

## 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 24 年 6 月 5 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760048

研究課題名（和文）アイドラー光チャープパルス圧縮による高強度数サイクル光パルスの発生

研究課題名（英文） Generation of intense few-cycle laser pulse with idler pulse compression scheme

研究代表者

赤羽 温（AKAHANE YUTAKA）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹

研究者番号：00370338

研究成果の概要（和文）：光パラメトリックチャープパルス増幅で発生するアイドラー光の高次分散をポンプ光の位相変調を用いて制御することに成功した。同手法でパルス圧縮後のアイドラー光の残留高次分散を補償することで、パルス伸張・圧縮にガラスブロックのみを用いるシンプルでコンパクト、高効率な数サイクル高強度レーザーシステムが構築可能となり、アト秒科学等の実験室レベルでの高強度場科学の普及発展に多大な貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）： We have successfully controlled high order spectral dispersions of idler pulses generated in optical-parametric chirped pulse amplification with phase modulation of the pump pulse. Using this method, residual high order dispersions of compressed idler pulses can be compensated, which enables us to construct a simple compact, and efficient intense few-cycle laser system with only glass blocks for pulse stretcher and compressor. This laser system will be a respectable support to promote high-field science in user laboratory, such as attosecond science.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

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、チャープパルス増幅

## 1. 研究開始当初の背景

数サイクル高強度レーザーの増幅手法としては光パラメトリックチャープパルス増幅(OPCPA)が主に用いられており、研究代表者等はこれまでに低温冷却イッテルビウムレーザーをポンプ光源とした超広帯域 OPCPA

レーザー開発に取り組み、8.1fs パルス幅に相当する 350nm 超の広帯域増幅に成功している[1, 2]。しかしながら、レーザーが高性能化するにつれて、短パルス化のための分散補償に必要な多くの分散補償装置の使用によるシステムの複雑化と大型化を招き、これら

のレーザーシステムに熟知した研究者でなければシステムの構築、運転がままならず、利用の障害となっていた。

この問題を解決するアイデアとして、研究代表者等は最近図1に示す様な、正チャープシグナル光に対して発生する負チャープアイドラー光を正分散媒質でパルス圧縮するシンプルな手法を提案した。実証実験の結果、サブ100fsの高強度レーザー光が得られ、パルス伸張・圧縮にガラスブロックだけを用いる非常に簡素な構成のフェムト秒CPAレーザー装置が構築可能となった[3]。

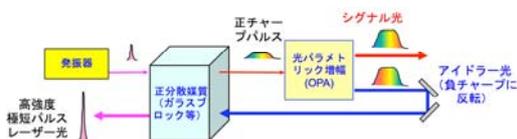


図1 アイドラー光パルス圧縮法の原理

本研究課題は上記先行研究のアイデアを発展させ、圧縮アイドラー光の3次以上の高次分散補償を行うことで、簡素な装置配置のまま数サイクル高強度パルスを得ることを目的としている。OPA時に発生するアイドラー光の位相 $\phi_i$ はポンプ光初期位相 $\phi_p(0)$ 、シグナル光初期位相 $\phi_s(0)$ 及び位相不整合量 $\Delta kL$ を用いて以下のように記述される[4]。

$$\phi_i = \phi_p(0) - \phi_s(0) - \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta kL}{2} \quad (\text{式1})$$

先行研究の様なポンプ光位相が一定(=チャープ等が無い状態)で位相不整合を無視できる条件下では、偶数次分散の符号がシグナル光に対して逆転しチャープが反転するが、奇数次分散は保存されるため、圧縮アイドラー光の数サイクルパルス化の障害となっていた。しかしポンプ光にチャープ等位相変調が有る場合、発生アイドラー光パルスの位相はポンプ光の位相変調の影響を受ける。本研究課題ではこのことに着目し、ポンプ光の位相を操作することによりレーザーシステム中に複雑

