

平成22年 5月7日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19560033  
 研究課題名 (和文) アイドラ光の最適制御による光パラメトリックチャープパルス増幅の安定化と超広帯域化  
 研究課題名 (英文) Stable and ultra-broadband optical parametric chirped pulse amplification by optimizing idler laser pulse  
 研究代表者  
 張本 鉄雄 (HARIMOTO TETSUO)  
 山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授  
 研究者番号：80273035

研究成果の概要 (和文)：本研究は二ビーム励起およびアイドラ光の最適化制御による光パラメトリックチャープパルス増幅の超広帯域化と安定化の新しい方式を考案し、ペタワット(1 PW=10<sup>15</sup> W)・サイクル(数フェムト秒)パルスレーザー光の発生を目的とした。研究成果として、スペクトルバンド幅 400 nm を超えるレーザーパルスの増幅を実現した。また、光パラメトリックチャープパルス増幅に関する簡易な光学設計法を開発した。

研究成果の概要 (英文)： New proposals for optical parametric chirped pulse amplification by using two pumping beams and optimizing the idler beam are investigated in this work. Ultra-broadband OPCPA with a spectral bandwidth over 400 nm has been demonstrated in the experiment. In addition, a simple optical design method based on new analytical expressions with respect to small and saturated approximations has been found in the theoretical work.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・基礎工学・応用光学・量子光工学

キーワード：レーザー

## 1. 研究開始当初の背景

光パラメトリックチャープパルス増幅 (Optical Parametric Chirped Pulse Amplification: OPCPA) は高出力レーザー増幅技術の一つである。OPCPAに関する研究は、英国をはじめ、米国、中国、ロシア、日本等の国立研究機関で行われている。英国の RAL 研究所では、ペタワット OPCPA レーザーシス

テムの開発を先駆的に進め、三段の OPCPA で 0.35 PW/85 fs の出力まで成功した (2004～2005 年)。ロシア科学アカデミー応用物理研究所では、三段の DKDP (KD\*P) 結晶を用いた OPCPA システムで 0.2 PW/45 fs の出力を得た (2005 年)。大阪大学レーザーエネルギー学研究所では、レーザー核融合の高速点火原理実証実験計画 (FIREX) の一環として、2007

年度までに OPCPA 技術を取り入れた 10 PW 級の高エネルギー超高強度レーザーの完成を目指したが、2009 年に完成した。また、日本原子力研究開発機構と山梨大学との共同研究で超広帯域 (>400 nm) の OPCPA に関する研究も進めている (2004 年～)。

OPCPA 技術の特徴は、従来の再生増幅器及び主増幅器を置き換えるものとして、増幅装置が小さなサイズであること、広帯域、高いコントラスト、高い利得が無熱増幅で得られること等が挙げられる。しかし、OPCPA 技術には二次的非線形光学効果を用いているため、増幅後の信号光が入射レーザーのパラメータに敏感に依存し、超広帯域で且つ安定した増幅が容易でなく、ペタワット級 OPCPA が 1997 年に提案されてから 2007 年までの 10 年間で、ペタワットまでの増幅がまだ実現されていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では二ビーム励起およびアイドラ光の最適化制御による OPCPA の超広帯域化と安定化の新しい方式を考案し、ペタワット (1 PW=10<sup>15</sup> W) ・サイクル (数フェムト秒) パルスレーザー光の発生を目的とする。

## 3. 研究の方法

研究代表者は、これまで科学研究費の支援を受け、時間・空間・周波数を含めた非線形波動方程式の数値計算コードを開発し、それを用いて OPCPA における安定性のメカニズムについて検討を行ってきた。その結果、エネルギーの保存則により励起光と信号光とのエネルギー変換とともに発生したアイドラ光は、信号光の増幅に欠かせないものであるが、励起光の時間または空間分布にエネルギーの枯渇場所が現れると、信号光から励起光への逆変換も可能となり、増幅過程が不安定になることを突き止めた。OPCPA によるペタワット・サイクルレーザーの実現には、OPCPA におけるアイドラ光の最適化制御が重要な課題となった。そこで、本研究代表者は OPCPA を複数個縦続接続して多段構造とすることでアイドラ光の最適化制御方式を提案し、アイドラ光、非線形光学結晶の枚数及びその厚さを最適化することによって増幅後の信号光の安定化と超広帯域化を図った。本研究では、研究代表者が提案したアイドラ光の最適化制御による超広帯域の OPCPA の安定化方式に関して、数値計算及び光学設計を始め、超広帯域増幅の実証、利得特性の実証、増幅した信号光の時間圧縮実験、そして OPCPA によるペタワット・サイクルレーザーパルスの発生等に関する理論及び実験研究を三年間にわたって行い、サ

