

超高速フォトリックタイムストレッチ光干渉断層計による レーザー加工中における材料内部の可視化

同志社大学 理工学部電子工学科
教授 鈴木 将之
(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020229-B3)

キーワード：フォトリックタイムストレッチ OCT, フェムト秒ファイバレーザー, 微細加工

1. 研究の目的と背景

本研究提案の目的は、フォトリックタイムストレッチ (Photonic Time Stretch : PTS) 技術を用いて MHz フレームレートの速度で動作可能な光干渉断層計 (Optical Coherence Tomography : OCT) の開発を目指した偏波保持ファイバレーザーの開発を行い、従来技術では実現できない高速イメージング技術の開拓に取り組むことである。開発した高速イメージング技術は炭素繊維強化プラスチック (CFRP) のレーザー加工やレーザーピーニングにおける金属材料にレーザーを照射している最中の金属の内部状態を可視化し、その物理機構に迫り、国内のものづくり産業に貢献することが期待される。

CFRP は高い強度と軽さを併せ持つ材料であり、航空機や船舶などの産業分野で活用されており、近年では建築材料への利用も拡大しつつある。しかし、従来技術を用いて CFRP を加工する際にその高い強度が問題となり、短時間で細かい穴開けや切断が困難とされており、レーザーによる精密加工への期待が高まっている。一方、レーザーピーニングとは、金属材料の表面にレーザーを照射したときに生成される局所的な衝撃波を利用して、表面に圧縮の残留応力を付与する技術であり、原子炉構造物の応力腐食割れを防ぐ技術である。これらの加工技術に関しては、レーザーの入射条件を詳細に変化させて最適パラメータの探索を行う研究を中心に進められてきた。そのため物理機構に関しては不明瞭な点が多い。レーザー照射中の材料内部の変化をリアルタイムで計測して、物理機構を理解することができれば、これらの材料加工物理に有益な情報を提供することが期待できる。

材料表面付近の内部構造を非接触かつ非破壊でイメージングできる技術のひとつとして OCT がある¹⁾。OCT の最大の特徴は深さ数ミリの領域を数 10 μm の分解能で断層像を構築できる点にある。OCT の基本原理は白色光マイケルソン干渉計であり、光源のスペクトル幅を広げれば、深さ方向の分解能は向上し、スペクトル幅を 200 nm まで広げると深さ方向の分解能は 2 μm 以下になる。現在、高速動作が可能な OCT としてフーリエドメイン OCT があり、これには回折格子とラインセンサーで構成される方式と波長掃引光源と単一光検出器で構成される方式が存在する。しかし両方式ともに高分解能化と高速動作を同時に実現することはできない。分光器を用いる方法は高い分解

能を実現できるが、ラインセンサーを用いるためフレームレートは数 100 kHz 程度に制限される。一方、波長掃引光源を用いる方法は、高速動作は可能であるが、光源の共振器内のミラーを高速動作させるため、波長のモードホッピングが生じる。その結果、信号処理が複雑となり、高速動作時において深さ方向の高分解能化が極めて困難である。一方、レーザー加工においては、1 ショットまたはいくつかのパルス列を短い時間で照射する (バーストモード) 場合が多い。このような現状において、レーザー照射条件に対応したフレームレートで内部構造変化を観察するためには、高い深さ方向の分解能を維持しながら高速動作を同時に満たすことが望まれる²⁾。