に光学装置を配置することなく3次以上の高次分散補償を行い、数サイクル高強度レーザー光発生を行うことができる。

[1] K. Yamakawa, M. Aoyama, Y. Akahane, et al., “Ultra-broadband optical parametric chirped-pulse amplification using an Yb:LiYF<sub>4</sub> chirped-pulse amplification pump laser”, *Opt. Express*, **15**, 5018 (2007)

[2] K. Ogawa, M. Aoyama, Y. Akahane, et al., “Bandwidth enhancement of optical-parametric chirped pulse amplification by temporally-delayed two pump beams”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 4592 (2008)

[3] Y. Akahane, et al., “Idler pulse compression using an identical positive stretcher/compressor combination in optical-parametric chirped-pulse amplification” *Appl. Phys. Express* **2**, 072503 (2009)

[4] I. N. Ross, et al., “Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification”, *J. Opt. Soc. Am.* **19**, 2945 (2002)

## 2. 研究の目的

パルス伸張・圧縮にガラスブロックのみを用いたシンプルで扱いやすい超広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅において、ポンプ光位相操作により負チャープのアイドラー光の高次分散補償を行い、数サイクル高強度レーザーパルスを発生させる。本研究の成果を用いた数サイクル高強度レーザーシステムが広く普及することでアト秒科学研究の裾野が広がり、先端的研究分野である原子・分子内電子の超高速ダイナミクス研究の伸展に大きく貢献することが期待される。

## 3. 研究の方法

本研究は図2に示す様な実験配置で行う。中心波長1020nmのモードロック発振器で発生した80fsパルスをフォトニック結晶ファイバーで広帯域化し、長さ10cmのSF11ガラスブロックによりピコ秒程度までパルス伸張し、OPAシグナル光としてBBO結晶(3mm厚、タイプI)に入射させる。発振器に同期した低温冷却Yb:YLF-CPAレーザー[5]の2倍

波をポンプ光としてBBO結晶に入射させ、縮退条件でOPAを行い最大サブmJレベルまで増幅を行う。発生したアイドラー光はビーム径拡大後、別のSF11のガラスブロックを透過しパルス圧縮される。Yb:YLF-CPAレーザーには回折格子対パルス圧縮器があり、間隔変更によりポンプ光の正負チャープの変更等の大きな位相変化付与が、また入射角変更により2次-3次間の分散比が変更可能である。さらに本研究ではポンプレーザー内の増幅前パスにプリズム対を配置し、パルス伸張用光ファイバー及びパルス圧縮回折格子対と組み合わせることで、ポンプ光の2次、3次及び4次の分散量を独立に増減させることができる。

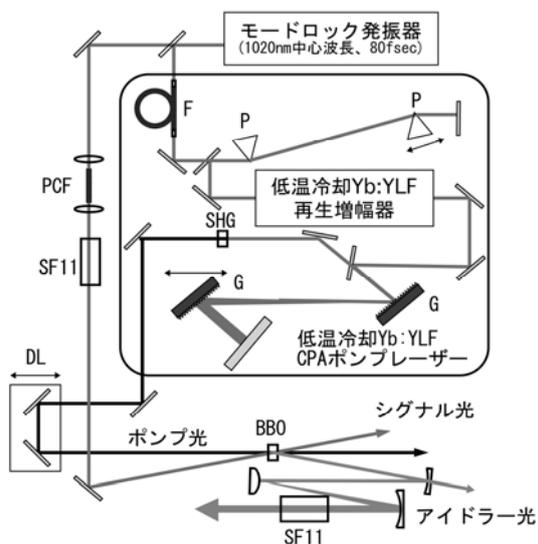


図2 実験配置図 PCF：フォトニック結晶ファイバー、SF11：SF11 ガラスブロック、BBO：OPA用BBO結晶、F：ポンプ光パルス伸張用光ファイバー、P：プリズム、G：ポンプ光パルス圧縮回折格子、SHG：2倍波発生結晶、DL：遅延時間調整ライン

