

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390105

研究課題名(和文) 異種ファイバレーザーのコヒーレント合成による高繰り返し極短パルス光源の開発

研究課題名(英文) Development of a high-repetition-rate ultrashort-pulse source by coherent synthesis of two-color fiber lasers

研究代表者

吉富 大 (YOSHITOMI, DAI)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・主任研究員

研究者番号：10392680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：光と物質の相互作用における超高速なダイナミクスを調べるためのツールとして、低コスト・省エネルギー・高安定で高繰り返しのファイバレーザーによる極短パルス光源の実現を目的に、2波長の同期したフェムト秒パルスファイバレーザーシステムを開発した。最後のパルス圧縮器を除いて、すべてファイバー融着による構成となっており、堅牢で保守容易なシステムとなっているのが特長である。

研究成果の概要(英文)：We have developed a two-color synchronized femtosecond fiber lasers to realize a low-cost energy-efficient high-repetition-rate stable ultrashort pulse source for probing ultrafast dynamics in the light-matter interaction. The system is robust and easy to maintain because of its all-fiber integration except for the final compressors.

研究分野：レーザー工学

キーワード：フェムト秒 超短パルス レーザー ファイバー ファイバレーザー 同期 コヒーレント合成 極短パルス

### 1. 研究開始当初の背景

超短パルス光源は、光と物質の相互作用における超高速なダイナミクスを探るうえで極めて重要なツールとなる。特に、物質の光励起から格子振動・構造変形・相転移などに至る緩和過程は、きわめて高速であることが知られており、10 フェムト秒(fs)以下のパルスを用いた超高速分光によりその詳細を明らかにする試みが盛んに行われている。このような光励起直後の超高速な初期過程を明らかにすることは、光による物質プロセスの制御への応用を考える上でも、きわめて重要な知見となる。たとえば、光励起により誘起されたコヒーレントな格子振動を巨視的な光学量の変化として実時間で観測する方法が用いられるが、十分な時間分解能を得るためには、光源のパルス幅が振動周期よりも十分短い必要があることは言うまでもなく、極短パルス光源の実現が研究の成否の鍵を握ると言える。

光源に求められる性能として、それほど高い強度のパルスを必要としない用途においては、高繰り返し性を有する光源の方が計測速度や簡便性の上で望ましい。チタンサファイアレーザーのモード同期発振器からの極短パルス発生例が報告されているが、簡便性・低コスト・省エネルギーの諸観点からみると、高価で電力消費の大きい励起源を必要とし、複雑な光路調整を必要とするため、長期安定性にも難がある。一方、ファイバレーザーは、半導体レーザーによる直接励起が可能で低コスト・省エネルギーであり、導波構造により長期安定性を有しているため、ファイバレーザーをベースとした極短パルス光源の構築は、超高速分光に応用する上で有意義である。

ファイバレーザーによる極短パルス光源を実現するには、チタンサファイアレーザーと比べて発振帯域が狭いことが問題となる。帯域の制限を克服する方法として、同期した複数のパルス光源のコヒーレント合成が考えられる。近年、単一のエルビウムファイバ発振器からの出力を分岐し、非線形ファイバによって、独立に広帯域化及び波長シフトを行った後、再合成する手法で極短パルスを発生した例が報告されているが、帯域をさらに拡張し、より自由度の高い最適化を行うためには、異なる媒質(波長)の複数のファイバレーザーを同期させる手法が有効である。異なる媒質のレーザーのタイミング・位相同期においては、我々のグループ(産総研)が世界に先駆けて着手しており、独自の受動的タイミング同期法を用いて、チタンサファイア及びクロムフォスフェイトの2種類の固体レーザー、または、固体レーザーとファイバレーザーの間で、タイミング・位相同期を世界最高(発表当時)の精度で実現している。

### 2. 研究の目的

本研究課題においては、異なる媒質(波長)のファイバレーザーのコヒーレント合成を用いて、低コスト・省エネルギーで高安定な高繰り返し極短パルス光源を実現するために、イッテルビウムファイバレーザー(中心波長1050 nm)とエルビウムファイバレーザー(中心波長1550 nm)を用いたファイバレーザーベースの2波長同期増幅システムを構築し、コヒーレント合成による極短パルス発生を行うための要素技術を確立することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 温度安定化制御による高精度長時間安定タイミング同期

異波長モード同期レーザーのタイミング同期法としては大きく分けて、能動法と受動法がある。我々が独自に提案・実証してきた受動法については、比較的簡便に高精度(低ジッター)な同期が実現できる利点があるが、長時間安定性に難があった。長時間安定性に欠ける主な原因は、環境的揺らぎによる温度変化に伴って、繰り返し周波数が同期の許容差以上に変化してしまうことである。

