

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686010

研究課題名（和文） 多波長コヒーレント合成による高繰り返し極短光パルス発生の研究

研究課題名（英文） Study on high-repetition-rate ultrashort optical pulse generation by multicolor coherent synthesis

研究代表者

吉富 大（YOSHITOMI DAI）

独立行政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

研究成果の概要（和文）：

発振波長（媒質）の異なる複数の超短パルスレーザーからの光パルスのタイミングと光波位相を高精度に同期制御し、それらを合成することによって、位相の揃った超広帯域光を作り出し、高繰り返しで時間幅の極めて短いパルス光源を実現するための要素技術を開発した。3種類の異なる超短パルスレーザーの同期制御技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed component technologies for realization of high repetition-rate ultrashort-pulse light sources by coherent synthesis of multicolor ultrashort-pulse lasers. We have established the technology of synchronization and optical-phase locking among three-color ultrashort-pulse lasers.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2011年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2012年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	16,400,000	4,920,000	21,320,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：レーザー・超短パルス・超高速光科学

1. 研究開始当初の背景

超短光パルスは、超高速現象を解明するプローブとして重要な役割を果たしている。特に近年、10 フェムト秒 (fs) 以下の極短パルスを用いた超高速分光により、光励起直後の化学反応の初期過程を実時間で観測する試みがなされている。極短光パルスで瞬間的な励起を行うことにより、物質中のコヒーレン

トな振動を誘起することができ、振動モードを光学反射率など巨視的な変化として観測することが可能となる。振動の時間的な変化を極短パルスの非常に高い時間分解能で追跡することにより、光励起によって引き起こされる構造変形（核波束の運動）がどのように進行していくかを詳らかにすることができる。このような光励起直後のダイナミクスを

知ることは、光化学反応がどのように起きるかという光と物質の相互作用の基本的知見を得ることであり、ひいては光による化学反応制御の夢へも道を開くものである。しかしながら、このような反応初期過程のダイナミクスを調べる研究は、光源の性能を直接反映するものであり、研究を加速するためには、さらなる極短パルスの実現が望まれるのは言うまでもない。分子の振動では 20 fs 以下の高速なモードも存在し、そのようなコヒーレント振動を実時間で追跡するためには、それに比して十分に短い時間幅の極短パルスが必要となる。

可視～赤外域で極短パルスを得る試みとしては、チタンサファイアレーザーの増幅光をベースとした非線形効果による広帯域化や広帯域パラメトリック増幅による極短パルス発生が報告されているが、上記のような応用においては、高繰り返し発振器ベースの方が計測速度やシステムの簡便性の上で利便性が高いと言える。発振器では、広帯域チタンサファイア発振器からの極短パルス発生が報告されているが、単一レーザーを用いて、非線形効果によって利得帯域を超える超広帯域発振を得ているため、パワーが低く、スペクトルの設計自由度も低いという難点がある。

一方、複数の異なる帯域のレーザーのタイミングと光波位相を高精度に同期制御して合成することによって、超広帯域光を生成し、極短パルスを得る手法が考えられる。各帯域ごとに設計を最適化できること、レーザー利得帯域による壁を超えられることから、さらなる短パルスの実現が期待できる。

2. 研究の目的

本研究課題では、これまでタイミング・光波位相同期に成功しているチタンサファイア（中心波長 800nm）とクロムフォルステライト（中心波長 1250nm）の 2 波長レーザー光に加えて、これら 2 種類のレーザーの波長帯域の中間に位置するイッテルビウムファイバレーザー（中心波長 1050nm）を追加し、3 種類のモード同期レーザーのタイミング・光波位相を相互に高精度に同期制御することにより、波長 600nm～1400nm に渡るコヒーレントな超広帯域光の発生し、極短パルス発生を実現するための要素技術を確認することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究以前に、チタンサファイア、クロムフォルステライトの 2 種類のレーザー間のタイミング及び光波位相の高精度な同期制御に成功していた。さらに、この中間の波長領域にあるイッテルビウムファイバレーザーを追加し、3 種類のレーザー光のタイミング・光波位相を同期し、波長 600nm～1400nm にわたるコヒーレントな超広帯域光の発生することをめざして、要素技術となる以下の課題に取り組んだ。

