

拡張 Mamyshev 信号再生法を利用した新奇光パルス形成技術の確立

研究代表者 鈴木 将之 同志社大学理工学部電子工学科 教授
共同研究者 戸田 裕之 同志社大学理工学部電子工学科 教授

1 研究調査の背景

本研究の目的は、従来技術のモード同期 Er ファイバレーザー発振器では実現できない大出力かつ超短光パルス生成技術を新たに確立することである。この目的の達成に向け、モード同期ファイバレーザー発振器に光通信技術で開発された信号再生法である Mamyshev 信号再生法を組み合わせるという従来なかったアプローチを試みる。

モード同期ファイバレーザーは、小型で耐環境性が高く、調整不要という利点から、材料加工や顕微鏡、分光、テラヘルツ発生など産業から理科学分野において幅広く利用されている。先に述べた応用研究に対して付加価値加工や高コントラストの生体イメージング、超精密分光、大出力テラヘルツ波生成を実現するためには、励起源となるモード同期ファイバレーザーの大出力化かつ超短パルス化が望まれている。しかしモード同期法は大出力と超短パルス生成を同時に実現することは極めて困難であり、これを実現するためには複数の増幅器と複雑な光学素子が必要である。この従来技術のシステム内における増幅器は時間ジッタを発生させ、この時間ジッタは応用研究に対して悪影響を及ぼす。このような研究背景から、発振器から直接、大出力かつ超短パルス生成が可能な従来のモード同期法に代わる新奇パルス形成法の出現が望まれている。

本研究提案では、光通信における信号増幅と自己位相変調 (self-phase modulation: SPM) による光データを再生する Mamyshev 再生器に着目した。この Mamyshev 信号再生器をレーザー共振器に活用すると従来技術では実現できない大出力かつ超短光パルス生成が可能と考えた。しかし波長 1550nm 帯において、通常のファイバは異常分散を示すため、Mamyshev 発振器の検討はほとんど行われていない。そこで本研究提案では分散制御技術と時間伸長分光によるダイナミクスの理解を通して波長 1550nm 帯の Mamyshev 発振を実現する。本研究の実証を通じて、従来技術で得られる出力を打破する大出力かつ超短パルス生成を実現する基盤技術の確立を最終目的とする。

2 研究内容と成果

2-1 Mamyshev 発振器

Mamyshev 発振器は、光通信分野で活用されている強度雑音が重畳された 2 値の強度変調データ信号を再生する技術である Mamyshev 信号再生法をレーザー共振器に流用したパルス生成法である。ここではじめに、この Mamyshev 信号再生法について説明する。

(1) Mamyshev 信号再生法

はじめに本手法の基本原則である Mamyshev 信号再生法について図 1 を用いて説明する。この Mamyshev 信号再生法とは、光通信において信号増幅と SPM による光データを再生する技術である。光通信において、強度雑音が重畳された 2 値の強度変調データ信号を光増幅して SPM にてスペクトル幅を広げた後、元のデータ

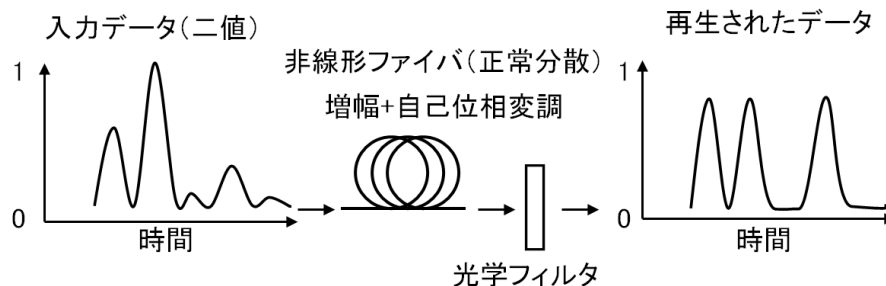


図 1. Mamyshev 信号再生法

信号から少し離れた波長成分をバンドパスフィルタ (Bandpass filter, BPF) にて取り出したとき、信号データが 0 の時の雑音は、フィルタによって減衰され、信号データが 1 の時はパワーが大きいほど SPM によるスペクトル広がりが大きくなる。この過程において、BPF の波長ずれを適切に設定すると、データの強度ゆらぎと雑音を抑圧できる。この一連の結果は、振幅増幅と波形再生の光 2R (Re-amplification and Re-shaping) 再生が行われていることを表している。そこで共振器内にて、Mamyshev 信号再生法と同様な動作を実現するために正常分散ファイバと正常分散増幅媒質、そしてピーク波長が異なる二つの帯域を制限する BPF を用いて共振器を構成すると、共振器内では増幅と SPM にてスペクトル幅とパルス幅の拡大が周期的に起こり、モード同期動作と類似したパルス形成が可能となる。さらに、この共振器内に設置した BPF の直前で光パルスを取り出すと大出力かつ超短パルス動作を実現できると考えられる。

つぎに図 2 を用いて Mamyshev 発振器の原理を説明する。図 2 に示すように Mamyshev 発振器は、主に二つの正常分散増幅媒質 (EDF1 と 2) とピーク波長が異なる二つの狭帯域バンドパスフィルタ (BPF1 と 2) で構成される。はじめに共振器外部から偏光ビームコンバイナ (PBC) を用いて種光パルスを共振器内に注入する。この種光パルスは EDF1 にて増幅と SPM によりスペクトル幅が広がる。その後、光パルスは BPF1 を通過、そして EDF2 にて増幅と SPM によりスペクトル幅が広がり、BPF2 を通過したのちに、最終的に EDF1 に到達する。この BPF2 を透過してきた光パルスのエネルギーが PBC から入射される種光のエネルギーより高いとき、BPF2 を透過してきた光パルスが EDF にて増幅され、その後、SPM と狭帯域化、増幅、狭帯域化を繰り返して、Mamyshev 共振器内を伝搬する。このとき BPF1 または 2 の手前で光パルスを取り出すと線形チャープした大出力の広帯域光パルスを生成することができる。

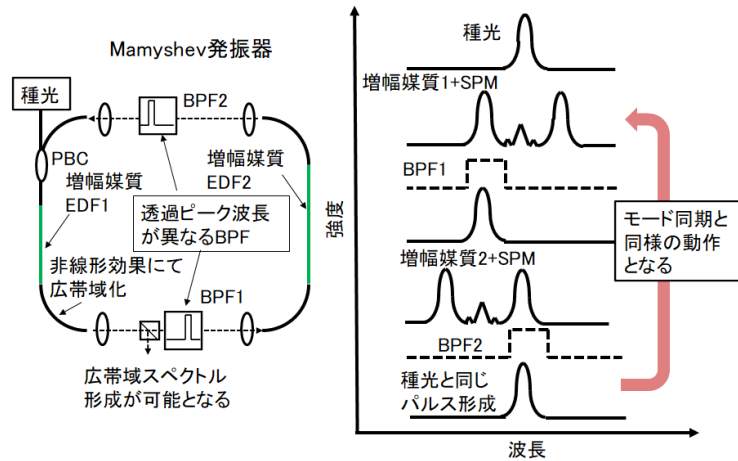


図 2. Mamyshev 発振器

この BPF2 を透過してきた光パルスのエネルギーが PBC から入射される種光のエネルギーより高いとき、BPF2 を透過してきた光パルスが EDF にて増幅され、その後、SPM と狭帯域化、増幅、狭帯域化を繰り返して、Mamyshev 共振器内を伝搬する。このとき BPF1 または 2 の手前で光パルスを取り出すと線形チャープした大出力の広帯域光パルスを生成することができる。

(2) 開発した Mamyshev 発振器

Mamyshev 発振器は共振器内に設置した異なるピーク中心波長を有する BPF を用いるため、共振器内で CW 発振が起こらない。その結果、共振器内で初期パルスを形成することができないため、外部から初期パルスとなる光パルスを注入する必要がある。そこで、図 3 に示すような Mamyshev 発振器に注入する種光レーザーパルスの開発を行った。発振器は可飽和吸収体と偏波保持ファイバを用いて、平均出力 3.45mW、スペクトル幅 15nm、パルス幅 285fs、繰り返し動作 38MHz 動作を確認した。この出力される光パルスは光アイソレータと帯域制限フィルタを介して、Mamyshev 発振器に注入した。アイソレータの透過率は 80%、そして帯域制限フィルタを透過することでスペクトル成分の大半がカットされた。その結果、平均出力は 0.3mW となった。この平均出力 0.3mW の光パルスを Mamyshev 発振器に注入したが Mamyshev 発振は観測されなかった。その理由としては、シード光の平均出力が低いためと考えられる。そこで、急遽、発振器から出力される光パルスの出力増大を目的として、増幅器の構築を行った。長さ 1m の正常分散 EDF を用いて増幅器の構築を行った。その結果、平均出力 46mW まで増幅することに成功した。しかしスペクトル幅は、15nm から 37.4nm まで広帯域化した。広帯域化した理由を以下に述べる。共振器を構成するファイバは異常分散を持つため、共振器から出力される光パルスを直接増幅器に入射すると、正常分散をもつ増幅器中で光パルスの分散は異常分散から正常分散へ変わる。このとき増幅器内にて分散値がゼロとなる地点が存在する。その地点で、パルス幅は最短でかつピーク強度は最大となるため、スペクトルが SPM によりスペクトルが広帯域化したと考えられる。一方、Mamyshev 発振器に注入するスペクトル幅は 5nm 程度で十分であり、スペクトル幅が広がることで波長 1550nm 近傍のパルスエネルギーが下がるため、Mamyshev 発振を得る困難となることが予想される。広帯域化の要因は、増幅器内で SPM が過剰に生じることであり、分散値がゼロとなる地点を増幅器の直前になるよう

に制御する必要がある。そこで発振器と増幅器の間に正常分散を与えることができるファイバブラッグ回折格子 (Fiber Bragg grating: FBG) を用いて、これを増幅器内で最大ピーク強度とならないように制御することを試みた。その結果、平均出力 16mW、スペクトル幅 3nm、パルス幅 10ps を得ることに成功した。平均出力が下がった理由は、FBG の回折効率が 20% であることから、増幅器に入力する平均出力が下がったことで増幅率が下がったと考えられる。しかし得られた平均出力 16mW は、Mamyshev 発振器のシード光に必要な平均出力と判断したため、このシステムをシード光として採用することとした。

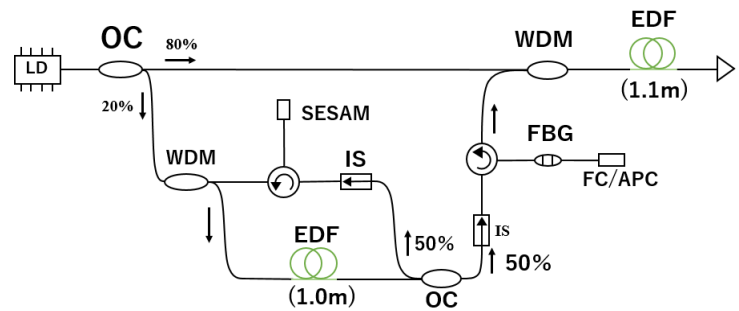


図 3. シード光システム

つぎに Mamyshev 発振器を実現するために Mamyshev 共振器の構築を行った。共振器は、0 度入射のミラーを両端に配置して、その真ん中に EDF を挟み込むような形で共振器構造を構築した。ミラーとファイバコリメータレンズの間には、4分の1波長板(Quarter wave plate: QWP) と 2分の1波長板(Half-wave plate: HWP), 偏光ビームスプリッタ (Polarizing beam splitter: PBS) を導入した。ファイバから出力される光パルスの偏光はだ円偏光を有している。QWP を用いて、出力される光パルスの偏光をだ円偏光から直線偏光に変える。その後、直線偏光の光パルスは HWP にて PBS に入射する偏光の向きを調整することで反射と透過の比率を制御する。

この比率の制御により、共振器内に蓄積できるパワーをコントロールして、Mamyshev 発振を実現する。ファイバ部分は LD と波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM), 正常分散 EDF を用いて構築されている。WDM を用いて EDF を励起する波長 976nm の光をファイバ内に導く。WDM に使用しているファイバとレーザー発振媒質である EDF は波長 1550nm に対して正常分散を示すファイバを使用した。その理由は、Mamyshev 信号再生法は正常分散領域でのみ観測される現象であるためである。しかし市販で導入できる WDM は波長 1550nm において異常分散の特性を有する。そこで本研究助成を用いて正常分散 WDM を新たに作成した。

この新規で作成した正常分散ファイバで構築した正常分散 WDM が適正に動作することを確認するために WDM と EDF を用いてファイバ増幅器を構築して、その増幅特性試験を行った。その結果、励起 LD パワー 430mW において出力 100mW を得ることができた。これにより、作成した WDM が適正に動作していることを確認できた。つぎに構築した Mamyshev 共振器の光軸調整を行い、CW 発振動作の確認を行った。ファイバコリメータの角度を調整することで CW 発振を得ることに成功した。そこで共振器内の PBS とエンドミラーの間に BPF を導入した。BPF は誘電体多層膜構造を有しているため、透過帯域範囲は光の入射角度によって変化する。そこで入射光パルスに対して BPF の角度を回転させて光パルスが BPF を透過する実効的な長さを変化させて透過帯域範囲を制御した。これにより中心波長 1556nm と 1563nm を透過帯域の中心波長として共振器内に BPF を設置した。市販の BPF の帯域幅が 5nm であった。BPF の帯域幅が広がると Mamyshev 発振を引き起こすために必要な励起 LD パワーが高くなることが予想された。そこで BPF の帯域幅を狭くするためにショートパスフィルタ (Short pass filter: SPL) と BPF を組み合わせて帯域幅を狭くした。これにより帯域幅と二つのフィルタ透過波長間隔を自在に制御できる光学システムを構築することに成功した。

つぎに外部から Mamyshev 共振器内に種光パルスを注入する光路を構築して、BPF はある特定帯域の波長を透過すると同時に帯域幅の外側の波長の光は反射する。この反射する特徴を利用して、反射光の先に入力ミラーを設置して、その先に入力光学系を構築した。これにより、外部から種光を Mamyshev 発振器に注入することに成功した。図 4 に光検出器とオシロスコープを用いて種光と Mamyshev 発振の時間波形を示す。図 4(a) は、共振器外部から入射した種光を遮断していない。そのため外部からの種光と Mamyshev 発振が混在した状

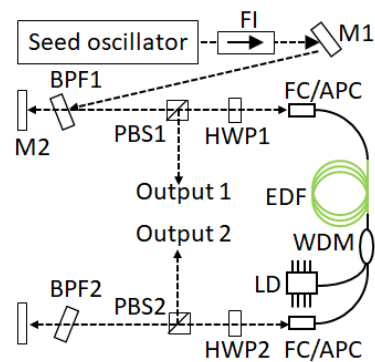


図 3. 構築した Mamyshev 発振器

態となっている。この波形におけるピーク部分は Mamyshev 発振の波形を表しており、ピークの強度の半分の強度の部分に存在する波形の残像は入射の種光に対応している。種光と Mamyshev 発振は独立した時間領域でそれぞれ発振するため、このような残像のような波形を観測されている。この状態において入力光を物理的に遮断すると図 4 (b) に示すような Mamyshev 発振を得ることができた。繰り返し周波数は、Mamyshev 共振器長に対応した繰り返し周波数、13.2MHz であった。

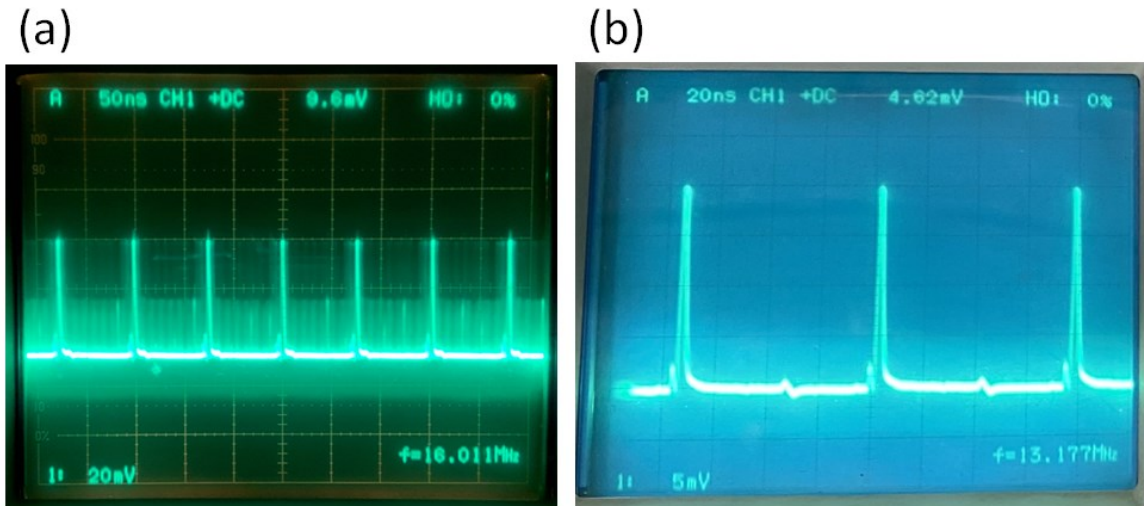


図 4. 光検出器を用いたパルス列。 (a)種光遮断前, (b)種光遮断後

このとき得られた平均出力は出力ポート 1 で 16mW, 出力ポート 2 で 9.15mW であった。図 5 に Mamyshev 発振が得られたときのスペクトル (ポート 2) を示す。Mamyshev 発振で得られたスペクトルの帯域幅は半値全幅で 26nm であった。一方、ポート 1 から出力されたスペクトル幅は 21nm となり、さらにその形状は中心波長 1570nm に対して非対称形状となっていた。スペクトル幅とパルス幅は、フーリエ変換の関係を有しており、スペクトル幅が広がるとパルス幅は短くなる。同時にフーリエ変換の関係からスペクトル幅が矩形波となるとパルス幅のメインの外側にノイズ成分が生じる。そのため、スペクトル形状が比較的に中心波長に対して対称な形状を有していた出力ポート 2 の光パルスをパルス圧縮することを試みた。Mamyshev 発振器は正常分散ファイバで構築されているため、出力される光パルスの分散は正常分散を有している。実際、オートコリレータを用いてパルス幅の測定を行った結果、パルス幅は 2.8ps であった。この分散をゼロに近づけるために異常分散ファイバを用いてパルス圧縮を行った。異常分散ファイバの長さを変化させるとパルス幅も変化し、異常分散ファイバの長さを 2.7m としたとき、今実験で得られた最短パルス幅、240fs を得ることができた。

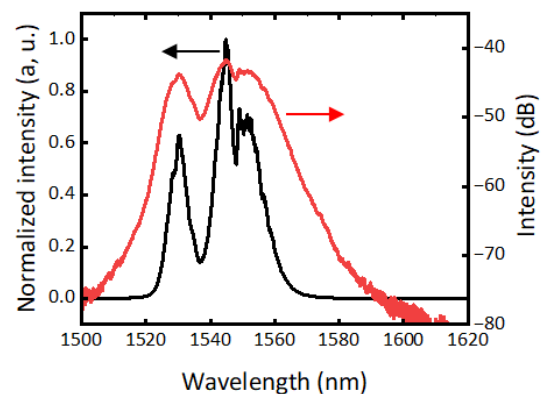


図 5. スペクトル幅。黒線はリニアスケール表示, 赤線はログスケール表示

以上に述べた通り、波長 1550nm 帯における全正常分散型 Mamyshev 発振器の開発に世界に先駆けて成功した。今後はさらなる短パルス化を目指すために、EDF 長の最適化や帯域制限フィルタの間隔を制御する必要がある。

【参考文献】

- [1] P. V. Mamyshev, "All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect," in European Conference on Optical Communication, (ECOC) 98, (IEEE, 1998), pp. 475-476.
- [2] W. Fu, L. G. Wright, P. Sidorenko, S. Backus, and F. W. Wise, "Several new directions for ultrafast fiber lasers," *Opt. Express* 26, 9432 (2018).
- [3] M. Piche, "Mode locking through nonlinear frequency broadening and spectral filtering," *Proc. SPIE* 2041, pp. 358-365 (1993).
- [4] M. Rochette, L. R. Chen, K. Sun and J. Hernandez-Cordero, "Multiwavelength and Tunable Self-Pulsating Fiber Cavity Based on Regenerative SPM Spectral Broadening and Filtering," *IEEE Photon. Tech. Lett.* 20 (17), pp. 1497-1499, (2008).
- [5] T. North and M. Rochette, "Regenerative self-pulsating sources of large bandwidths," *Opt. Lett.* 39, 174–177 (2014).
- [6] K. Regelskis, J. Zeludevicius, K. Viskontas, and G. Raciukaitis, "Ytterbium-doped fiber ultrashort pulse generator based on self-phase modulation and alternating spectral filtering," *Opt. Lett.* 40, 5255–5258 (2015).
- [7] J. Želudevicius, M. Mickus, K. Regelskis, "Investigation of different configurations and operation regimes of fiber pulse generators based on nonlinear spectral re-shaping," *Opt. Express*, 26, pp. 27247-27264 (2018).
- [8] P. Repgen, D. Wandt, U. Morgner, J. Neumann, and D. Kracht, "Sub-50 fs, μ J-level pulses from a Mamyshev oscillator–amplifier system," *Opt. Lett.* 44(24), pp. 5973-5976 (2019).
- [9] C. Ma, A. Khanolkar, Y. Zang, and A. Chong, "Ultrabroadband, few-cycle pulses directly from a Mamyshev fiber oscillator," *Photonics Res.* 8(1), 65 (2020).
- [10] M. Olivier, V. Boulanger, F. Guilbert-Savary, P. Sidorenko, F. W. Wise, and M. Piché, "Femtosecond fiber Mamyshev oscillator at 1550 nm," *Opt. Lett.* 44, 851–854 (2019).
- [11] B. Schuhbauer, V. Adolfs, F. Haxsen, A. Wienke, U. Morgner, J. Neumann, and D. Kracht, "Generation of 15 nJ pulse energy by a sub-150 fs thulium-doped fiber Mamyshev oscillator," *Opt. Lett.* 47(21), pp. 5610-5613 (2022).

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
波長 1550nm 帯における Mamyshev 発振器の開発	第70回応用物理学会春季学術講演会	2023年3月