この従来技術の問題点を解決するために、シングルピクセルの光検出器を用いて超高速で分光データが取得できる PTS に着目し^{3,4)}、この PTS を回折格子とラインセンサーに置き換えた新たな OCT、すなわち PTS-OCT が実現できれば、モード同期レーザーのフレームレート (数 MHz) に対応した速度で断層画像を取得できると考えた。PTS とは、極短光パルスが媒質中を伝搬する際に生じる群速度分散によって極短光パルスを数ナノ秒程度まで時間伸長して、その波形をスペクトル情報として周波数軸に射影する超高速の分光法である⁵⁻⁷⁾。一般的に PTS の光源には、モード同期レーザーが使用され、市販のモード同期レーザーのパルスとパルスの間隔は 10 ns 程度である。このパルス間隔の場合、スペクトル幅が 100 nm を超えるとパルス同士が干渉するため、分光データの取得が妨げられる。パルス同士の間隔を長くするためにはモード同期レーザーの共振器長を延長する必要がある。しかし共振器を構成するファイバ長を延長すると室内の温度変化によりファイバ長と偏波が変化し、安定したモード同期動作を得ることは極めて困難となる。しかし、このような特性を有する市販のレーザーは現存しない。共振器長を延長して安定なモード同期動作を得るためには偏波保持ファイバを用いて共振器を構成する必要がある。この偏波保持ファイバを用いて共振器を構成する場合、モード同期機構は、可飽和吸収体を用いる。そこで応募者は、偏波保持ファイバと可飽和吸収体で構成したモード同期レーザーの開発を行った。ところが共振器長を 6 m 以上に延長すると二つのパルスが形成されることを確認した⁸⁾。

この問題を解決するために偏波保持ファイバを用いて、モード同期動作が可能な非線形ループミラーと散逸ソリトン構成を融合した新しいモード同期レーザーを開発して、この光源を用いて PTS-OCT の開発に取り組み、従来技術では実現できない MHz のフレームレートで動作可能な可視化技術の実現を目指すことが、本研究提案の最終目的である。この開発した PTS-OCT を用いれば、レーザー加工最中の材料内部の断層撮影が可能となり、レーザー加工物理の理解に貢献できると考えられる。

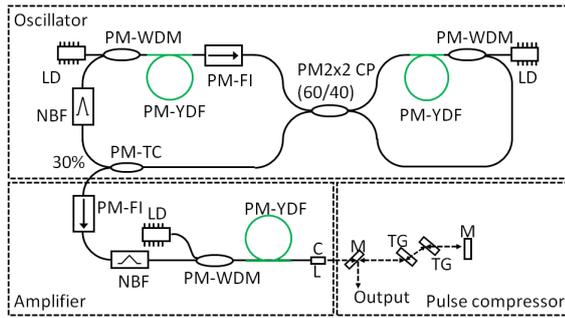


図 1. 実験配置図

2. 実験方法と結果

図 1 に開発したモード同期ファイバレーザーの構成図を示す。発振器のモード同期機構は非線形ループミラー (Nonlinear amplifying loop mirror: NALM) を用いた。このモード同期機構の利点は偏波保持ファイバを用いることができる点と低い繰り返し周波数動作による高エネルギーパルス生成が可能な点である。波長 976 nm の励起 LD にて Yb ファイバを励起し、光アイソレーターはメインループ側にて光が図中において時計回りに伝搬するように設定している。メインループと NALM ループを接続するカップラは、効率的にモード同期動作が得られるように分岐比 60/40 の非対称比率カップラを用いた⁹⁻¹¹⁾。この発振器において、散逸ソリトン動作を実現するためにメインループ側に狭帯域波長制限フィルタ (Narrow bandpass filter: NBF) を挿入した。NBF の帯域幅は約 3.3 nm とした。低い繰り返し周波数を実現するために NBF と PM-WDM の間に長さ 10 m から 25 m の偏波保持シングルモードファイバ (Polarization maintained fiber: PMF) を融着して、モード同期動作の有無を確認した。

メインループと NALM ループの励起 LD パワーを 170 mW と 175 mW にしたとき、モード同期動作を得ることに成功した。図 2 に得られたスペクトルを示す。中心波長 1030 nm に対してスペクトル幅 10 nm であった。また、溝数 1200 lines/mm の透過型回折格子対を用いて、パルス圧縮を行った。その結果を図 3 に示す。回折格子対を用いた圧縮後の光パルスのパルス幅は 300 fs であった。図 4 に得られたモード同期動作におけるパルストレインを示す。得

