

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04985

研究課題名(和文) 時間伸張フーリエ分光による広帯域光パルス形成機構理解の開拓

研究課題名(英文) Spectral dynamics of broadband laser pulse using a time stretch dispersive Fourier transform

研究代表者

鈴木 将之 (Masayuki, Suzuki)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：60622371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究提案は時間伸張分光を用いて広帯域ファイバレーザにおける8000フレームのシングルショットスペクトル計測を行い、光パルス形成の物理機構理解に取り組むものである。可飽和吸収体を用いたYbファイバモード同期レーザのcw発振からモード同期動作に変わる瞬間の連続的なスペクトル計測を行った。その結果、可飽和吸収体は、強度の高いパルスは反射するが、強度の低いパルスの短波長側と長波長側の成分は可飽和吸収体で吸収するダイナミクスの観測に成功した。また二つのうちの強度が高いひとつのパルスのみが共振器内で生き残り、もう一方のパルスは、消失し、最終的に安定したモード同期動作が得られることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた共振器内にて生成された二つのパルスの相対位相と間隔がラウンドトリップの進行につれて変化するダイナミクスや安定したモード同期動作直前に観測される周期的にスペクトル形状が変化する現象は、今まで報告されていない結果である。これらの振る舞いは過去の理論計算において報告されていない現象であり、これらのダイナミクスを理論計算に反映させることでパルス形成機構の理解を深めることができる。そのため、これらの観測結果は、最近注目されているMamyshev発振器に代表されるような高出力かつ短パルス生成が可能な新たなパルス形成機構の提案や光パルスの安定化制御技術への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We experimentally demonstrate real-time spectral evolution of femtosecond pulse build-up in a homemade passive mode-locked Yb fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror using TS-DFT. Capturing 700 consecutive spectra (~17 μ s time window) in real-time using the time-stretch technique, we are able to resolve the transient dynamics that lead to stable mode-locking. The dynamics on multiple pulses is originated from a fast relaxation time of the saturable absorption effect. This study provides novel insights into understanding the pulse behavior during the birth of an ultrafast mode-locked laser pulse and the stable single-pulse operation which is highly stabilized.

研究分野：光工学

キーワード：時間伸張分光 モード同期ファイバレーザ 超高速分光 ソリトン 孤立波

振器から30パーセントの光パルスを取り出した。励起LDの出力が66 mWのとき、モード同期動作を確認し、出力は7 mW、スペクトル幅は5.7 nm、パルス幅は1.3 ps、繰り返し周波数は40 MHzであった。なお、パルス幅はチャープして出力されており、共振器外部に設置した回折格子対を用いてパルス幅を約300 fsまで圧縮できることを確認した。時間伸長分光は、Fig. 3 下部に示すようなシングルモードファイバと高速の光検出器、オシロスコープを用いて構築した。パルス伸長されたパルス幅は約2 nsであり、このときのスペクトル分解能は約0.07 nmであった。

4. 研究成果

Fig. 4にLDの電源を入れてからモード同期動作に変遷するシングルショットスペクトルの信号を示す。Fig. 4はオシロスコープのスクリーンショット像であり、縦軸は時間伸長した波形の強度、横軸は時間を表している。Fig. 4 (a)において、約20 msから100 msの時間領域において、発振器の共振器長と異なるQスイッチパルス動作が生じている。その後、Fig. 4 (b)に示すように100.27 msにおいて動作はQスイッチ動作から安定したモード同期動作に移行した。移行後は安定したモード同期の状態が続いている。複数回、同様な計測を行った結果、Qスイッチ動作の時間長は異なるが、Qスイッチ動作を経て安定したモード同期動作に移行することを確認した。

Fig. 5に光パルスがモード同期動作に変遷する前後700ラウンドトリップのシングルショットスペクトルの二次元強度分布を示す。Fig. 5はFig. 2(b)および(c)と同じ方法を用いて構築しており、安定したモード同期動作時の繰り返し周波数からラウンドトリップ時間を算出して、その時間ごとのパルス波形を整列して構築している。時間軸から波長軸への変換は、OSAによる時間積分スペクトルのデータを用いて校正した。Fig. 5の最初の100ラウンドトリップの領域は、狭帯域スペクトルの光パルスのエネルギーが徐々に増大し、その後100から300ラウンドトリップの領域では、非線形効果により光パルスのスペクトル幅は広がり、NLPと類似したラウンドトリップごとに異なるスペクトル形状を有するパルスが生成されている。先行研究においても同様な現象が観測されており、この領域は変調不安定領域と呼ばれている。注目すべきは、350から490ラウンドトリップ領域において、スペクトルに干渉縞が観測されている。ラウンドトリップが進行するにつれて、この干渉縞の間隔は広くなると同時に干渉縞のピーク波長は、短波長側にシフトしている。これは、二つのパルスが共振器に存在しており、その二つのパルスの時間間隔がラウンドトリッ