そこで、本研究では、マスターレーザーのパルスをスレーブレーザー共振器内に注入するマスタースレーブ型の受動的タイミング同期において、マスターレーザーの簡単な繰り返し安定化制御に加えて、スレーブレーザーの簡単な温度安定化制御を加え、環境的揺らぎによる温度変化を抑制することにより、高精度かつ長時間安定な同期を実現した。

#### (2) 全ファイバ高安定エルビウムファイバレーザー発振器及び増幅器の開発

さらに高安定な2波長同期光源を実現するために、共通シード光を2分岐させて片方を波長変換する方式を用いることとした。そのための共通発振器として、波長1550 nmで発振するエルビウムファイバレーザー発振器とその増幅器の開発を行った。高い堅牢性・保守性を実現するため、発振器及び増幅器ともに全ファイバ融着で構成することとした。2波長同期光パルスを得るために、共通発振器からの光を分岐し、2分岐の増幅器を構築した。

#### (3) 分散波発生による全ファイバ2波長同期フェムト秒パルスの発生

共通シードである波長1550 nmのパルスから2波長パルスを得るために、片方の分岐からの増幅出力光を高非線形ファイバに入射し、分散波発生による波長1050 nmへの非線形変換を行った。パルス圧縮可能かどうかを確認するために、周波数分解光ゲート(FROG)法を用いて振幅・位相の時間波形を測定した。

#### (4) 2波長同期フェムト秒チャープパルス増

## 幅器の開発

波長 1050 nm と 1550 nm の 2 波長同期パルスを増幅するチャープパルス増幅システムを開発した。波長 1050 nm 光については、シングルモードファイバーで正分散を与え、パルスを延伸した後、2 段のイッテルビウムファイバレーザ増幅器により増幅を行った。増幅後、透過型回折格子対によるパルス圧縮を行った。

波長 1550 nm 光についても、正常分散ファイバーによるパルス延伸を行った後、エルビウム・イッテルビウム共添加ファイバレーザ増幅器による増幅を行った。増幅後、透過型回折格子対によるパルス圧縮を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 温度安定化制御による高精度長時間安定タイミング同期

チタンサファイア(Ti:S)レーザ(マスター)の出力パルス列をイッテルビウムファイバ(YbF)レーザ(スレーブ)共振器内に注入して、相互位相変調を用いた受動的タイミング同期を行った。マスターレーザには簡単な繰り返し周波数安定化制御を施し、スレーブレーザにはベースプレート上に抵抗ヒーターと温度センサーを設置し、加熱のみの簡便な温度安定化制御を行った。

図 1 に両レーザの繰り返し周波数差の時間変化を示す。両レーザの繰り返し周波数差は RMS 値で 1 mHz 以下に収まっており、温度安定化制御を施したことにより、途中で同期が外れることなく、6 時間にわたって、両レーザの繰り返し周波数が安定に同期していることが分かる。

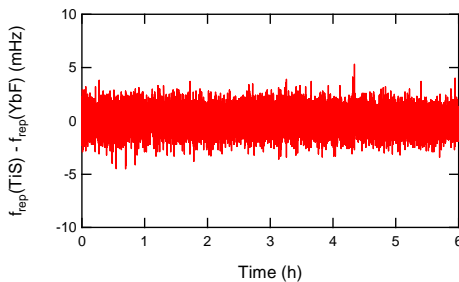


図 1 両レーザの繰り返し周波数差の変化

次に、短時間安定度を調べるために、和周波光による相互相関信号を用いて、両レーザ間のタイミングジッターを測定した。図 2 にタイミングジッターの周波数スペクトル(赤線)と積分値(青線)を示す。ジッターは、1 Hz から 350 kHz までの積分値で 0.75 fs であり、短期的(1 秒間)にはサブフェムト秒の高精度な同期性能を有することが分かった。この高い同期精度は受動的タイミング同期法の優れた点であり、本研究で用いた温度安定化制御との併用により、能動制御に特有の長時間安定性と受動的同期法の特長である高い同期精度の両方を同時に実現することができたと言える。

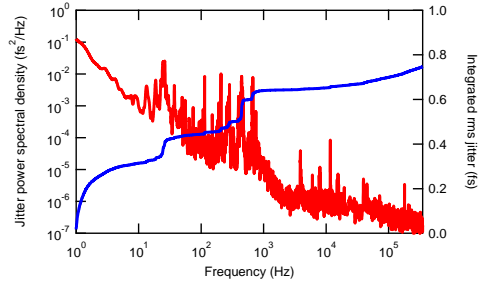


図 2 両レーザ間のタイミングジッター

### (2) 全ファイバー高安定エルビウムファイバレーザ発振器及び増幅器の開発

図 3 に全ファイバーエルビウム発振器の構成を示す。インライン型偏波コントローラーと偏波依存アイソレータを用いることにより、全ファイバー型の共振器構成となっている。正常分散ファイバーの長さを変化させることによって、共振器内分散を調整した。高安定で比較的高出力なモード同期発振光を得るために、共振器内分散を正常領域に設定した。その結果、繰り返し周波数 20 MHz でパルスエネルギー 1 nJ、平均出力 20 mW の出力を得た。

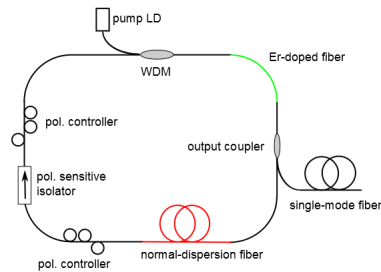


図 3 全ファイバーエルビウム発振器の構成

発振器出力をカプラーで 2 分岐し、自己相似エルビウムファイバレーザ増幅器で増幅した。自己相似増幅法では、フーリエ限界に近いパルスを入射し、利得ファイバー中における増幅とともに、ファイバー中の非線形効果によるスペクトル拡張を行う。正常分散の利得ファイバーを用いることにより、パルス幅・スペクトルがともに自己相似に広がっていくことになる。この時、理想的には線形チャープが付与されるため、増幅後にチャープを取り除けば、入射時よりも短いパルスが得られる。

発振器からの光をシングルモードファイバーで分散補償し、WDM カプラーを通して、利得ファイバーに入射した。入射パルスのパルス幅は 280 fs である。増幅後、再びシングルモードファイバーで再圧縮した結果、パルス幅 41 fs、パルスエネルギー 3 nJ のパルスを得ることができた。図 4 に FROG による時間波形測定結果を示す。発振器・増幅器ともにすべてファイバー融着で構成されて

おり、非常に堅牢なシステムとなっている。

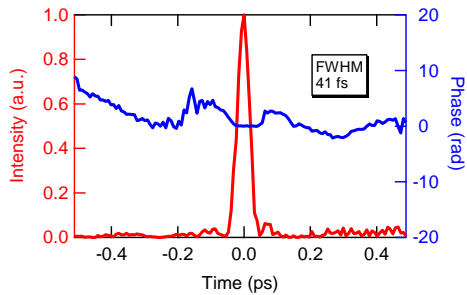


図4 自己相似増幅・圧縮後のパルス波形

(3) 分散波発生による全ファイバー 2 波長同期フェムト秒パルスの発生

異常分散のファイバー中にパルスを入射すると、高次ソリトンが基本ソリトンに分裂する際、正常分散領域に分散波と呼ばれるパルスが生成されることが知られている。本研究ではこの現象を利用して、波長 1550 nm の光をイッテルビウムファイバレーザの利得波長である 1050 nm に変換した。住友電工製の高非線形ファイバー（ゼロ分散波長 1543 nm、非線形係数 21/Wkm）を用いた。まず、ファイバー長 90 cm に通したところ、広帯域なスーパーコンティニウム光が生成されたが、FROG による時間波形を測定したところ、パルス波形は大きく崩れていることが分かった。これは、複雑な非線形過程の混合による結果であると思われる。そこで、長さを 4 cm まで短くしたところ、波長 1050 nm の帯域に明確な分散波のスペクトル成分を得ることができ（図 5）その成分をフィルターで取り出した結果、歪が少なく、ほぼ線形チャープのパルス波形が得られた（図 6）。

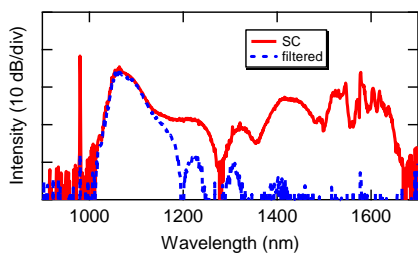


図5 高非線形ファイバーの出力スペクトル

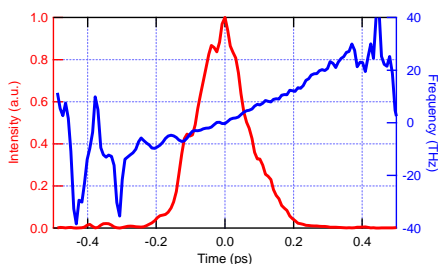


図6 分散波成分の時間波形

(4) 2 波長同期フェムト秒チャープパルス増

幅器の開発

図 7 に 2 波長同期チャープパルス増幅器の構成を示す。波長 1050 nm の光はシングルモードファイバー（正常分散）に通して、パルス幅を延伸した後、コア径 4 ミクロン及び 10 ミクロンの 2 段のイッテルビウムファイバレーザで増幅した。その後、透過型回折格子対(1250 本/mm)により、パルス圧縮を行い、平均出力 1.87 W、パルスエネルギー 96 nJ、パルス幅 290 fs のパルスが得られた。図 8 に自己相関波形を示す。フーリエ限界パルス幅 68 fs からは大きく離れたが、回折格子対の 3 次分散によるものであると考えられる。

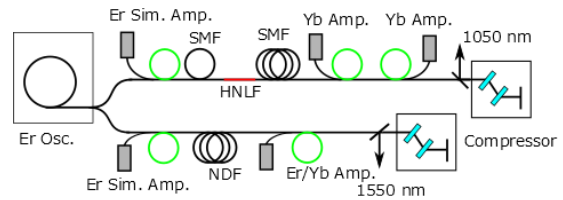


図7 2 波長同期チャープパルス増幅器

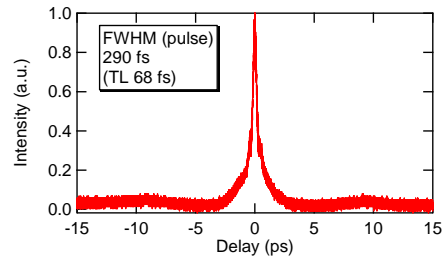


図8 波長 1050 nm 光の自己相関波形

波長 1550 nm の光についても、正常分散ファイバーでパルス幅を延伸した後、コア径 12 ミクロンのエルビウム・イッテルビウム共添加ファイバレーザで増幅を行った。その後、透過型回折格子対(600 本/mm)によりパルス圧縮を行い、平均出力 760 mW、パルスエネルギー 39 nJ、パルス幅 300 fs のパルスが得られた。図 9 に自己相関波形を示す。フーリエ限界パルス幅 180 fs とは大きく異なるが、これも 3 次分散の影響であると思われる。

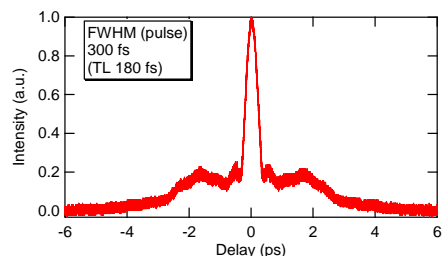


図9 波長 1550 nm 光の自己相関波形

この 2 波長同期チャープパルス増幅システムは最後のパルス圧縮器部分を除いて、発振器から増幅器まですべてファイバー融着で構成されており、堅牢で保守容易なシステムとなっているのが特長である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

Y. Kobayashi, K. Torizuka, A. Marandi, R. L. Beyer, R. A. McCracken, Z. Zhang, D. T. Reid, "Femtosecond optical parametric oscillator frequency combs," Journal of Optics, 査読有, Vol. 17, 2015, pp. 94010, DOI: 10.1088/2040-8978/17/9/094010

D. Yoshitomi, K. Torizuka, "Long-term stable passive synchronization between two-color mode-locked lasers with the aid of temperature stabilization," Optics Express, 査読有, Vol. 22, 2014, pp. 4091-4097, DOI: 10.1364/OE.22.004091

[学会発表](計 18 件)

吉富 大、鳥塚 健二「2波長同期フェムト秒チャープパルスファイバー増幅システム」応用物理学学会, 2016年3月21日, 東京工業大学(東京都目黒区)

D. Yoshitomi, K. Torizuka, "All-fiber 41-fs pulse generation from a self-similar erbium fiber amplifier," Advanced Lasers and Photon Sources, 2015年4月24日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

D. Yoshitomi, K. Torizuka, "Passive synchronization between two-color mode-locked lasers with long-term stability and subfemtosecond timing jitter," Conference on Lasers and Electro-Optics, 2014年6月3日, サンノゼ(アメリカ)

D. Yoshitomi, K. Torizuka, "Long-term stable passive synchronization between two-color mode-locked lasers with temperature stabilization," Advanced Lasers and Photon Sources, 2014年4月23日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

D. Yoshitomi, K. Torizuka, "Temperature stabilization of Yb-doped fiber mode-locked oscillator for long-term stable passive two-color synchronization," Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2013年7月1日, 京都国際会議場(京

都府京都市)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]  
出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]  
ホームページ等  
<https://staff.aist.go.jp/d.yoshitomi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉富 大(YOSHITOMI, Dai)  
産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・主任研究員  
研究者番号: 10392680

(2) 研究分担者

鳥塚 健二(TORIZUKA, Kenji)  
産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・研究グループ長  
研究者番号: 30357587

(3) 連携研究者

曾根 宏靖(SONE, Hiroyasu)  
北見工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00333667