### (1) OPA光用位相計測装置の設置

本研究ではポンプ光位相のアイドラー光に与える影響を直接調べるためピコ秒パルス幅のチャープしたOPAシグナル光やアイドラー光及びポンプ光の位相を直接計測する必要がある。このため、両測定光の位相を観測可能なSIMPLE位相計測装置[6]を構築す

る。SIMPLEではエタロンで作った2波長ロングパルスと被計測光との周波数シェアリング干渉を位相計測に用いるため、フェムト秒領域だけでなくピコ秒チャープパルスの位相も正確に直接計測することができる。構築した位相計測装置は図2のモードロック発振器出力及び増幅前のチャープしたOPAシグナル光を用いて、各計測時の最適エタロン間隔等の装置セッティング調査及び観測データ処理ルーチン整備を行い、OPA位相計測を効率的に行える様準備をすすめる。

### (2) OPA光の位相計測

ガラスブロックで正チャープしたシグナル光を $10^3$ 程度の利得で一段OPAし、増幅シグナル光、発生アイドラー光及びポンプ光の位相をSIMPLEで計測する。計測した位相から求めたシグナル光とアイドラー光の各次数の分散を比較し、発生したアイドラー光の分散に対するポンプ光位相変調の影響を評価する。

[5] J. Kawanaka, et. al. "30-mJ, diode-pumped, chirped-pulse Yb:YLF regenerative amplifier", Opt. Lett. **28**, 2121 (2003)

[6] H. Tomita et. al., "Wide-time-range spectral-shearing interferometry", Opt. Express **17**, 14023 (2009)

### (3) ポンプ光位相制御による分散補償実験

(2)で得られたポンプ光位相とアイドラー光位相の関係を元に、発生アイドラー光の2次及び3次分散の関係がパルス圧縮ガラスブロック材料による分散と真逆(2次と3次の分散比が同じで符号が逆)になるOPAポンプ光位相が計算で求まる。求めた位相変調をポンプ光に印加してOPAで発生するアイドラー光の位相を観測する。実測した位相がほぼ計算通りになっていることを確認した上で、計算で得られた2次及び3次分散の補償に最適な長さで製作したガラスブロックを用いてアイドラー光のパルス圧縮を行う。パルス圧

縮後のアイドラー光の位相をリアルタイム観測しながらを微調整することによりフーリエ変換限界 11fs パルス幅の極短パルスレーザー光を発生させる。パルス圧縮後のアイドラー光のパルス幅、位相計測から 4 次以降の残留分散を観測し、残留高次分散の圧縮パルス時間波形に与える影響を調査する。

#### (4) 数サイクル超広帯域光の分散補償実験

折り返し 2 段 OPA で発生する 0.1mJ エネルギーの 350nm 帯域超広帯域アイドラー光の高次分散を補償し、フーリエ変換限界パルス幅の 8fs 程度までパルス圧縮を行う。パルス圧縮後のアイドラー光の位相をリアルタイム計測し、2 次及び 3 次分散が保存される様に変更しながら 4 次分散を変えていき、圧縮後のアイドラー光パルスが最短になる様調整する。

#### 4. 研究成果

まず最初に光パラメトリック増幅 (OPA) で発生するアイドラー光位相へのポンプ光の位相の影響を調査するため、SIMPLE位相計測装置を構築した。SIMPLE位相計測装置はOPA増幅段でのチャープしたピコ秒パルス幅のシグナル光、アイドラー光の位相をパルス圧縮せずに直接計測し、各次数の波長分散を評価することができる。また今回帯域が2nm以下と狭帯域のOPAポンプ光の位相のSIMPLE計測を可能とするために波長分解能0.04nmの高分解能分

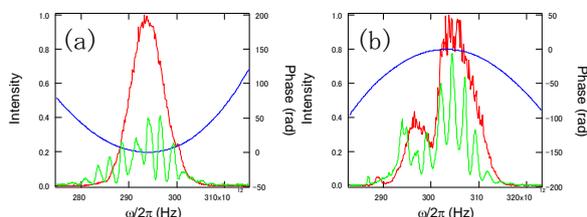


図3 SIMPLE位相計測結果 (a)シグナル光 (b)アイドラー光. 赤線: スペクトル、緑線: 干渉波形、青線: 周波數位相

光器を自作し、ポンプ光位相を計測した。位相計測装置の構築後、OPA相互作用光の位相計測を行った。(図3)

位相計測の結果、2 次分散に関してはシグナル光の  $1.18 \times 10^4 \text{fs}^2$  に対してアイドラー光で  $-1.19 \times 10^4 \text{fs}^2$  と「偶数次分散が符合反転」の理論通りの結果が観測されたものの、3 次分散では  $2.96 \times 10^4 \text{fs}^3$  に対して  $-1.71 \times 10^4 \text{fs}^3$ 、4 次分散では  $5.10 \times 10^5 \text{fs}^4$  に対して  $2.88 \times 10^5 \text{fs}^4$  と理論と異なる結果が得られた。この時のポンプ光位相を計測すると、ポンプ光の 3 次及び 4 次分散に、それぞれ負及び正の大きな残留分散が観測された。これら観測結果から、発生アイドラー光の高次分散はポンプ光の大きな残留高次分散の影響で変化していることが明らかになった。このことはポンプ光の適切な位相変調により発生アイドラー光の高次分散補償が可能であることを実験的に示唆している。(表 1)

表 1 OPA 相互作用光の位相計測結果

	シグナル光	ポンプ光	アイドラー光
2 次分散 ( $\text{fs}^2$ )	$+1.18 \times 10^4$	$-1.3 \times 10^6$	$-1.19 \times 10^4$
3 次分散 ( $\text{fs}^3$ )	$+2.96 \times 10^4$	$-1.5 \times 10^9$	$-1.71 \times 10^4$
4 次分散 ( $\text{fs}^4$ )	$+5.10 \times 10^5$	$+6.2 \times 10^{11}$	$+2.88 \times 10^5$

計測した OPA 相互作用光の位相計測結果を元に、広帯域アイドラー光の数サイクルパルスまでのパルス圧縮に必要な残留高次分散補償の検討を行った。位相計測結果からはアイドラー光残留 3 次分散の補償に必要なポンプ光 3 次分散は  $10^9 \text{fs}^3$  程度と見積もられたが、この分散値は非常に大きく、パルス圧縮器回折格子間隔調整 (パルス圧縮器全長で  $6.75 \times 10^8 \text{fs}^3$ ) やブリズム対調整 (1m 間隔で  $-10^3 \text{fs}^3$  程度) では補償困難であった。このため本研究ではポンプ光の光路に空間光変調器を導入し、変調器での位相操作により分散補償を行うことにした。空間光変調器は溝本数 1800 本/mm の回折格子対及び焦点距離 200mm の凹面ミラー対から構成され、0.04nm/

ピクセルの波長変調分解能を有し、2次分散で  $10^7 \text{fs}^2$ 、3次分散で  $10^9 \text{fs}^3$  レベルの変調印加が可能である。導入した空間光変調器に  $10^8 \sim 5 \times 10^9 \text{fs}^3$  の正負3次分散が印加される様ポンプ光の位相を変調してOPAで発生するアイドラー光の位相の計測を行い、アイドラー光3次分散の変化を計測した。その結果、図4に示す様にポンプ光に正の3次分散を与えたときアイドラー光の3次分散が増加し、負の3次分散を与えたときアイドラー光の3次分散が減少する傾向を確認した。このことはポンプ光の任意位相変調で発生アイドラー光の3次分散制御が可能であることを明確に示した結果である。今後ポンプ光のリアルタイム位相計測とパルス圧縮実験をリンクさせることにより超広帯域OPCPAにおいてアイドラー光の高次分散補償による高強度数サイクルレーザー光の発生が可能である。

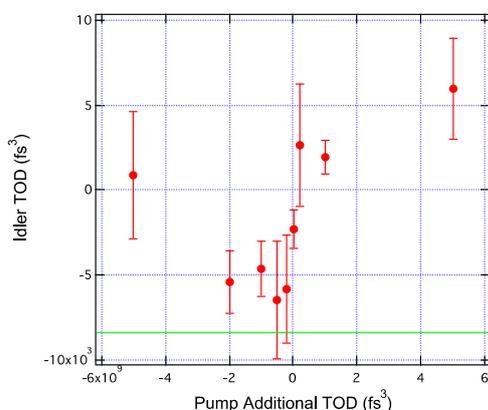


図4 ポンプ光位相変調によるアイドラー光3次分散変化 3次分散をパルス圧縮用ガラスブロックの値(緑線)に制御することで圧縮アイドラー光の3次分散が補償される。なお左端の点のみ大きく傾向を逸脱しているが空間光変調器の変調範囲を超えているためと考えられる

今回の研究ではアイドラー光分散補償に必要なポンプ光分散量が非常に大きく、その対策に期間を労したため、その後のパルス圧縮実験及び数サイクル光発生実験(研究方法(3)(4))まで進めることができなかった。し

かしながら本研究の遂行によりOPCPAにおけるアイドラー光高次分散補償が可能であることが実験的に明らかになった。本実験で液晶変調器によって与えたポンプ光位相変調をファイバブラッグ回折格子の制作・設置により安定に印加すれば、シンプルでコンパクトな数サイクル高強度レーザーが実現可能である。研究期間終了後も同装置の実現及び普及に関する研究を続けていく予定である。また同手法はOPAだけでなく、和・差周波混合等他の非線形過程にも応用可能で、発生光が通常の光学素子で制御しづらい紫外域や中赤外域の場合にも有望な分散補償技術としても研究を進めていくつもりである。

#### 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 1 件)

- ① Y. Akahane, K. Ogawa, K. Tsuji, and K. Yamakawa, Compression of idler pulses with an identical positive dispersive media to signal pulse stretcher in ultrafast optical-parametric chirped-pulse amplification, Proceedings of SPIE, (査読無), vol. 7589, 2010, 75890L-1-8

[学会発表] (計 5 件)

- ① 赤羽温、富田仁、小川奏、西岡一、山川考一、アイドラー光パルス圧縮における高次分散補償 (2) —ポンプ光位相制御によるアイドラー光分散補償—、第59回応用物理学関係連合講演会、2012年3月17日、早稲田大学
- ② Y. Akahane, H. Tomita, K. Ogawa, H. Nishioka, and K. Yamakawa, Generation of intense femtosecond laser pulse by compression of an idler pulse with an identical positive dispersive media as signal pulse stretcher, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2011, 2011年5月4日、ボルチモア(米国)
- ③ 赤羽温、富田仁、小川奏、西岡一、山川考一、パルス伸長・圧縮に正分散媒質を用いた高強度フェムト秒レーザー装置の開発、レーザー学会学術講演会第31回年次大会、2011年1月9日、電気通信大学
- ④ Y. Akahane, K. Ogawa, and K. Yamakawa, Ultrafast Chirped-pulse Amplification using an Identical Positive Dispersive

Media for Both Pulse Stretching and Compression, The 9th International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (ISUILS9), 2010年12月11日, マウイ島 (米国)

- ⑤ 赤羽温、富田仁、小川奏、西岡一、山川考一、アイドラー光パルス圧縮における高次分散補償(1) —OPA相互作用光の位相計測—、第29回応用物理学会学術講演会、2010年9月16日、長崎大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

赤羽 温 (AKAHANE YUTAKA)

独立行政法人日本原子力研究開発機構

量子ビーム応用研究部門・研究副主幹

研究者番号：00370338

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし