

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560046

研究課題名(和文)超小型・完全モノリシック型光パラメトリックチャープパルス増幅器の開発

研究課題名(英文)Development of a compact and monolithic, optical parametric chirped-pulse amplifier

研究代表者

山川 考一 (YAMAKAWA, Koichi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号：40360408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：低炭素社会の実現に向けた次世代高機能加工技術を確立するため、堅牢で安価、高安定、小型、メンテナンスフリーな高出力フェムト秒レーザーの開発を行った。新たに開発したガラスブロック内部を多重反射する一体型のパルス伸張器/圧縮器および光パラメトリックチャープパルス増幅器を用いてパルス伸張-増幅-圧縮実験を行った結果、小型のガラスブロックのみで最適にパルス伸張および圧縮を行うことに成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to establish next generation advanced laser-machining technologies toward low carbon communities, robust, compact and highly stable femtosecond high power laser was developed. We have proposed and demonstrated an optical-parametric chirped-pulse amplification scheme in which an even order dispersion of an idler pulse is compensated by passing through an identical positive dispersive material used for temporal stretching a signal pulse. By compressing the idler pulses having a negatively chirp in this manner, high power sub-100 fs pulses were successfully obtained with only a transparent glass block used for the stretcher and compressor.

研究分野：レーザー工学

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：応用光学 光パラメトリックチャープパルス増幅 高機能レーザー

1. 研究開始当初の背景

低炭素化社会を実現するために高機能ものづくりの技術開発が急がれており、その中でもフェムト秒レーザー加工は他の方法では不可能な付加価値の高いレーザー加工が可能として注目されており、その研究開発が世界各国で精力的に進められている。しかしながらフェムト秒レーザー加工の実用化に向けての最大の問題点は、その光源自身にある。つまり、理科学用として開発されたものにわずかな改良を施した外国製の市販レーザーが大部分であり、実用レベルにはほど遠い製品を研究レベルに使用しているのが現状である。また、こうしたフェムト秒レーザーの発生には、増幅段でのパルス強度増大による増幅媒質のダメージを避けるため発振器からのフェムト秒光パルスを回折格子対やプリズム対などの回折光学素子を用いたパルス伸張器で伸張させたのちに増幅し、再び回折光学素子を用いたパルス圧縮器によって再圧縮されるチャープパルス増幅 (CPA) 技術が採用されている。これらのパルス伸張・圧縮に用いる光学素子は繊細であり、また高精度の調整が必要なため取り扱いが困難であると共に機械的強度が低い。一方、近年開発の進展が著しいファイバーレーザーは小型で軽量、冷却用のチラーが不要、さらに高安定・高信頼、高ビーム品質、低消費電力であるなど、数々の優れた特徴を有している。しかしながら、高出力フェムト秒パルスの発生には CPA 技術の適用が不可欠であり、上述した欠点が伴うためファイバーレーザーの優れた特性を生かし切れていない。また、得られる最短パルス幅も 800 fs 程度が限界であり、レーザー加工の実用化を目指した高出力フェムト秒レーザーは現在のところ存在しない。

2. 研究の目的

低炭素社会の実現に向けた次世代高機能加工技術確立のため、堅牢で安価、高安定、小型、メンテナンスフリーな高出力フェムト秒レーザーの開発を行い、我が国のものづくり技術の底上げ、国際競争力の強化へ貢献する。本提案は、本格的なレーザー加工分野への導入の妨げとなっている光源そのものの抜本的な解決策を提供するものであり、より具体的には、パルス伸張・増幅および圧縮に完全モノリシック型の堅牢で扱いやすいフェムト秒光パラメトリックチャープパルス増幅器 (OPCPA) を開発し、すでに数々の優位性が確認されているフェムト秒レーザー加工の実用化技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究は図 1 に示すモノリシック型光パラメトリック増幅器を製作し、既に関済済の

半導体直接励起 Yb:YLF レーザーシステムを励起光源に用いて研究を推進する。信号光には、モード同期チタンサファイアレーザー発振器を用い、図 1 に示すガラスブロック内を全反射することにより、パルス伸張し、OPCPA 用の信号光としてパラメトリック増幅器に入射する。

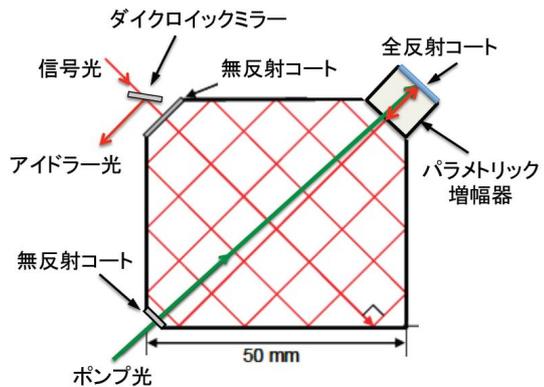


図 1. 完全モノリシック型光パラメトリックチャープパルス増幅器の概念。

発振器に同期した低温冷却型 Yb:YLF-CPA レーザーの 2 倍波をポンプ光としてパラメトリック増幅器には信号光とはわずかな交差角を設けて入射し、縮退条件で光パラメトリック増幅を行う。増幅信号光と共に発生したアイドラー光は、全反射膜により結晶およびガラスブロック内を再度通過することによりパルス圧縮される。圧縮されたアイドラー光は信号光とわずかに波長が異なることを利用して、ダイクロイックミラーによって信号光と分離する。光パラメトリック増幅は位相共役過程であるため、発生するアイドラー光の偶数次の分散はシグナル光に対して反転する。このため正チャープのシグナル光に対しては OPCPA により負チャープのアイドラー光が発生することに着目し、シグナル光を正チャープさせた同じガラスブロックでアイドラー光をパルス圧縮することが可能となる。

4. 研究成果

前述の図 1 に示したパルス伸張・圧縮素子として縦 50 mm、横 44 mm、高さ 10 mm の S-TIH11 ガラスブロック (屈折率 1.76) を作成した。(図 2 参照) 本ガラスブロックでは入射光の 13 回の内部反射により 491 mm の内部光路長を実現可能である。モードロック発振器から出力された中心波長 1020 nm、パルス幅 50 fs (FWHM: 半値全幅) の極短パルスレーザー光をビームスプリッターで二つに分け、一つをポンプ光源である低温冷却 Yb:YLF レーザーの種光として、もう一方を光パラメトリックチャープパルス増幅 (OPCPA) のシグナル光

として用いている。Yb:YLF レーザーからのパルス幅 5.2 ps の出力光は第二高調波(510 nm)に波長変換された後に直径 0.9 mm 程度にコリメートされ、0.7 mJ エネルギーのポンプ光がパラメトリック増幅器である BBO 結晶(タイプ-I、厚さ 7 mm)に入射する。

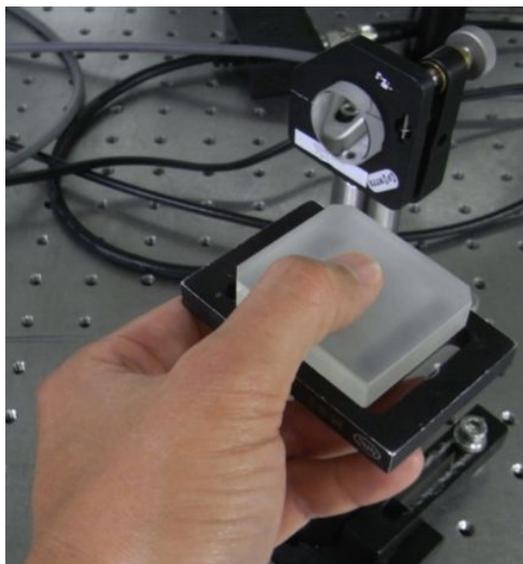


図 2 . 完全モノリシック型パルス伸張・圧縮用ガラスブロック。

OPCPA のシグナル光は前述のガラスブロックに入射し、媒質伝搬による正の群速度分散により正にチャープすると共にパルス伸張される。媒質の実透過距離から推定されるガラスブロック出射後のパルス幅は 2.3 ps である。パルス伸張後のシグナル光は前述の BBO 結晶に入射してポンプ光と重ね合わされ、増幅される。増幅時のシグナル光及びアイドラー光のスペクトルは図 3 に示す通りである。

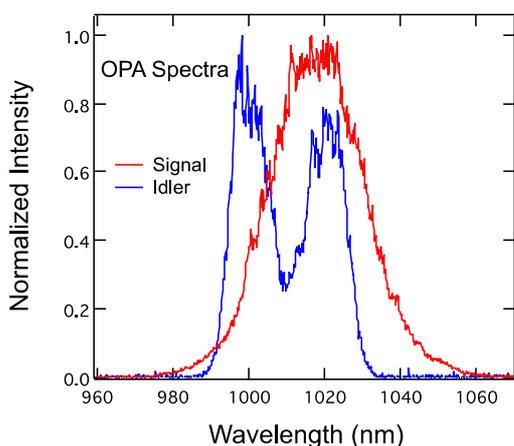


図 3 . 光パラメトリック増幅スペクトル。シグナル光(赤線)、アイドラー光(青線)。

このとき得られた増幅利得は 3×10^4 であり、出力エネルギーとして 60 μJ が得られた。OPCPA 時に発生した負チャープのアイドラー光はスキャン自己相関計測から ~ 2 ps のパルス幅を有していることがわかった。アイドラー光は球面ミラーによりコリメートされた後図 1 のガラスブロックに再入射され、正の群速度分散によりパルス圧縮される。パルス圧縮後のアイドラー光の単一ショット自己相関計測の結果を図 4 に示す。

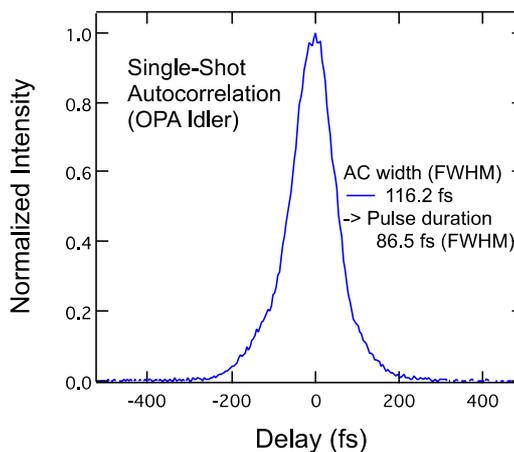


図 4 . ガラスブロックによってパルス圧縮されたアイドラー光の自己相関波形。パルス幅は 86.5 fs.

自己相関幅は 116 fs (FWHM) であり、パルス幅 86.5 fs に相当する。なおこのパルス幅はフーリエ変換限界パルス幅 75.4 fs に比べて多少長いですが、これは図 2 に見られる OPCPA 時のシグナル光とアイドラー光との中心波長のシフトによるものと考えられる。今回、ガラスブロックの入出射面には無反射コートが施さなかったため、レーザー光のガラスブロック透過率は 82.4% であった。今後、ガラスブロック入出射面に無反射コートを施すことにより、パルス伸張及び圧縮時の光損失を皆無にすることができる。また、図 5 にはアイドラー光のビーム形状を示し、強度変調のない、理想的なガウス型のレーザービームが得られている。

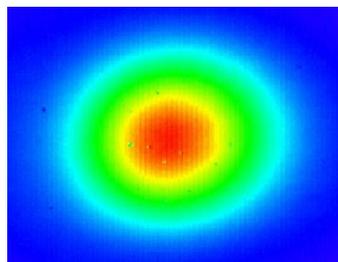


図 5 . アイドラー光の 2 次元ビームプロフィール。

以上、完全モノリシック型の堅牢で扱いやすいガラスブロックをパルス伸長および圧縮に用いることにより、サブ 100 fs パルスのアイドラー光を得ることに成功した。この手法を用いることで、レーザー加工現場の様な厳しい環境でも使用に耐えうるシンプルで堅牢、高効率な実用的フェムト秒レーザーが利用可能となり、我が国のものづくり技術の底上げ、国際競争力の強化が期待できる。

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1件)

K. Yamakawa, Y. Akahane, K. Ogawa, Ultrafast, Optical-Parametric Chirped-Pulse Amplification System using a Block of Transparent Material for Pulse Stretching and Compression, Journal of Laser Micro/Nano Engineering, 査読有, vol. 7, 2012, pp. 316-319

[学会発表](計5件)

山川考一、先端固体レーザー開発と X 線自由電子レーザーへの応用(招待講演)、レーザー学会学術講演会第31回年次大会、2013年3月14日、日本原子力研究開発機構関西光科学研究所、京都府木津川市

K. Yamakawa, Cryogenically-cooled ytterbium-doped solid-state laser technologies (招待講演), The 7th Asian Symposium on Intense Laser Science, 2012.11. 8, Tokyo, Japan

K. Yamakawa, Cryogenically-cooled ytterbium-doped solid-state laser technologies for OPCPA pumping (招待講演), 5th Asian Workshop on Generation and Application of Coherent XUV and X-ray Radiation, 2012. 6.29, Chiba, Japan

山川考一、低温冷却型 Yb 添加固体レーザー(招待講演)、レーザー学会学術講演会第31回年次大会、2012年1月31日、TKP 仙台カンファレンスセンター、宮城県仙台

K. Yamakawa, 100-mJ diode-pumped, cryogenically-cooled Yb:YLF chirped-pulse regenerative amplifier, IEEE Photonics 2011 Conference, 2011.10.11, Arlington, Virginia, USA

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 固体レーザー装置
発明者: 山川考一、赤羽温
権利者: 独立行政法人日本原子力研究開発機

構

種類: 特許

番号: 特願 2013-269085

出願年月日: 2013年12月26日

国内外の別: 国内

取得状況(計1件)

名称: Solid-state laser apparatus

発明者: 赤羽温、杉山僚、山川考一

権利者: 独立行政法人日本原子力研究開発機

構

種類: 特許

番号: US Patent No.7995629

取得年月日: 2011年 8月 9日

国内外の別: 国外

[その他]

ホームページ等

<http://www.apr.kansai.jaea.go.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山川 考一 (YAMAKAWA, Koichi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
原子力科学研究部門 量子ビーム応用研
究センター・研究主幹

研究者番号: 40360408

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

赤羽 温 (AKAHANE, Yutaka)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
原子力科学研究部門 量子ビーム応用研
究センター・研究副主幹

研究者番号: 00370338