(1) チタンサファイアレーザーとイッテルビウムファイバレーザーの高精度タイミング同期

本研究では、低ジッターで高安定な利点を持つ受動的タイミング同期法を用いた。チタンサファイアレーザーの出力光パルスを入射したイッテルビウムファイバレーザーの共振器中に注入し、2 色の光パルス間に生じる相互位相変調を利用して、タイミング同期を行った。注入されたパルス（マスター）が、共振器中を周回するパルス（スレーブ）に対して、先端か後端のいずれのタイミングで重なるかによって、相互位相変調によるスレーブパルスのスペクトルシフト方向が異なり、共振器内分散の効果とあいまって、タイミング誤差が自動的に抑制される方向に負帰還作用が働く。これを利用して、能動的な電子回路制御を必要としない、低ジッターで高安定なタイミング同期を実現する。

(2) 温度安定化制御による受動的タイミング同期の長時間安定化

上記受動的タイミング安定化法は、2 台のレーザーの相互の繰り返し周波数差の許容値が小さいため、長時間安定動作が難しいという欠点を持っていた。その問題を克服するために、マスターレーザー（チタンサファイア）の繰り返し周波数安定化制御を行うとともに、スレーブレーザー（イッテルビウム）の温度安定化制御を行い、長時間安定化を実現した。

(3) チタンサファイアレーザー・クロムフォルステライトレーザーの広帯域化

コヒーレント合成による極短パルス発生をめざすには、各々のレーザーの広帯域化が不可欠である。チタンサファイアレーザーとクロムフォルステライトレーザーにおいて、分散補償鏡の組み合わせ・出力鏡の反射率・腕の長さの比など、共振器構成の最適化を行った。

4. 研究成果

(1) チタンサファイアレーザーとイッテルビウムファイバレーザーの高精度タイミング同期

図1に本研究で開発したイッテルビウムファイバモード同期レーザー発振器の概略を示す。リング型構成を採用し、共振器内分散を回折格子対によって補償して、非線形偏波回転方式によりモード同期パルスを生成する。反射鏡の裏側からチタンサファイアレーザーの光パルスを同軸に注入して、2台のレーザー間の受動的タイミング同期を行った。

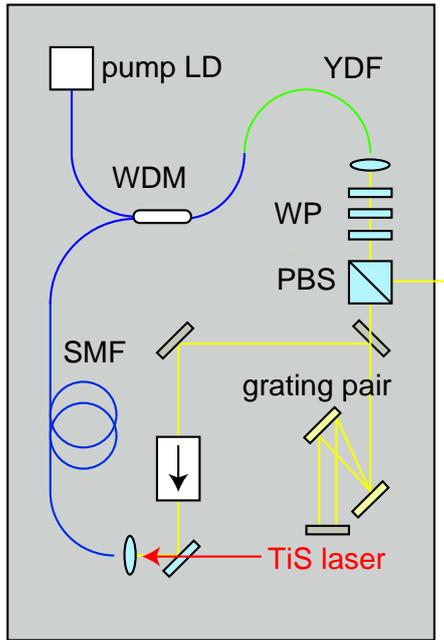


図1 ファイバレーザー発振器

各々のレーザー出力光の和周波の揺らぎから、タイミングジッターを測定・評価した。図2にチタンサファイアレーザーとイッテルビウムファイバレーザーのタイミング同期時のジッターを示す。

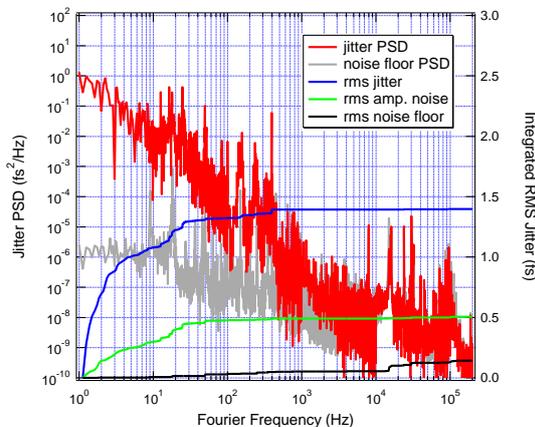


図2 タイミング同期時のジッター

フーリエ周波数 1 Hz から 200 kHz までの RMS 積分値で 1.4 fs という結果が得られ、非常にジッターの低い高精度なタイミング同期が実現できていることが分かる。