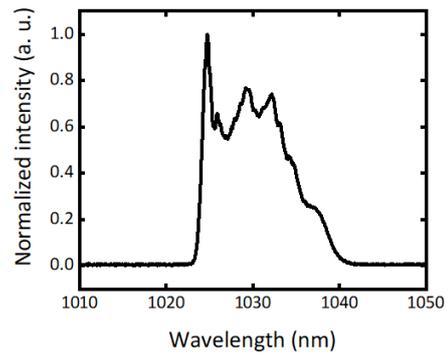


図 2. 出力スペクトル

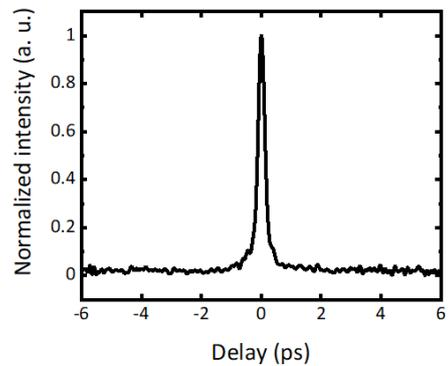


図 3. 圧縮後のパルス幅

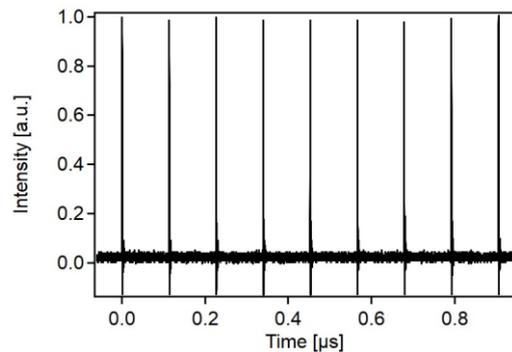


図 4. パルストレイン

られた繰り返し周波数 6.6 MHz と出力される光パルスの平均出力 48 mW から算出される光パルスのエネルギーは 7.3 nJ であった。特筆すべき点として、モード同期機構に NALM そして散逸ソリトン動作が実現できる共振器構造を用いることで従来技術では実現が困難とされていた繰り返し周波数 10 MHz 以下の繰り返しを達成できた。また共振器は PMF を用いて構築しているため、耐環境性に優れており、3 時間における平均出力安定性を計測した結果、出力変動は約 0.5% 以内であり、これは市販のレーザーの

出力安定性と同程度の高い出力安定性であった。

パルス圧縮後のパルス幅をさらに短くするために増幅器内にて引き起こされる自己位相変調 (Self-phase modulation: SPM) を利用した広帯域増幅に取り組んだ。発振器から出力された光パルスを正常分散ファイバに入射させると正の分散が付加されて、光パルスは線形チャープを有する。ここで十分長い正常分散ファイバを伝搬した際のチャープした光パルスの波長と時間の関係を図5に示す。