イクルパルス OPCPA の成功に取り組んできた。具体的には、アイドラ光制御を用いた多段 OPCPA 過程の数値評価・結晶の設計及びレーザーの最適化方法を明らかにした。また、ペタワット級まで信号光を増幅するには大口径の結晶が必要であるが、バルク結晶では大きなサイズまで成長するのは容易ではないため、大型固体レーザーに既に利用されているマルチタイリング結晶の利用可能性を評価した。更に、従来の KDP 結晶を含め、DKDP (KD\*P) 結晶を最終段の非線形光学結晶としてその利用可能性を検討した。更に超広帯域 (>400 nm) に対応するには、研究代表者が既に考案した励起光の空間発散を用いた OPCPA 方式をペタワット級 OPCPA に応用し、サイクルパルスの極限特性を有するレーザーの発生を実現させた。

一方、光パラメトリック増幅は、励起光及びシード光に差周波数成分であるアイドラ光を加えた三光波が非線形光学結晶中の伝搬距離に依存して増幅・飽和・逆変換の三過程を周期的に繰り返し、その変化は非線形波動方程式から三光波間の相互作用によって説明される。増幅特性は位相不整合や強度、結晶厚さ等によって大きく変化するため、数値解析によるアプローチが不可欠である。これまでよく用いられてきた小信号近似式は、位相整合に基づいた増幅スペクトルの解析や位相シフトの制御においてその有効性を示した。しかし、高利得および高変換効率が得られる飽和過程は小信号近似が対応できず、逆変換が起こり得る不安定な状態である。従って、飽和過程の光学設計のためには非線形波動方程式に基づく複雑な数値解析モデルやそこから導出した楕円積分の計算が必要で、小信号近似のような解析が困難である。本研究では、こうした課題にも取り組んで、小信号近似のみならず、複雑な数値計算を行わなくても、実際によく利用されている飽和領域における解析的な光学設計法の開発も行った。

## 4. 研究成果

日本原子力研究開発機構との共同研究で、バンド幅 400 nm を超える OPCPA の実験を成功させ、世界で最高水準の実験成果を上げることができた。

超広帯域 OPCPA に関するメカニズムの研究では、被増幅シードの位相シフトと位相不整合ファクターとの相関性について数値計算及び近似解析による検証を行い、位相不整合ファクターを調整することで位相シフト及び圧縮効率の任意制御が可能である点を確認した。また、位相シフトが被圧縮分布に対して与

える影響が大ききなものであり、位相整合角度並びに光波斜入射角度の最適化にあたり充分にその影響を踏まえるべきであるとの結論に至った。更には、光パラメトリックチャープパルス増幅における位相シフトの小信号近似解が高精度を保証し、最適化の指標として有用である点も確認した。これらの研究成果はこれまで小信号近似解析の適応性をより広範囲にわたって可能であることを示した。

本研究では高強度励起による広帯域ピコ秒 Yb系固体レーザーのOPCPAに関する数値解析を行った。高強度による三次の非線形光学効果を含めた数値解析結果から、type I BBO結晶で100 GW/cm<sup>2</sup>の励起光を用いた増幅により2 GW/cm<sup>2</sup>の増幅の1.84倍まで利得バンド幅が広がったことが明らかになった。更に、高強度励起により位相不整合や群速度不整合、ウォークオフ角を効果的に補償できることもわかった。これらの数値結果は日本原子力研究開発機構との共同研究で実施した実験より得られた結果と一致することも明らかになった。