(2) 温度安定化制御による受動的タイミング同期の長時間安定化

マスターレーザー（チタンサファイア）については、繰り返し周波数と基準周波数（~100 MHz）の誤差信号を共振器鏡に取りつけたピエゾ素子にフィードバックして、同期制御した。スレーブレーザー（イッテルビウム）については、受動的タイミング同期動作中は、マスターレーザーに追従しているため、共振器長揺らぎを検出することができない。そこで、ベースプレートの温度を安定化制御することにより、元々の共振器長揺らぎを許容値を超えないように抑制することにした。ベースプレートの温度を測温抵抗体 PT100 でモニターし、商用の温度制御器でヒーターにフィードバックした。レーザーシステム全体を金属と断熱材で覆い、外部からの音響・対流による揺らぎと熱の流出入を抑制した。

図3に、温度安定化制御時のベースプレートの温度と繰り返し周波数の変化を示した。制御開始後8時間後から4時間は、ほぼ 29.28 °C の一定温度で安定している。この間の温度揺らぎは、2.4 mK に抑制されている。これにより、繰り返し周波数の揺らぎも 2.0 Hz に抑制することができた。また、制御開始直後からの全体を見ても、揺らぎはほぼ 100 Hz の範囲に収まっている。受動的タイミング同期における繰り返し周波数差の許容値は、典型的に数百 Hz であるから、この範囲に収まっていれば、長時間安定動作が期待できると考えられる。

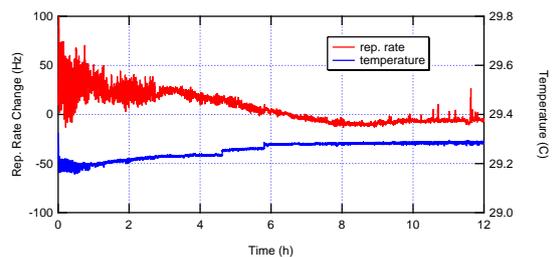


図3 温度と繰り返し周波数の変化

次に、マスターの繰り返し周波数安定化制御とスレーブの温度安定化制御を行った状態で、受動的タイミング同期させた2台のレーザー出力パルスの繰り返し周波数をカウンターで測定し、長時間安定性を評価した。図4に、マスター（チタンサファイア）とスレーブ（イッテルビウム）の繰り返し周波数の結果を示す。マスターは、約 100 MHz

の RF 基準周波数に同期させている。スレーブはそれに追従して、6 時間の間、安定に同期していることが分かる。揺らぎ (RMS) は、両レーザーともに 1 mHz 程度であった。図 5 に両レーザーの繰り返し周波数の差をプロットした結果を示す。2 台の周波数の差も 1 mHz 程度 (RMS) の範囲に収まっていることが分かる。

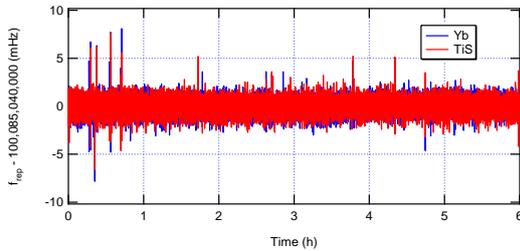


図 4 2 台の繰り返し周波数の変化

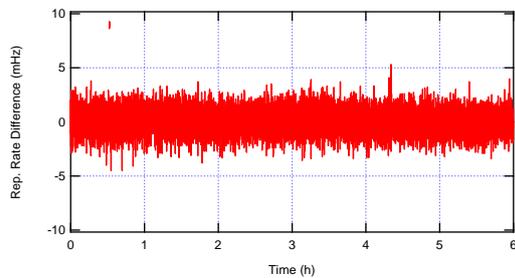


図 5 2 台の繰り返し周波数差の変化

(3) チタンサファイアレーザー・クロムフォーステライトレーザーの広帯域化
チタンサファイアレーザーとクロムフォーステライトレーザーの共振器構成を最適化した結果、得られた広帯域スペクトルを図 6 に示す。イッテルビウムファイバレーザーのスペクトルも同時に示した。チタンサファイアとイッテルビウムの間にはスペクトル裾の重なりを得ることができた。