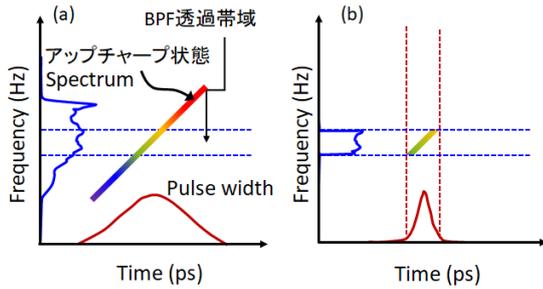


図5. 帯域制限フィルタによるパルス整形

図5(a)に示すように光パルスに対して BPF を透過させると、図5(b)に示すように光パルスのスペクトル帯域は制限される。それと同時にパルス幅も切り出されて短くなる。これはチャープした光パルスは時間軸上に波長ごとに整理して伝搬するためである。光パルスのチャープの量と BPF の透過帯域を制御すると時間帯域積幅がフーリエ限界に近い光パルス幅が得られる。この光パルスを Yb ファイバ増幅器に入射すると入射光の短パルス化に伴い増幅器内において、光パルス増幅と SPM が同時に引き起こされて、スペクトル幅を広げることが可能である。また、SPM でスペクトルを広げた光パルスは線形チャープを有することから、回折格子を用いて広帯域化した光パルスはパルス圧縮が可能と考えられる。そこで開発した発振器から出力された光パルスが正常分散を有しており線形チャープしていることに着目し、図1における発振器と増幅器の間に中心波長 1036 nm、帯域幅 3.3 nm の NBF を設置した。なお、増幅器は長さ 1.2 m の偏波保持 YDF と波長 976 nm の励起 LD (最大パワー900 mW) を用いて、その構築を行った。その後、FC/APC コネクタとコリメータレンズを用いて、光パルスを freespace に取り出して、回折格子対で構築したパルス圧縮器にてパルス圧縮を行った。

NBF におけるパルス整形を確認するためにオートコリレータを用いて NBF 通過前後のパルス幅の計測を行った。その結果を図6に示す。NBF 透過前のパルス幅は約 8 ps に対して、NBF 透過後のパルス幅は 2 ps であった。これはチャープした光パルスが NBF を通過することでスペクトル帯域が制限されると同時にパルス幅が切り出されることで光パルスのパルス整形が実現されたことを示している。なお、NBF 通過後の光パルスエネルギーは、約 1 nJ

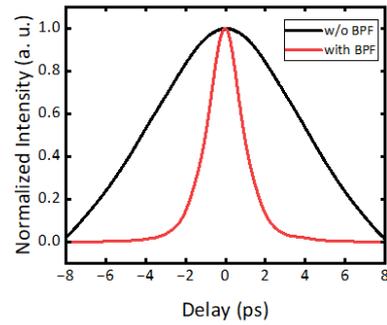


図6. NBF 透過前後のパルス幅

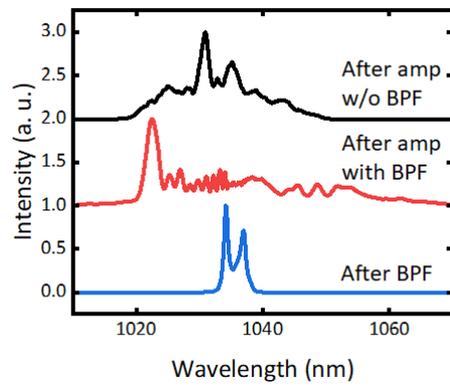


図7. 増幅後のスペクトル

であった。この結果から、短パルス化された光パルスが増幅器内において増幅されながら SPM を引き起こすことで広帯域増幅されることが期待できる。

図7に BPF を通過した直後の光スペクトルと BPF の有無による増幅後の光スペクトルを示す。NBF を通過したスペクトルは中心波長 1036 nm において帯域幅 3.3 nm であった。スペクトル形状に複数のピークが見られるが、これらのピークは発振器から出力される光パルスのスペクトル形状に起因するものである。NBF を用いた増幅後のスペクトル形状は、非対称かつ波長 1022 nm においてピークが見られるが、スペクトルの裾は波長 1015 nm から 1065 nm まで広がっている。一方、NBF を使用しない場合は、波長 1030 nm と 1035 nm においてピークが観測され、さらにスペクトルの裾の広がり、波長 1020 nm から 1045 nm までにとどまっていた。

図8に増幅後の光パルスを回折格子対にてパルス圧縮した結果を示す。NBF を用いたときのパルス幅は 125 fs、NBF を用いなかったときのパルス幅は 350 fs であった。発振器から出力された光パルスを回折格子対にてパルス圧縮したとき、パルス幅は 230 fs であった。NBF を用いたときのパルス幅が短くなる理由は、図5の説明で述べた

