

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04918

研究課題名（和文）数サイクル超短パルス光発生のための高パワーレーザーのコヒーレント結合と位相評価

研究課題名（英文）Development of coherent combine technique of high power laser pulses and its diagnostics for generating few cycle laser pulse

研究代表者

岩崎 純史（Iwasaki, Atsushi）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授

研究者番号：30447073

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：フェムト秒レーザーパルスのコヒーレント結合法によって、1  $\mu\text{m}$ 帯域の2ビームを合波した。シード光となる具体的には、繰り返し周波数可変のフェムト秒レーザーチャープパルス増幅システムを構築し、そのパルスや増幅について評価を行った。また、パルス圧縮前のパルスを縦横偏光成分に分離したのちに合波を行いその評価を行った。チャープパルス増幅システムの構築では、波長帯の異なる自作、市販のフェムト秒発振器を試験し、増幅器としてラージコア、テーパ型等のファイバ増幅器を試験した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高いパルスエネルギーを持つフェムト秒レーザーパルスは、レーザー加工や理化学研究において非常に重要なツールとなっている。ファイバーレーザー増幅器は、高いパルスエネルギーを安価に実現可能な要素技術であるが、例えば10  $\mu\text{m}$ コアのファイバーは、数10-400ピコ秒で2-5  $\mu\text{J}$ 程度の破壊閾値を持つ。レーザー加工やアト秒パルス発生では100  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 以上のエネルギーを持つレーザーパルスの発生が必要とされており、ファイバ増幅器を用いてレーザー加工やアト秒パルス発生に必要な100  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 以上、またビーム結合によってさらなる高いエネルギーを可能とする道筋をつけた意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Two femtosecond laser pulses in 1  $\mu\text{m}$  region were combined using a coherent combination method. Specifically, we constructed a laser chirped pulse amplification system with variable repetition frequency to serve as the seed light for the coherent combine, and characterize its pulse and amplification properties. In addition, the pulse before pulse compression was separated into vertical and horizontal polarization components and then combined, and its pulse was evaluated. In constructing the chirp pulse amplification system, we tested homemade and commercially available femtosecond oscillators with different wavelength bands as well as large-core, tapered, and rod-type fibers as amplifiers.

研究分野：レーザー分光学

キーワード：ファイバーレーザー レーザー加工 アト秒パルス発生 チャープパルス増幅 コヒーレント結合

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

レーザー増幅器の進展とともに、増幅媒質から取り出すことのできるレーザーパワーやパルスエネルギーは増大しているが、同時に物理限界が存在することも明らかになってきている。1つの増幅器から取り出せるパワー・パルスエネルギーに限界がある場合に、複数の増幅器出力を合わせて一つのビームとするさまざまな方法が提案されている。一方、ピコ秒・フェムト秒レーザーパルスは、比較的安価に高パワーが実現可能な加工用光源として注目を集めているが、チャープパルス増幅 (Chirp pulse amplification, CPA) した場合でも、パルスエネルギーが高い場合には、ファイバーのダメージ閾値近くでは非線形光学効果などの影響を受けやすい。そこで、ピコ秒・フェムト秒パルスレーザービームを結合する方法は、高繰返し高出力な増幅器を実現するための重要な技術として注目されており、レーザーのパルスを合波する技術として、回折光学素子を用いた空間結合[1,2]、偏光結合[2]、周波数結合[3]などが提案されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、(1)レーザー加工をターゲットとしたファイバーCPAシステムを構築し、その性能の評価を行った。ファイバーCPAシステムの要求性能として、レーザー加工に用いられるのに十分な性能として、繰返し1 MHzで3  $\mu\text{J}$ 以上のパルスエネルギー、繰返し100 kHzで100  $\mu\text{J}$ 以上とした。(2)また、この出力を用いて偏光結合を用いたコヒーレントビーム結合法によって2つの1  $\mu\text{m}$ ピコ秒パルスの合波を実現し、さまざまなレーザーパルスパラメータが2つのレーザーパルスの位相差に対する依存性や外乱などの要因に対する安定性を評価することを目的とした。また、合波したピコ秒パルスから数サイクルの超短パルスを発生する際に必要なビーム結合条件について評価することを目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) チャープパルス増幅システム コヒーレント結合用のレーザーとして、フェムト秒ファイバー発振器をベースとしたCPA増幅器を構築した。市販の中心波長1040 nm、繰返し周波数17.5 MHzと自作の中心波長1030 nm、繰返し周波数47.5 MHzの二つの発振器をそれぞれ200 m長さの石英ファイバ、Fiber Bragg Grating(FBG)型 pulse stretcher(Teraxion PSR-1030-20-D55.72-0.967)を用いてパルス伸長した。自作の発振器は、非線形偏波回転(Non-linear polarization rotation)によってモード同期する。パルス伸長部には、それぞれ1040、1030 nm用PM-circulatorと増幅部を備えており、市販の発振器はスペクトル帯域が2 nmと狭いため、増幅器に石英ファイバーを更に加えて自己位相変調効果によってスペクトル帯域を半値全幅12 nm以上に広げたのちに、200 m長さの石英ファイバに導入した。その後、以下の図1に示した模式図の様に増幅を行った。200 m長さの石英ファイバー後のパルス幅は、自己相関計によって測定したところ~50 psだった。FBG型伸長器後のパルス幅は、使用した自己相関計の測定範囲外(100 ps以上)だった。