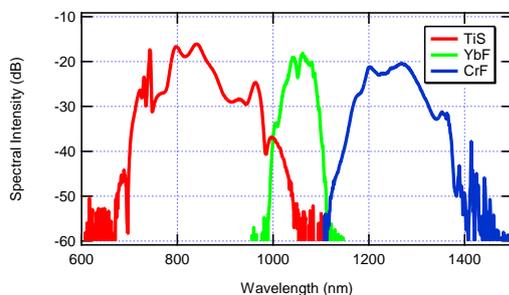


図 6 3 波長レーザーのスペクトル

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 5 件)

- ① H. Sone, D. Yoshitomi, X. Zhou, Y. Harada, S. Nakamura, F. Abrishamian, R. Kasahara, K. Kikuchi, K. Torizuka, “Spectra and phases of supercontinuum pulses generated in tapered fiber and photonic-crystal-fiber with low dispersion,” Review of Laser Engineering, 査読有, Vol. 39, 2011, pp. 862-865.
- ② D. Yoshitomi, X. Zhou, Y. Kobayashi, H. Takada, K. Torizuka, “Long-term stable passive synchronization of 50 μ J femtosecond Yb-doped fiber chirped-pulse amplifier with a mode-locked Ti:sapphire laser,” Optics Express, 査読有, Vol. 18, 2010, pp. 26027-26036.
- ③ X. Zhou, D. Yoshitomi, Y. Kobayashi, K. Torizuka, “1 W Average-Power 100-MHz Repetition-Rate 259-nm Femtosecond Deep Ultraviolet Pulse Generation from Ytterbium Fiber Amplifier,” Optics Letters, 査読有, Vol. 35, 2010, pp. 1713-1715.

[学会発表] (計 26 件)

- ① 吉富 大、鳥塚 健二、「長期安定タイミング同期のための Yb ファイバモード同期発振器の温度安定化」、応用物理学会、2013 年 3 月 28 日、神奈川工科大 (神奈川県)
- ② D. Yoshitomi, X. Zhou, Y. Kobayashi, H. Takada, K. Torizuka, “Submicrojoule femtosecond multicolor pulse generation by a fiber-laser-pumped OPCPA for optical field synthesis,” Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS), 2012 年 4 月 26 日、パシフィコ横浜 (神奈川県)
- ③ 吉富 大、周 翔宇、小林 洋平、高田英行、鳥塚 健二、「高強度任意光電界波形発生のための多色パラメトリックチャープパルス増幅 II」、応用物理学会、2011 年 8 月 30 日、山形大 (山形県)
- ④ D. Yoshitomi, X. Zhou, Y. Kobayashi, H. Takada, K. Torizuka, “Long-Term Stable Passive Synchronization of 50- μ J, 690-fs, 0.4-MHz Yb-Doped Fiber Amplifier with a Mode-Locked Ti:Sapphire Laser,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2011 年 5 月 6 日、ボルチモア (アメリカ)
- ⑤ 吉富 大、周 翔宇、小林 洋平、高田英行、鳥塚 健二、「高強度任意光電界波形発生のための多色パラメトリックチャープパルス増幅」、応用物理学会、2011

- 年3月25日、神奈川工科大（神奈川県）
- ⑥ 吉富 大、周 翔宇、小林 洋平、鳥塚健二、「多色 OPCPA 励起のためにタイミング同期された 0.4MHz, 50 μ J フェムト秒 Yb ファイバレーザースystem」、応用物理学会、2010年9月17日、長崎大（長崎県）
 - ⑦ X. Zhou, D. Yoshitomi, Y. Kobayashi, K. Torizuka, “1-Watt Average-Power 100-MHz Repetition-Rate 258-nm Ultraviolet Pulse Generation from a Femtosecond Ytterbium Fiber Amplifier,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2010年5月21日、サンノゼ（アメリカ）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉富 大 (YOSHITOMI DAI)
独立行政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