OPCPAにおける最大の問題点は、非線形光学結晶中において増幅・飽和・逆変換を周期的に繰返すことであり、その周期が入射条件によって複雑に変化することである。非縮退条件における広帯域位相整合が得られるものの、増幅周期が異なる問題に対して、本研究では二段増幅器の配置を考案した。二段増幅器の一方は中心波長で位相整合をとり、もう一方は長・短波長領域で位相整合をとるが、二段目の増幅では一段目で増幅した高強度シード光の影響を強く受けることとなる。そのため、どちらを先に配置するかによって結果も大きく変化する。本研究では位相整合方式のとり方として、一段目に長・短波長位相整合、二段目に中心波長位相整合となるような結晶配置を採る。その結果、450 nmを超えるスペクトル範囲の増幅が可能であることが明らかになった。縮退条件では利得の広帯域化のためには励起光の高強度化が必要であり、高強度化が可能Yb系固体レーザーが有効に用いることができた。縮退の位相整合条件は、位相整合角によって利得帯域を容易に制御できることや、強度や位相整合条件によって変化する増幅特性を利用し、逆変換を抑えた二段の増幅によってこれを検証した。

本研究では、非線形波動方程式から求めた楕円積分をもとにし、飽和過程における解析的關係を世界で初めて求めた。また、その信頼性や飽和増幅における最適な結晶厚さとそれに対応する利得等の信頼性を数値計算で検証した。更に実際の実験条件にもとづき、それに近い検証結果も得られた。導出した近似

解析式を用いた光パラメトリックチャープパルス増幅に関する結晶設計法も確立し、高変換効率増幅のための簡単な光学設計が見込める。これらの研究成果は既に日本原子力研究機構関西研究所にOPCPAの光学設計に利用されている。

#### 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15件)

- ① **Tetsuo Harimoto**, Kazutaka Ikegaya and K. Yamakawa, Analytical expressions for small-signal and saturation processes of optical parametric chirped pulse amplification, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol.48, 2009, 098005-1-2
- ② 池ヶ谷一貴, **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, 2009, Vol. 37, 312-315
- ③ **T. Harimoto** and H. Shiraga, Numerical analysis of near and far field patterns of second-harmonic generation with tiling nonlinear optical crystals, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 112, 2008, 042083(4 pages)
- ④ 友田香織, **張本鉄雄**, 白神宏之, タイリング KDP 結晶を用いた第二高調波発生における大口径基本波レーザーのパルス及び位相フロントの数値評価, 光学, 査読有, Vol. 37, 2008, 538-544
- ⑤ 池ヶ谷一貴, **張本鉄雄**, 山川考一, 高強度励起による Yb 系固体レーザーの光パラメトリックチャープパルス増幅の超広帯域化の数値解析, 光学, 査読有, Vol. 37, 2008, 478-483
- ⑥ Kanade Ogawa, Makoto Aoyama, Yutaka Akahane, Koichi Tsuji, Junji Kawanaka, **Tetsuo Harimoto**, Hajime Nishioka, Masayuki Fujita, and Koichi Yamakawa, Bandwidth Enhancement of Optical Parametric Chirped Pulse Amplification by Temporally Delayed Two Pump Beams, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol.47, 2008, 4592-4594
- ⑦ **Tetsuo Harimoto** and K. Yamakawa, Recompression of a femtosecond second-harmonic laser pulse based on combined action of group-velocity dispersion and phase modulations in a potassium dihydrogen phosphate crystal, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol.47, 2008, 4547-4551
- ⑧ 小澤祐貴, **張本鉄雄**, 山川考一, レーザー研究, 光パラメトリックチャープパル