通り、チャープした光パルスが NBF を通過するとスペクトル幅が制限されると同時に光パルスのパルス幅も切り出されて短パルス化されるためである。実際、図 6 に示すように BPF 前後のパルス幅はそれぞれで 8 ps と 2 ps であり、NBF を用いることでパルス幅は 4 分の 1 まで短縮されていることを確認している。このことから増幅器に入力される光パルスのパルス幅が短くなったことで、増幅器内において光パルスは増幅されると同時に SPM によりスペクトル幅がより広がったことを示している。一方、NBF の有無によるパルス圧縮後の平均出力は、それぞれ 292 mW と 370 mW であった。これは入力の光パルスの平均出力が BPF を用いることで低くなったことに起因する。その一方で、ピーク強度は BPF を用いたとき、0.35 MW そして BPF を使用しないときは 0.16 MW と算出される。このことから BPF を用いることで約 3 倍のピーク強度の増大に成功した。

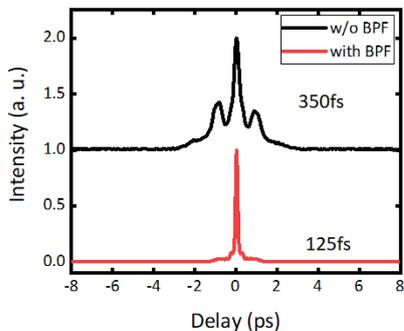


図 8. パルス圧縮後のパルス幅

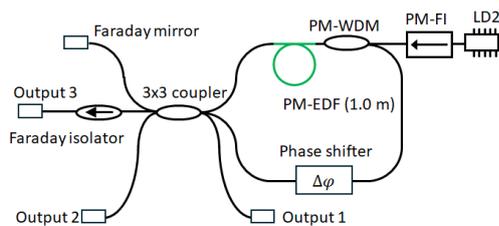


図 9. 全偏波保持 Er ファイバレーザシステム

つぎに低繰り返し動作可能な光源の発振波長を 1030 nm 以外でも実現するために波長 1550 nm 帯における 3 × 3 カプラを用いた全偏波保持 Er 添加ファイバレーザの開発も進めた。図 9 に開発したシステムの構成図を示す。発振器は PM ファイバのみで構成されており、共振器長は 4.8 m、Er 添加ファイバ (EDF) は 1.0 m、共振器全体の分散値は -0.082 ps^2 である。励起 LD のパワーと位相シフタ ($\Delta\phi$) の調整によりモード同期を実現する¹²⁾。モード同期動作が得られたときパルスの繰り返し周波数は 43 MHz であった。シングルパルスを得るために LD の励起

パワーを 300 mW まで上げたのちに 200 mW まで上げることでシングルパルスを得ることができた。このときの平均出力は 3.7 mW であった。一度、シングルパルス動作が得られるとモード同期動作は安定した。最も対称なスペクトル形状が見られたポート 1 の出力パルスのスペクトルとパルス幅を図 10 に示す。

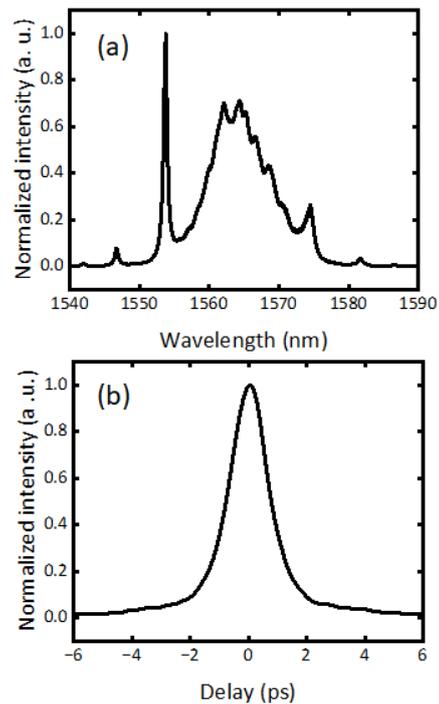


図 10. 出力特性(a)スペクトルと(b)パルス幅

中心波長 1563 nm に対してスペクトル幅は 14.3 nm であり、パルス幅は 1.6 ps であった。共振器は異常分散ファイバのみで構築したため、スペクトルにケリーサイドバンドが観測された。ケリーサイドバンドを除去するためには、共振器内の分散値をゼロに近づける必要がある。一方、増幅器に入力する前に帯域制限フィルタを透過させるとケリーサイドバンドが生じる波長域を抑圧することができ、スペクトル形状を均一にしながらか増幅できると考えられる。また、さらなる低繰り返し化に関しては、先に述べた散逸ソリトン動作を用いる必要があるため、共振器内に長さ数 10 m の正常分散ファイバを融着することで、実現できると見込んでいる。

つぎに PTS-OCT の開発を目指した分光システムについて述べる。PTS は、媒質中を光パルスが伝搬する際の群速度分散を利用してスペクトル情報を時間軸上に射影することで実現する。そこで長さ 4.2 km のシングルモードファイバ (Single mode fiber: SMF) を使用して PTS を行い、高い時間分解能を有する光検出器とオシロスコープを用

いて PTS 分光システムの構築を行った。

図 1 1 に開発した PTS を用いて計測したスペクトルを示す。スペクトル幅 20 nm を有する光パルスを SMF にて、時間幅 2 ns まで時間的に伸長して、時間領域 14 μ s において、フレームレート 10.7 MHz でスペクトル計測を行うことに成功した。図 1 1 の水色の実線は PTS しないときの時間波形を表しており、黄色の実線は PTS した際の時間波形である。図 1 1 (b) より、時間軸上にスペクトル情報を射影されていることがわかる。また PTS したスペクトルの分解能は、0.07 nm であり、OCT を実現するための干渉計測を行うために十分なスペクトル分解能を得ることができた。

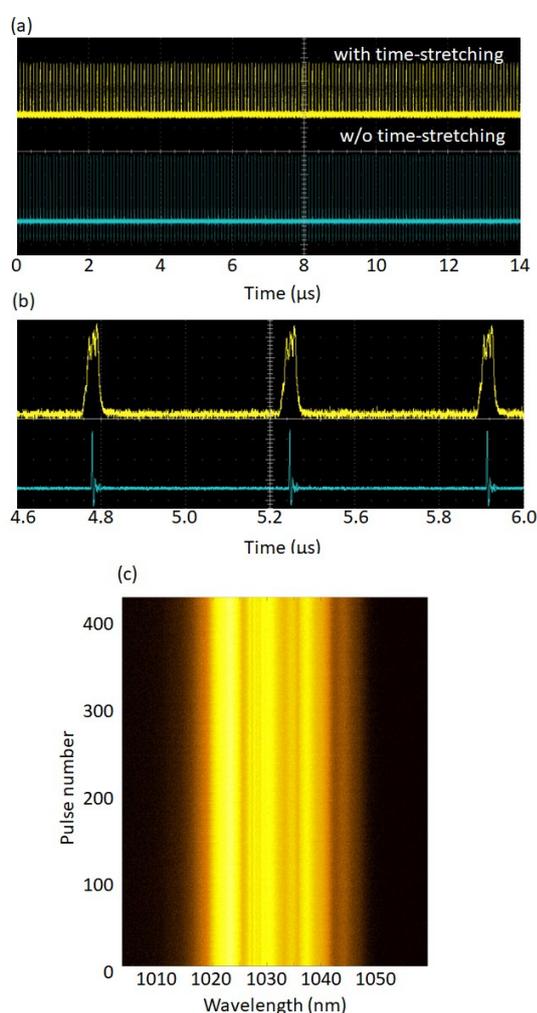


図 1 1 . PTS 計測結果. (a) 時間領域 14 μ s における光パルスの波形. 青色が PTS 無しの波形, 黄色が PTS 有りの波形. (b) 時間領域を 4.6-6.0 μ s における波形. (c) 縦軸をパルス数, 横軸を波長としたときの 2 次元カラープロットイメージ

3. まとめ

本研究課題では、MHz のフレームレートで動作可能な可視化技術の実現を目指すために従来技術では困難とされている光源の開発と PTS 分光システムの開発に取り組んだ。光源の開発に関しては、非線形増幅ミラーと散逸ソリトン動作を融合したモード同期ファイバレーザの開発を行い、繰り返し周波数 6.6 MHz の全偏波保持ファイバレーザの開発に成功した。また発振器と増幅器の間に NBF を挿入して、スペクトル制限によるパルス整形を行い、広帯域増幅による短パルス化が可能な増幅法を実現した。PTS 分光法に関しては、SMF と高速の光検出器、オシロスコープを用いて、フレームレート 10 MHz でスペクトル計測を行うことに成功し、スペクトル分解能 0.07 nm を実現できた。得られたスペクトル分解能は OCT における干渉縞を計測することが十分可能な分解能であり、これら開発した要素技術を組み合わせることで、PTS-OCT を実現できる見込みを得ることができた。

謝辞

本研究の開発に貢献した報告者の研究室に所属している学生らに感謝する。また、本研究課題に対して助成いただいた、公益財団法人天田財団に対し、心よりお礼申し上げる。

参考文献

- 1) D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, and C. A. Puliafito, et al., "Optical coherence tomography," *Science* 254(5035), 1178–1181 (1991).
- 2) W Drexler, JG Fujimoto, eds *Optical coherence tomography: technology and applications*, (Springer, 2015).
- 3) K. Goda, and B. Jalali, Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements. *Nat. Photon.* 7, 102-112 (2013).
- 4) A. Mahjoubfar, D. V. Churkin, S. Barland, N. Broderick, S. K. Turitsyn, B. Jalali, Time stretch and its applications. *Nat. Photon.* 11(6), 341-351 (2017).
- 5) K. Goda, A. Fard, O. Malik, G. Fu, A. Quach, and B. Jalali, High-throughput optical coherence tomography at 800 nm, *Opt. Express* 20, 19612 (2012).
- 6) N. Hayashi, M. Hoshikawa, K. Ishii, T. Fujita, M. Kanamori, T. Deguchi, R. Nomura, H. Hasegawa, T. Makino, T. Hashimoto, H. Furukawa, N. Wada, In-process measurement of a keyhole using a low-coherence interferometer with a high repetition rate, *Opt. Express*, 29, 32169 (2021).
- 7) H. Asghari, "Visible wavelength time-stretch optical coherence tomography," *Opt. Express* 31(15), 24085–24096 (2023).

- 8) M. Suzuki, O. Boyraz, H. Asghari, and B. Jalali, "Spectral dynamics on saturable absorber in mode-locking with time stretch spectroscopy," *Sci. Rep.* 10, 14460 (2020).
- 9) M. Erkintalo, C. Aguergaray, A. Runge, N. G. R. Broderick, "Environmentally stable all-PM all-fiber giant chirp oscillator," *Opt. Express* 20, 22669 (2012).
- 10) Y. Yu, H. Teng, H. B. Wang, L. N. Wang, J. F. Zhu, S. B. Fang, C. Q. Chang, J. L. Wang, and Z. Y. Wei, "Highly-stable mode-locked PM Yb-fiber laser with 10 nJ in 93-fs at 6 MHz using NALM," *Opt. Express* 26, 10428 (2018).
- 11) S. Tsutsui, Y. Fujimoto, H. Toda, and M. Suzuki, "Simple method for broadband amplification in a polarizing maintained Yb fiber amplifier with a narrow bandpass filter," *Opt. Lett.* 47(20), 5417-5420 (2022).
- 12) T. Jiang, Y. Cui, P. Lu, C. Li, A. Wang, and Z. Zhang, "All PM fiber laser mode locked with a compact phase biased amplifier loop mirror," *IEEE Photonics Technol. Lett.* 28(16), 1786–1789 (2016).