 11(b)にて P1 の増加に伴い P2 が減少しているのは、arm1 の励起出力を上げるにつれ ASE 発振からレーザー発振となり、偏光依存性が生まれたことにより波長板での制御が可能になったからであると考えられる。(c)の現象も同様であり、波長板で P1 での取り出し効率を ~ 0 mW にしているからである。(b)と(c)において最大出力が異なるのは、それぞれの LD の出力の差、カップリング効率、利得長の長さから生じているものだと考えられる。

3.5 フィルターの中心波長の可変特性

LD1 を ~ 350 mW、LD2 を ~ 400 mW に出力を固定し BPF2 を設置せず BPF1 のみを設置し、フィルターの角度を変化させた時のレーザー出力と発振波長を測定した(図 12)。7 \sim 25 度傾けた時、中心波長 1939 \sim 1979 nm、出力 63 \sim 57 mW であった。この中心波長のシフトから短波長側のフィルター 1942 nm とのオーバーラップが可能であることが確認できる。

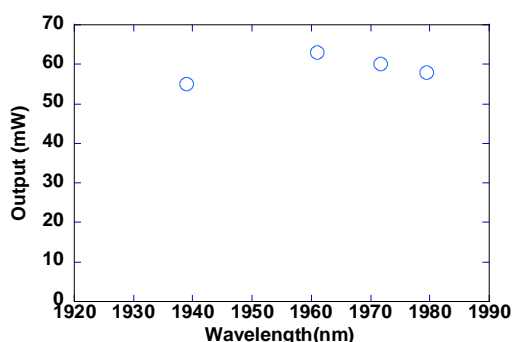


図 12. BPF の角度を変化させた時のレーザー出力と発振波長の変化

3.6 フィルター1枚での非線形偏波回転によるモード同期

次に、フィルター1枚で非線形偏波回転によるモード同期が得られるか試みた。使用する BPF は上記の中心波長 1982 nm のものであり、LD1 を ~ 350 mW、LD2 を ~ 400 mW に固定し、P1 からオシロスコープでパルストレインを観測した。図 13 にパルストレインを示す。瞬間的なノイズのあるパルス立ち上がりは確認できた。両励起出力を増加させ波長板を調整したところ図 14 のようなノイズの少ないパルストレインが観測できたが、安定したモード同期は得られなかった。