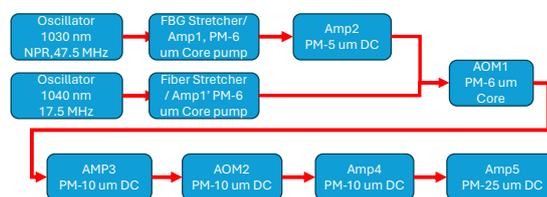


図1 構築したファイバーCPAシステムの模式図

パルス伸長器の後には、前置増幅器(AMP2)、パルス切り出し用音響光学素子(Acousto-optic modulator, AOM-1)、増幅器3、同じくパルス切り出し用AOM-2、増幅器4、主増幅器の構成とした。主増幅器の出力を圧縮するために、それぞれのパルス伸長器に対応した透過型回折格子(Gitterwerk 1739 grooves/mm)を用いたパルス圧縮器を構成した。次に述べるコヒーレント結合光学系では、自作の発振器を用いたファイバーCPAシステムの出力を用いた。

(2) コヒーレント結合光学系 図2に作成したコヒーレント結合光学系のパルス分離部分を示す。入射したシード光は、半波長板(HWP-1)によって偏光状態を回転させて、偏光ビームスプリッター(PBS-1)で縦横偏光成分に分離し、縦偏光成分を光学遅延(ARM-1)に導入した。四分の一波長板(QWP-1)と0度入射1030 nm用反射ミラーに導入し、再度QWP-1を通して偏光状態を横に変化させてPBS-1を透過させた。PBS-1の透過(横偏光)成分は、2つ目の偏光ビームスプリッターPBS-2を透過し、同様の光学遅延(ARM-2)を経たのちに、偏光状態を縦偏光に変化させてPBS-2で反射させた。ARM-1,2を通った2つのビームは、薄膜偏光子(Thin film polarizer, TFP1)を通り、半波長板(HWP-2)によって偏光状態を45度回転して、偏光ビームスプリッターPBS-3に導入した。合波後のビームは、2台のカメラおよびフォトダイオードでビームの時空間重なりを確認した。また、フィードバック制御は、衣笠らの文献[4]を参考に構成した。

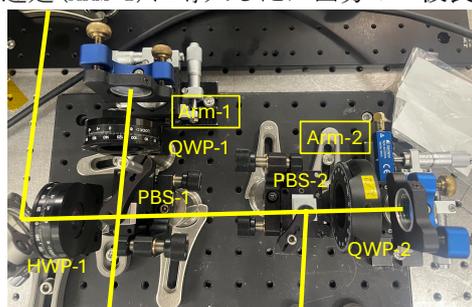


図2 コヒーレント結合用光学系のビーム分離部分。

#### 4. 研究成果

(1) 構築した CPA システムとして、Large area mode (LMA) ファイバーを主増幅器とした場合の増幅器を図 3(a)に、この増幅器の入力レーザーダイオード電流値に対する 100 kHz, 700 kHz の出力を図 3(b)に示す。また、Taper fiber(Coractive YB-MCOF-35/250-56/400-07-2. 2-T0. 7-PM)を主増幅器とした場合の励起パワーに対する出力パワーを図 3(c)示す。このとき、自作の発振器の出力を増幅した。図 3(b)に示した LMA ファイバー増幅器では、700, 100 kHz の場合にそれぞれ 10, 40  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 以上の出力が得られた。100 kHz 繰返しで 1 時間運転したときのパワー RMS 安定性は、0.43%であった。一方、Taper fiber 増幅器の場合には、1 MHz, 100 kHz でそれぞれ 20, 136  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 以上の出力を得た。回折格子の劣化にともない、パルス圧縮器の透過率が 70%程度と低いが、1 MHz, 100 kHz 繰返しにおいて 14, 95 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ が得られ、100 kHz 繰返しにおいて目標値に近い値が得られた。

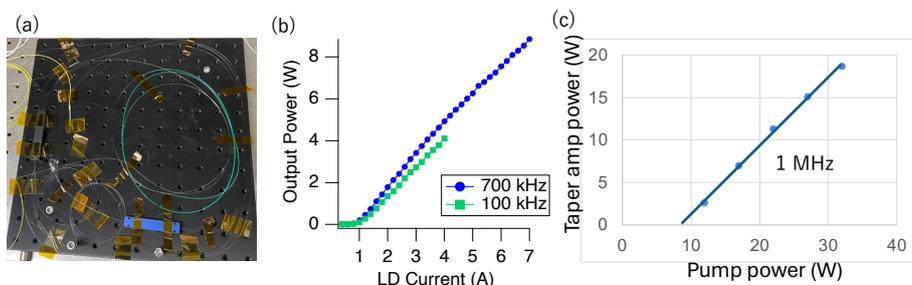


図 3 (a)LMA ファイバー増幅器, (b) LMA ファイバー増幅器の 700 kHz, 100 kHz 繰返しでの LD 電流値に対する出力, (c) Taper fiber 増幅器の励起レーザーパワーに対する出力。

一方、主増幅器前において 1 MHz, 100 kHz 繰返しでのパルス幅とパルスと連続的に発生する ASE との強度比較を行った。自作の発振器(OSC1)と FBG パルス伸長器、市販の発振器(OSC2)と石英ファイバーパルス伸長器を用いた場合の 1 MHz, 100 kHz 繰返しでのパルス幅測定の結果を示す図 4(a~d)に示す。パルスエネルギーに対して自己相関波形を比較した場合に、サイドパルスの増大とパルス圧縮に必要な回折格子間距離の増加がみられ、自己位相変調効果に起因すると考えられる。そこで、10  $\mu\text{m}$ コアの Double clad fiber を用いた増幅器 4 では、1  $\mu\text{J}$ 程度に抑えることとした。また、ASE との強度比を、空間型 AOM を用いて測定したところ、自作発振器の場合には 1000:3 以上のパワー比があったのに対して、市販のものは 3:1 程度の比率となった。増幅器出力のスペクトルには強い自己位相変調効果が表れており 1040 nm の領域のスペクトルが減少していた。これは、パルス幅が比較的短いこと、増幅効率が低い 1030 nm 付近に ASE が出やすいことが原因で 1040 nm 以外の領域に ASE が強くあらわれたためと考えられる。

(2) CPA システムの出力を用いて、繰返し 1 MHz のシードパルスの二つのビームを結合した。ARM-1,2 のそれぞれのパワーが 29.0 nJ, 28.3 nJ のとき、遅延時間を近づけて 2 つのパルスビームが空間干渉する条件において位相をうまく選ぶことによってコヒーレント結合を実現した。合波した後のパワーは 44.9 nJ となり結合効率は 78%だった。結合後のビームプロファイルを図 4 に示す。出力を上げて 3.2  $\mu\text{J}$ まで結合を行ったが、パワーに対する結合効率はほぼ変化しなかった。文献では、結合効率は 90%以上が達成されており[3]、今回結合効率が低かった要因としてビームの重なりや偏光度の改善によって更なる結合効率を目指す。

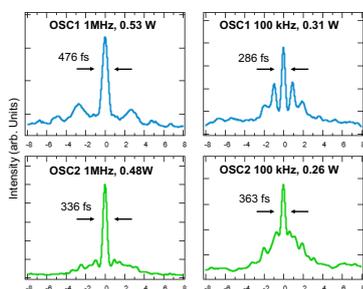


図 5 2つの発振器を用いて繰返し 1 MHz, 100 kHz のときの増幅器出力パルス幅

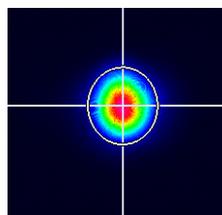


図 4 コヒーレント結合後のビーム形状。

#### 参考文献

- [1] M.A. Vorontsov *et al.*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 15, 269-280 (2009).
- [2] 原口英介, 鈴木二郎, 安藤俊行 レーザー研究 44 巻 6 号 369-373 (2016).
- [3] R. Uberna, A. Bratcher, B.G. Tiemann, IEEE J. Quantum. Electron. 46, 1191-1196(2010).
- [4] 衣笠卓一ら, レーザー研究 43 巻 3 号 169-173 (2015).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Atsushi Iwasaki
2. 発表標題 高次高調波によるものづくり
3. 学会等名 第33回光ものづくりセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Atsushi Iwasaki
2. 発表標題 Development of lasers for the next 5 years
3. 学会等名 International Symposium on Recent Development in Atomic, Molecular, and Optical Science 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 岩崎純史
2. 発表標題 アト秒時間分解能での時間分解計測法
3. 学会等名 第38回放射線検出器とその応用研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年～2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	加島 黎  (Kashima Rei)	東京大学・大学院理学系研究科・大学院修士学生  (12601)	

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
---------	---------