- ス増幅における位相シフトの数値解析, 査読有, 2008, Vol. 36, 374-378
- ⑨ **Tetsuo Harimoto**, Analytical expression for second-harmonic phase in frequency-doubling process with a type I potassium dihydrogen phosphate crystal, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol.47, 2008, 1609-1611
- ⑩ **Tetsuo Harimoto**, M. Aoyama, and K. Yamakawa, Numerical simulation of self-compressed second-harmonic generation in type II potassium dihydrogen phosphate with a time predelay for Yb-doped solid-state lasers, Opt. Express, 査読有, Vol.15, 2007, 17529-17535
- ⑪ **Tetsuo Harimoto** and K. Yamakawa, Self compression of Yb-doped solid-state lasers by combination of self-phase modulation and group-velocity dispersion in KDP crystal, Opt. Express, 査読有, Vol.15, 2007, 15438-15443
- ⑫ 小川奏, 赤羽温, **張本鉄雄**, 青山誠, 辻公一, 河仲準二, 西岡一, 藤田雅之, 山川考一, 励起光の発散角を利用した超広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅法, レーザー研究, 査読有, 2007, Vol. 35, 596-598
- ⑬ M. Aoyama, Y. Akahane, K. Ogawa, K. Tsuji, A. Sugiyama, **Tetsuo Harimoto**, J. Kawanaka, H. Nishioka, M. Fujita and K. Yamakawa, Degenerate optical parametric chirped-pulse amplifier pumped by an Yb:LiYLF chirped-pulse amplification laser, レーザー研究, 査読有, 2007, Vol. 35, 398-399
- ⑭ 湯川博基, **張本鉄雄**, 白神宏之, タイリング結晶を用いた大口径高出力レーザーにおける第二高調波の遠視野分布に関する数値解析, 光学, 査読有, Vol. 36, 2007, 273-279
- ⑮ K. Yamakawa, M. Aoyama, Y. Akahane, K. Ogawa, K. Tsuji, A. Sugiyama, **Tetsuo Harimoto**, J. Kawanaka, H. Nishioka, and M. Fujita, Ultra-broadband optical parametric chirped-pulse amplification using an Yb:LiYF<sub>4</sub> chirped-pulse amplification pump laser, Opt. Express, 査読有, Vol.15, 2007, 5018-5023
- [学会発表] (計11件)
- ① 内田孝介, 楊牧, **張本鉄雄**, 土橋正典, 小佐野美樹, 佐藤孝志, 山田耕平, 松坂浩志, 小松利安, 藤原和徳, 細野高史, 秋山育也, Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーの第二高調波発生の高効率化, 第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月8日, 富山大学
- ② 楊牧, 内田孝介, **張本鉄雄**, 土橋正典, 小佐野美樹, 佐藤孝志, 山田耕平, 松坂浩志, 小松利安, 藤原和徳, 細野高史, 秋山育也, BBO結晶を用いたQ-switched Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーの第四高調波発生出力安定化, 第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月8日, 富山大学
- ③ 内田孝介, 楊牧, **張本鉄雄**, 土橋正典, 小佐野美樹, 佐藤孝志, 山田耕平, 松坂浩志, 小松利安, 藤原和徳, 細野高史, 秋山育也, BBO結晶を用いたQ-switch Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーの第二高調波発生, 第9回レーザー学会東京支部研究会, 2009年3月4日, 東海大学
- ④ 楊牧, 内田孝介, **張本鉄雄**, 土橋正典, 小佐野美樹, 佐藤孝志, 山田耕平, 松坂浩志, 小松利安, 藤原和徳, 細野高史, 秋山育也, S-BBO結晶を用いたQ-switch Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーの第四高調波発生, 第9回レーザー学会東京支部研究会, 2009年3月4日, 東海大学
- ⑤ 小川奏, 青山誠, 赤羽温, 辻公一, 河仲準二, **張本鉄雄**, 西岡一, 藤田雅之, 山川考一, 広帯域2ビーム励起によるOPCPA帯域の拡張, レーザー学会学術講演会第29回年次大会, 2009年1月10日, 徳島大学
- ⑥ 池ヶ谷一貴, **張本鉄雄**, 山川考一, 2ビーム励起光パラメトリックチャープパルス増幅の超広帯域化数値解析, 第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月4日, 中部大学
- ⑦ 鈴木健太, **張本鉄雄**, BIBO結晶を用いたマイクロチップ固体ブルーレーザーの温度特性, 第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月2日, 中部大学
- ⑧ 小澤祐貴, **張本鉄雄**, 山川考一, 広帯域多段光パラメトリックチャープパルス増幅における周波数変調特性の数値解析, レーザー学会学術講演会第28回年次大会, 2008年1月30日, 名古屋国際会議場
- ⑨ 友田香織, **張本鉄雄**, 白神宏之, タイリング光学系における遠視野分布の空間時間特性の数値解析, レーザー学会学術講演会第28回年次大会, 2008年1月30日, 名古屋国際会議場
- ⑩ 高橋俊光, **張本鉄雄**, 白神宏之, 回折格子圧縮器による2次分散補償の解析評価, レーザー学会学術講演会第28回年次大会, 2008年1月30日, 名古屋国際会議場
- ⑪ 池ヶ谷一貴, **張本鉄雄**, 山川考一, ピコ秒パルスレーザーを用いたディジェネレーション光パラメトリックチャープパルス増幅の数値解析, 日本光学会年次学術講演

会 (Optics & Photonics Japan 2007),  
2007年11月26日, 大阪大学コンベンシ  
ョンセンター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

張本 鉄雄 (HARIMOTO TETSUO)  
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授  
研究者番号: 80273035

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし