

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360036

研究課題名（和文）化学反応制御に向けた高輝度超短パルス波長可変レーザー増幅技術の確立

研究課題名（英文） Innovation of high-intensity, tunable ultrashort pulse amplification technology toward controlling chemical reaction

研究代表者

山川 考一（KOICHI YAMAKAWA）

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹

研究者番号：40360408

研究成果の概要（和文）：

原子や分子運動の完全制御に向けた多波長・広帯域レーザー増幅技術の確立を目的とし、超広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅器（OPCPA）の開発を行った。これより、中心波長800 nmの近赤外領域から8.6 mmの中赤外領域にわたる波長可変レーザーの増幅を実現した。

研究成果の概要（英文）：

In order to establish multi-wavelength, widely tunable laser amplification technologies for controlling the motions of atoms and molecules, ultra-broadband optical parametric chirped-pulse amplifiers were developed. Ultra-broadband amplification from near-infrared (800 nm in wavelength) to mid-infrared (8.6 mm in wavelength) regions was demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	5,500,000	1,650,000	7,150,000

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、量子光工学、高性能レーザー、光パラメトリックチャープパルス増幅法

1. 研究開始当初の背景

超短パルスレーザー技術の進展によって高出力フェムト秒レーザーが世界的に珍しくはなくなっており、さらなる高出力化と短パルス化、そしてその応用は激しい競争となっている。ところが、この競争における問題点は、主に外国製の市販レーザーを購入し、それらを組み合わせてわずかな改造をほどこすのみで応用研究に供していることである。このように基盤装置自体がほぼ共通であることから、どの研究室でも同程度のスペックであること、高出力・短パルスを目指すだけで波長可変域の拡大といったレーザー光

の潜在能力を積極的に発現させるという視点に欠けていた。

一方、高輝度超短パルスレーザーを分子に照射し、そのイオン化や乖離、分解など、構造変化のダイナミクスを超高速で観測、制御する試みが世界各国で精力的に進められている。物質機能をつかさどる化学反応は光の波長によってもその振る舞いが大きく異なる。しかしながら強光子場を維持しつつ、広範囲（近赤外～中赤外）で波長可変できるレーザーシステムは存在しないことから、光による化学反応制御などへの応用範囲が限られていた。

2. 研究の目的

申請者はこれまで独自に、半導体直接励起イッテルビウム (Yb) 系固体レーザーと光パラメトリックチャープパルス増幅 (OPCPA) 技術を開発しており、これらの技術の融合によって広範囲 (近赤外~中赤外) で波長可変できる超短パルス増幅技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 超広帯域種光源の発生

超広帯域 OPCPA 用の種光 (信号光) には波長 600 nm から 2000 nm におよぶスペクトル幅が必要となるため、あらかじめレーザー発振器からのモード同期パルスをフォトニック結晶ファイバー (PCF) 等に入射し、スーパーコンテニューム (超白色光) に変換する。

(2) 近赤外領域における広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅器の開発

近赤外領域における光パラメトリック増幅帯域幅のさらなる拡大には、重水素置換率を最適化した DKDP が有用であり、これを用いて光パラメトリック増幅試験を実施し、増幅特性を取得する。

(3) 中赤外領域における広帯域光パラメトリック増幅器の開発

より長波長域 (> 2000 nm) での広帯域光パラメトリック増幅試験を行い、その増幅特性を取得し、さらなる波長可変領域の拡大を目指す。

(4) 光パラメトリック増幅光の特性評価

得られた光パラメトリック増幅光の特性評価は、エタロンによって生成される 2 波長のチャープパルスと被計測光との周波数シェアリング干渉を計測する位相計測装置を製作し、得られたインターフェログラムから時間波形、パルス幅、位相情報を再構築することにより、光パルスの特性評価をリアルタイムで行えるように整備する。