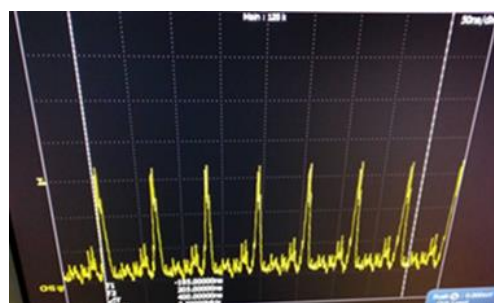


図 13. パルストレイン(50 ns/div)
平均出力 P1=50 mW、P2=10 mW

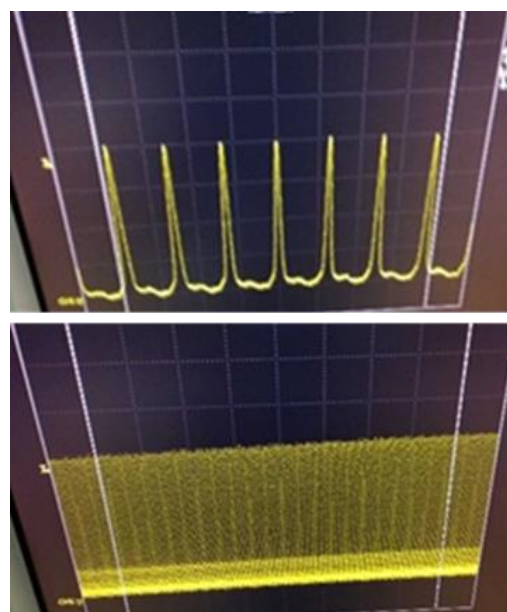


図 14. パルストレイン上(50 ns/div)、下(2 μs/div)
平均出力 P1=70 mW、P2=13 mW

更に励起出力を上げ波長板を調整したところ、両 arm の出射端側の端面の中心に破壊が確認された(図 15)。

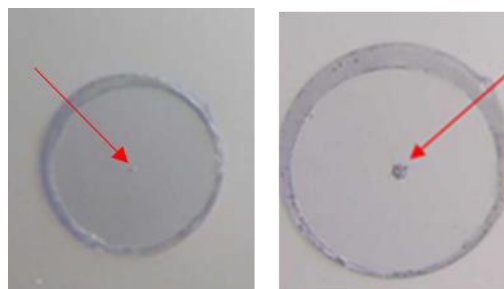


図 15. 端面の破壊(左:arm1、右:arm2 の出射端)

端面の破壊が確認されたのは P1 出力 100 mW、P2 出力 10 mW 時である。モード同期を仮定すると繰り返し周波数が~16 MHz なのでパルスエネルギーは 7 nJ 程度と見積もられ、端面の破壊は起こりえないので、励起出力を上げたことによってジャイアントパルスが発生し、端面の破壊が起こったと考えられる。波長版の調整によって損失が大きくなり、反転分布量が増えその後更に波長版の調整により Q 値が急激に高くなったことによりジャイアントパルスが発生したものと考えられる。モード同期を安定に得るためには端面の破壊を防ぐ必要がある。

7. まとめと今後の展望

Tm:ダブルクラッド ZBLAN ファイバーを用いた波長 2 μm 帯 ANDi Mamyshev リング型発振器をセルフスタートの方法で検討した。フィルター無し時、最高出力 63 mW、発振波長~1967 nm、繰り返し周波数が~16 MHz が得られた。1 つのフィルターでの非線形偏波回転を用いてモード同期を試みたところ、平均出 70 mW の時、共振器の繰り返りに合う平坦なパルストレインが一瞬確認されたが、平均出力 100 mW 時端面の破壊が確認された。今後は端面の保護のためエンドキャップ取り付けによって出射端でのエネルギー密度を下げる方法が有用だと思われる。また、マルチパスセルなどを組み込み、共振器長を長くすることで、現状よりも低繰り返しにし、共振器内のパルスエネルギーを上げる方法も考えられる。

参考文献

- [1] Khanh Kieu, et al, Soliton Thulium-Doped Fiber Laser With Carbon Nanotube Saturable Absorber, IEEE Photonics Technology Letters **21**(3):128 - 130(2009)
- [2] Frithjof Haxsen, et al, Stretched-pulse operation of a thulium-doped fiber laser, Optics Express, **25**, 20471-20476(2008)
- [3] Zhen Tian, et al, Mode-locked thulium fiber laser with MoS₂, Laser Phys. Lett. **12**, 065104(2015)

[4] Yuhang Shi, et al, Generation of 104 nJ, 100 kHz Pulses directly from all-Normal Dispersion all-PM Yb-fiber Laser with a Nonlinear Amplifying Loop Mirror (2019)

[5] Masaki Tokurakawa, et al, All-normal-dispersion nonlinear polarization rotation mode-locked Tm:ZBLAN fiber laser, Optics Express, **27**, 19530-19535 (2019)

[6] Xiushan Zhu, and Ravi Jain, "Watt-level Er-doped and Er-Pr-codoped ZBLAN fiber amplifiers at the 2.7–2.8 μm wavelength range", Optics Letters, **33**, 1578-1580, (2008)

[7] Yutaka Nomura, Takao Fuji, "Sub-50-fs pulse generation from thulium-doped ZBLAN fiber laser oscillator", Optics Express, **22**, 12461-12466 (2014)

[8] Wu Liu, et al, Femtosecond Mamyshev oscillator with 10-MW-level peak power, Optica, **6**, 194-197, (2019)

[9] Yi-Hao Chen, et al, Starting Dynamics of a Linear Mamyshev Oscillator, arxiv.org, 2010.10022 (2020)

[10] Paul Repgen, et al. Mode-locked pulses from a Thulium-doped fiber Mamyshev oscillator, Optics Express, **28**, 13837-13844 (2020)