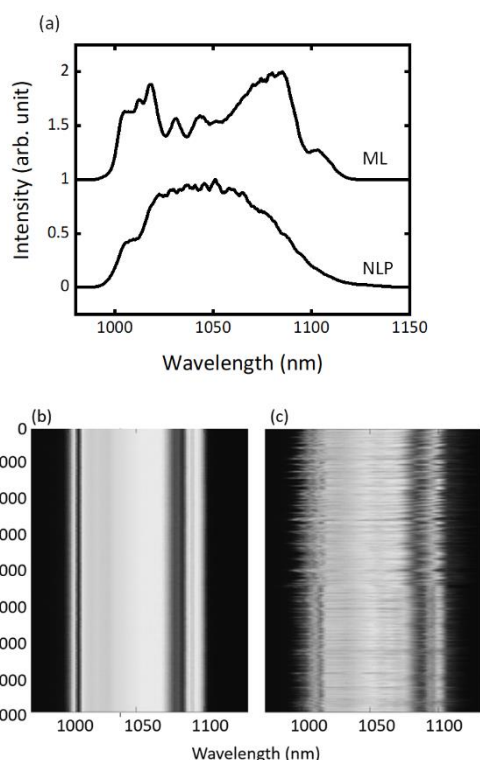


Fig. 2. (a) Time integrated spectrum of mode-locking and noise-like pulse (NLP). Single-shot spectra of 8000 consecutive pulses (b) mode-locking and (c) NLP.

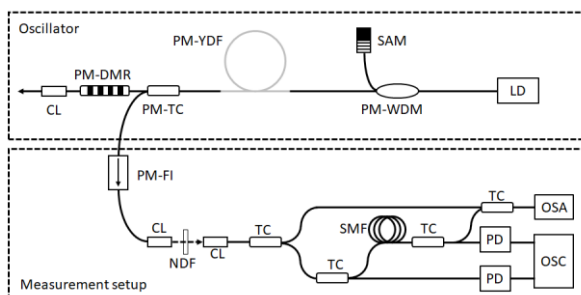


Fig. 3 Schematic of homemade all polarization maintaining (PM) Yb fiber oscillator and time stretch spectroscopy.

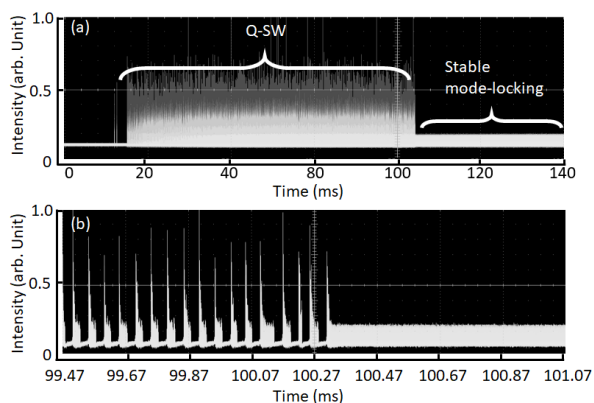


Fig. 4 (a) Transient spectral dynamics of mode-locking. (b) Zoom of (a) in the time scale of 99.47 ms-101.07 ms.

これは、二つのパルスが共振器に存在しており、その二つのパルスの時間間隔がラウンドトリッ

プが進行するにつれて近接し、さらにそれら二つのパルスの相対位相が変化していることを表している。また 490 ラウンドトリップの領域においては、干渉縞は、中心波長の部分のみに存在しており、その後は、干渉縞は観測されず、安定したモード同期動作に変遷した。今回の実験に使用した可飽和吸収体の緩和時間は、500 fs であり、490 ラウンドトリップのときの二つのパルスの間隔は干渉縞の間隔から 110 fs と評価した。このことから、二つのパルスのうちの一つの強度の高いパルスのテール部分にもう一つの強度の低いパルスが存在していると考えられる。さらに可飽和吸収体により、強度の高いパルスは反射するが、強度の低いパルスの短波長側と長波長側の成分は可飽和吸収体で吸収される。その結果、強度の高いパルスのみが共振器内で生き残り、もう一方の強度の低いパルスは、消失し、最終的に安定したモード同期動作が得られる。複数回、同様の計測を行った結果、三つの過程のラウンドトリップ回数は異なるが、この三つの過程を経て安定したモード同期動作が得られており、この現象の再現性は高い。過去の Nonlinear Schrödinger 方程式や Complex Ginzburg-Landau 方程式を用いた計算結果では、モード同期動作直前に今回観測されたような二つのパルスの振る舞いは、報告されておらず、本計測結果は理論計算の発展に貢献できると考えられる。

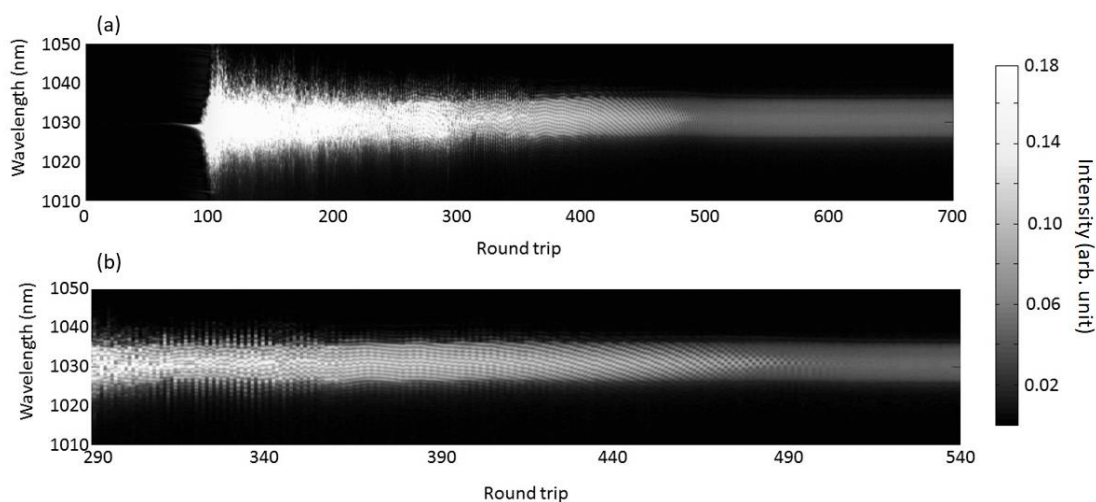


Fig. 5 (a) Single-shot spectra of 700 consecutive pulse between narrow band spectral pulse formation and stable mode-locking. (b) Zoom of (a) in the roundtrip number of 290-540.

以上のことから、時間伸長分光による連続的なシングルショットスペクトル計測を用いて、光パルス形成のダイナミクスの理解を進めた。シングルショットスペクトル計測から得られた結果は、従来の時間積分スペクトル計測では得られない情報であり、これらの情報を理論計算に反映させることで大出力かつ短パルス生成が可能なモード同期レーザー開発に貢献できると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 鈴木将之	4. 巻 49
2. 論文標題 タイムストレッチ分光法を用いたフェムト秒レーザーパルス形成のダイナミクス	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 200-205
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki Masayuki, Boyraz Ozdal, Asghari Hossein, Jalali Bahram	4. 巻 10
2. 論文標題 Spectral dynamics on saturable absorber in mode-locking with time stretch spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14460
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-71342-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Suzuki Masayuki	4. 巻 20287473
2. 論文標題 Observation of Spectral Instability in Fiber Laser with Photonic Time Stretch	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2020)	6. 最初と最後の頁 P22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/MWP48676.2020.9314478	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 鈴木将之	4. 巻 2019
2. 論文標題 モード同期ファイバレーザによる時間伸長フーリエ分光	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019年度ハリス理化学助成研究会発表会	6. 最初と最後の頁 14-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鈴木将之	4. 巻 RTM-19
2. 論文標題 ファイバーレーザーを用いた時間伸長フーリエ分光による高速イメージング	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 レーザー学会第534回研究報告	6. 最初と最後の頁 31-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 貝原 祥典, 戸田裕之, 鈴木将之
2. 発表標題 YbファイバMamyshev発振器の開発
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊幸輝, 筒井周太, 戸田裕之, 鈴木将之
2. 発表標題 NOLMを用いた全偏波保持モード同期Ybファイバーレーザー
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第 41 回年次大会講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清原 知己, 三上航平, 戸田裕之, 鈴木将之
2. 発表標題 時間伸長分光を用いたスーパーコンティニウム光の特性評価
3. 学会等名 第5回フォトニクスワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木将之, 貝原 祥典, 戸田裕之
2. 発表標題 YbファイバMamyshev発振器
3. 学会等名 第5回超高速光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊幸輝, 筒井周太, 戸田裕之, 鈴木将之
2. 発表標題 NOLM を用いた全偏波保持 Yb ファイバーレーザー発振器の開発
3. 学会等名 レーザー学会第548回研究会「ファイバレーザー技術」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 筒井周太, 渡邊幸輝, 戸田裕之, 鈴木将之
2. 発表標題 非線形増幅ループミラーを用いたモード同期ファイバーレーザーの開発
3. 学会等名 レーザー学会第548回研究会「ファイバレーザー技術」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayuki Suzuki
2. 発表標題 Photonic Time Stretch Measurement for Ultrafast Mode-Locked Fiber Laser
3. 学会等名 2019 URSI-Japan Radio Science Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Suzuki, and H. Kuroda
2. 発表標題 Spectral dynamics of build-up femtosecond pulse in mode-locked Yb fibre laser with time stretch spectroscopy
3. 学会等名 The 8th Advanced Lasers and Photon Sources Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 筒井周太、渡邊幸輝、戸田裕之、鈴木将之
2. 発表標題 非線形ループミラーを用いた全偏波保持Ybファイバーモード同期レーザーの開発
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会春季
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木将之
2. 発表標題 フェムト秒ファイバレーザにおける光パルス形成のスペクトルダイナミクス
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第 40 回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊幸輝、筒井周太、戸田裕之、鈴木将之
2. 発表標題 NALMを用いた超短パルスYbファイバーレーザーの開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第 40 回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三上航平、戸田裕之、清原知己、鈴木将之
2. 発表標題 赤外域のスーパーコンティニウム光のシングルショットスペクトル計測
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第 40 回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayuk Suzuki
2. 発表標題 Shot-to-shot spectral fluctuations in fiber laser with time stretch spectroscopy
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会秋季
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊幸輝，戸田裕之，鈴木 将之
2. 発表標題 全偏波保持 Yb ファイバーレーザー発振器の開発
3. 学会等名 レーザー学会第538回研究会「ファイバレーザー技術」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三上航平，戸田裕之，鈴木将之
2. 発表標題 スーパーコンティニウム光の連続的シングルショットスペクトル計測
3. 学会等名 レーザー学会第538回研究会「ファイバレーザー技術」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Suzuki
2. 発表標題 Spectral dynamics in build-up femtosecond pulse with time stretch spectroscopy
3. 学会等名 The 62nd KPSI Seminar, QST (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Suzuki, O. Boyraz, M. H. Asghari, P. D. Trinh, H. Kuroda, and B. Jalali
2. 発表標題 Dynamics of Soliton Explosion in a Passively Mode-Locked Yb Fiber Laser with Time Stretch Spectroscopy
3. 学会等名 2nd URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI 2018 AT-RASC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Suzuki, and H. Kuroda
2. 発表標題 Spectral-Temporal Dynamics of Soliton Explosion in Passively ModeLocked Yb Fiber Laser
3. 学会等名 The 7th Advanced Lasers and Photon Sources Conference (ALPS'17) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木将之
2. 発表標題 時間伸張フーリエ分光によるファイバーレーザーにおける超高速スペクトルダイナミクス
3. 学会等名 レーザー学会「ファイバーレーザー技術」専門委員会第2回委員会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木将之、黒田寛人
2. 発表標題 モード同期Ybファイバーレーザーにおけるフェムト秒パルス形成のスペクトル変遷
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木将之、黒田寛人
2. 発表標題 Ybファイバレーザー励起広帯域近赤外光生成
3. 学会等名 レーザー学会第525回研究会「ファイバレーザー技術」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木将之、黒田寛人
2. 発表標題 Ybファイバーレーザーにおけるモード同期のスペクトルダイナミクス
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木将之、黒田寛人
2. 発表標題 モード同期Ybファイバーレーザーパルス形成過程におけるSoliton Moleculesの動的観測
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://optelec.doshisha.ac.jp/groups.html>
Spectral periodicity in mode-lock laser
<https://advanceseng.com/spectral-periodicity-mode-lock-laser/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------