4. 研究成果

(1) 超広帯域種光源の発生

超広帯域 OPCPA 用の種光 (信号光) には波長 600 nm から 2000 nm におよぶスペクトル幅が必要となるため、本研究項目では、高非線形性を有する合成石英板 (厚さ 10 mm) にモード同期発振器からの帯域幅 17 nm のレーザー光を光パラメトリック増幅 (OPA) した後、対物レンズを用いて集光照射し、波長 600 nm から 1400 nm におよぶスーパーコンテニュームの発生に成功した。

なお、これ以上の波長では有意な信号が観

測できなかったため、波長 1400 nm 以上での増幅には光パラメトリック過程でポンプ光から信号光へのエネルギー変換によって信号光を増幅する際に二つの光の波長差に伴って発生するアイドラー光を利用する。

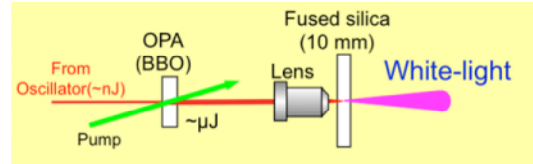


図 1 超広帯域種光源発生のための実験配置。

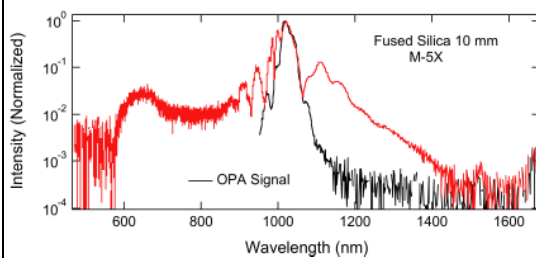


図 2 スーパーコンテニューム発生実験結果。スーパーコンテニューム (赤線)、OPA 入力光 (黒線)。

(2) 近赤外領域における広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅器の開発

重水素置換率 13% の DKDP 結晶を用い、図 3 に示すように近赤外領域の信号光の増幅帯域幅として 250 nm 以上を達成した。また、得られた増幅光の 2 次元ビームプロファイルを図 4 に示す。

さらに、励起光強度に対する OPCPA 利得を図 5 に示す。励起光強度 60 GW/cm² の時に OPCPA 利得として 2×10^4 が得られた。

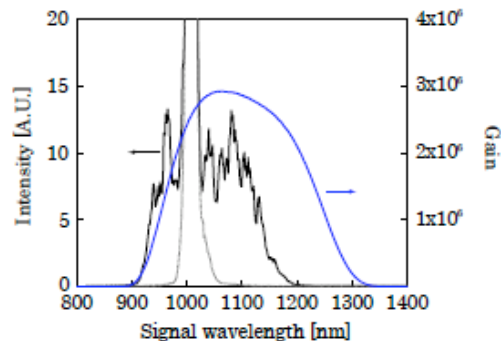


図 3 増幅光のスペクトル (黒太線)、計算値 (青線)、発振器出力スペクトル (黒細線)。

さらに、重水素置換率を調整することで最大 400 nm 以上の増幅帯域幅が得られることを数値解析により明らかにした。

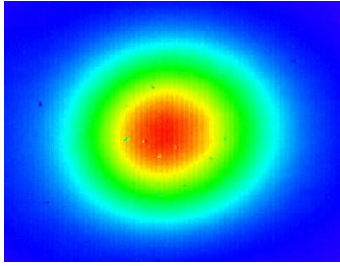


図 4 OPCPA 増幅光の 2 次元ビームプロファイル.

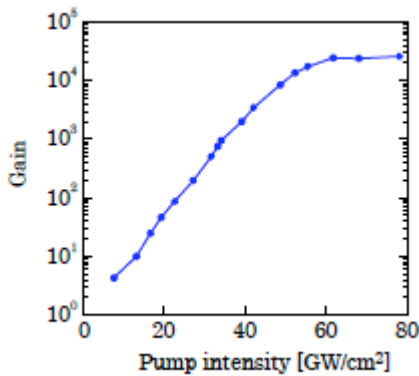


図 5 励起強度に対する OPCPA 利得.

(3) 中赤外領域における広帯域光パラメトリック増幅器の開発

より長波長域 (> 2,000 nm) での光パラメトリック増幅試験を行い、中赤外領域での波長可変レーザー光源の開発を行った。

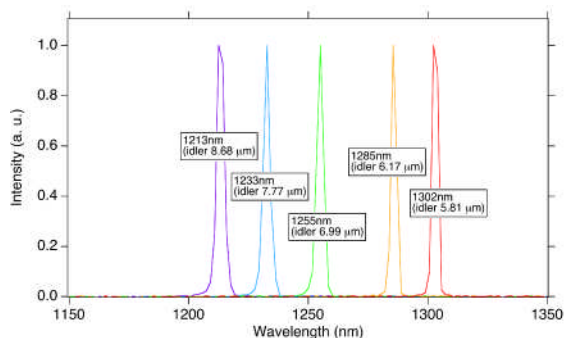


図 6 OP0 シグナル光の波長可変特性. 括弧内のアイドラー光の波長.

本実験では中赤外光の発生に光パラメトリック発振器 (OP0) を用いた。OP0 の励起光源には、Q-スイッチ Nd:YAG レーザー (波長 :

1064 nm、繰り返し数 : 10 Hz) を用いた。OP0 の共振器は平面の誘電体多層膜出力ミラーとシルバーコーティングの金属ミラーで構成し、共振器長は 25 mm に設定した。また、LiInSe₂ 結晶 (5 mm x 7 mm x 20 mm、φ34 度、タイプ 2) を OP0 の非線形結晶に使い、発振波長のチューニングには本結晶の角度を調整することにより、シグナル光として 1213 nm ~ 1302 nm、アイドラー光として 5.8 μm ~ 8.7 μm の波長可変中赤外レーザー光の発生に成功した。

(4) 光パラメトリック増幅光の特性評価

得られた光パラメトリック増幅光の位相情報を測定するために、エタロンによって生成される 2 波長のチャープパルスと被計測光との周波数シェアリング干渉を計測する位相計測装置を構築した。図 7 は本測定装置を用いて計測した光パラメトリック増幅光のスペクトル位相情報である。回折格子とシリンドリカルミラーを組み合わせた 4f 光学系 (図 7) 内に空間液晶位相変調器 (図 8) を設置し、光学的に展開したフーリエ面において、周波数成分の位相を任意にプログラミングすることによって (2) で得られた OPCPA 増幅光に 3 次の位相歪みを与えている。

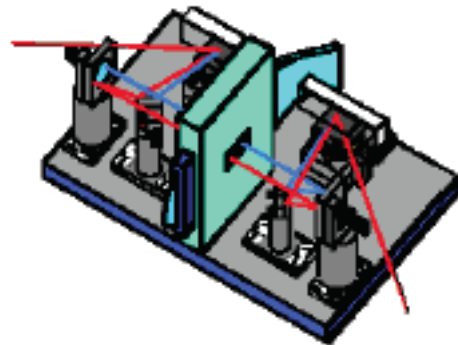


図 7 4f 光学系.

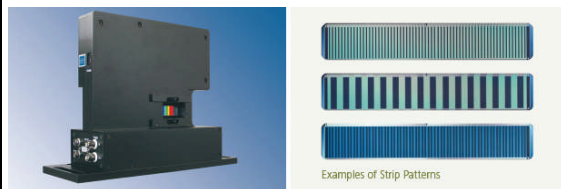


図 8 液晶空間位相変調器.

図 9 は測定された OPCPA 増幅光のスペクトル位相を示しており、図から明らかなように、位相変調器による 3 次分散が大きく影響していることが明らかとなり、リアルタイムで広帯域光の位相計測が可能となった。

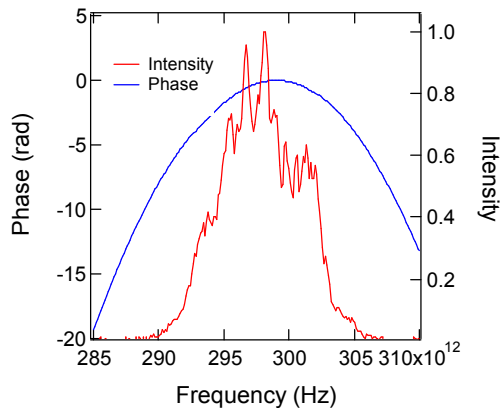


図 9 OPCPA 増幅光のスペクトル位相データ.

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 8 件)

- ① 山川考一、ペタワットレーザー: 極限の光強度を目指して、応用物理(レーザー生誕 50 周年記念特集号)、査読有り、79 巻、2010、pp. 517~523
- ② 小川奏、赤羽温、辻公一、山川考一、グリズム対を用いた光ファイバパルス伸張型チャープパルス増幅システムでの残留 3 次分散補償、レーザー研究、査読有り、38 巻、2010、pp. 779-783
- ③ Y. Akahane, K. Ogawa, K. Tsuji, M. Aoyama, and K. Yamakawa, Idler Pulse Compression using an Identical Positive Stretcher/Compressor Combination in Optical-Parametric Chirped-Pulse Amplification, Applied Physics Express, 査読有り, vol. 2, 2009, pp. 072503-1-072503-3
- ④ T. Harimoto and K. Yamakawa, Analytical Expressions for Small-Signal and Saturation Processes of Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification, 査読有り, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 48, 2009, pp. 098005-1 - 098005-2
- ⑤ 池ヶ谷一喜、張本鉄雄、山川考一、光パラメトリックチャープパルス増幅における飽和過程の近似解析、レーザー研究、査読有り vol. 37, 2009, pp. 312-315
- ⑥ K. Ogawa, K. Sueda, Y. Akahane, M. Aoyama, K. Tsuji, K. Fujioka, T. Kanabe, K. Yamakawa and N. Miyanaga, Controlling the phase matching conditions of optical

parametric chirped-pulse amplification using partially deuterated KDP, Optics Express, 査読有り, vol. 17, 2009, pp. 7744-7749

- ⑦ 山川考一、青山 誠、赤羽 温、小川 奏、辻 公一、超高強度数サイクルレーザー、レーザー研究、査読有り、vol. 36、2008、pp. 555-561
- ⑧ T. Harimoto and K. Yamakawa, Recompression of a Femtosecond Second-Harmonic Pulse Based on Combined Action of Group-Velocity Dispersion and Phase Modulations in a Potassium Dihydrogen Phosphate Crystal, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 47, 2008, pp. 4547-4551

[学会発表] (計 5 件)

- ① 山川考一、ペタワットレーザー: 極限の光強度を目指して(招待講演)、応用物理学会特別シンポジウム「レーザー: 生誕から半世紀を経て、新時代を切り拓く究極の光を求めて進化し続けるその魅力とは?」、2010 年 9 月 15 日、長崎大学
- ② K. Yamakawa, Optical-Parametric Chirped-Pulse Amplification using a Positive Dispersive Material for Pulse Stretching and Compression(招待講演), IEEE Photonics Society Annual Meeting, 2010. 11. 11, Denver, CO, USA
- ③ K. Yamakawa, Cryogenically-cooled ytterbium-doped solid-state lasers and their applications(招待講演), International Symposium on Chirped Pulse Amplification (25th anniversary of the invention of CPA), 2010. 11. 20, Quebec, Canada
- ④ K. Yamakawa, Ultrafast, High Power Laser Technologies: Challenges and Perspectives(招待講演), Advanced Solid State Photonics 2010, 2010. 2. 3, San Diego, CA, USA
- ⑤ K. Yamakawa, Bandwidth enhancement of optical parametric chirped-pulse amplification by temporally delayed twin pump beams, LEOS Annual Meeting 2008, 2008. 11. 11, Newport Beach, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山川 考一 (KOICHI YAMAKAWA)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・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
()

研究者番号：