

## 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 25 年 5 月 1 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560037

 研究課題名（和文） 搬送波位相制御・オクターブ幅・赤外波長帯域・サイクルパルス  
レーザー光の高出力化

 研究課題名（英文） High power laser systems with a controlled carrier-envelope phase  
and an over-one-octave infrared bandwidth

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）：

タイリング型大口径の光パラメトリックチャープパルス増幅レーザーシステムの最適化設計を実施した。提案したダブルパスで 532 nm の励起レーザーの出力パワーは最大で 2.7 倍まで増加することが実験で示された。また、微小な位相不整合ファクターを第二高調波発生過程に取り入れることによって、基本波レーザーパルスの先頭強度の安定性を 7% から 2% に上げることが実験で示した。さらに、特性パラメータ  $\Delta S$  と非線形光学結晶の最適な長さとの解析関係を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

An optimum design of a tiling scheme with nonlinear optical crystals for a large scale optical parametric chirped pulse amplification system was achieved. In comparison with the single-pass configuration, the enhancement factor of the second-harmonic laser at 532 nm with the two-pass configuration is up to 2.5 in a type I beta-barium borate crystal. The peak-intensity stability of a nanosecond-order fundamental laser at 1064 nm is improved from 7% to 2% with a type I non-critical phase-mismatching lithium triborate crystal heated at an environment temperature of 146°C. In addition, a simple method with the parameter  $\Delta S$  used to evaluate the thickness of the nonlinear optical crystal corresponding to the maximum second-harmonic intensity was achieved under the phase-mismatching condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：アト秒レーザー、非線形光学効果、光パラメトリック増幅、チャープパルス増幅、レーザー安定性

## 1. 研究開始当初の背景

高強度で安定した搬送波位相(Carrier-envelope phase: CEP)をもつ数サイクルレーザーパルスの研究開発はアト秒物理学及び高強度レーザー科学において重要な課題になってきた。数サイクル・赤外レーザーパルスは、高強度だけでなくその長波長でも高いポンデロモティブエネルギーをもたらすことから、様々な実験に大きな影響を与え、強電場物理学における波長スケールに対する実験実証に欠かさないものである。電子運動エネルギー、高次高調波発生のカットオフエネルギー、単原子の高次高調波発生効率、アト秒レーザーパルスの最短時間幅等は長波長を用いることが求められている。また、高強度・赤外波長帯域・数サイクルパルスレーザーを用いた位相整合高次高調波発生による軟X線及び硬X線領域のコヒーレント光発生の可能性も既に明らかになった。

このような背景では、高強度赤外極短パルスレーザーの開発が盛んに行われている。その中、光パラメトリックチャープパルス増幅(Optical parametric chirped pulse amplification: OPCPA)を用いたアト秒物理学及び高強度レーザー科学のための高出力レーザー発生に関する研究が注目されている。このようなレーザーの特徴としては、サイクル時間幅、近・中赤外波長帯域、テラワットからペタワットの出力、そして安定した搬送波位相が挙げられる。現段階では、差周波数混合による搬送波位相の安定化及びOPCPAを利用した数サイクルレーザーパルスの発生・増幅技術は既に成熟しつつあるが、高出力化及び高繰り返し化まで同時に実現させることが容易ではない。また、 $1.1\sim 4\mu\text{m}$ の近・中赤外波長帯域で、数百マイクロジュールの出力が得られたものの、オクターブバンド幅にわたっての高出力化及び高繰り返し化はまだ実現されていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、アト秒物理学及び高強度レーザー科学の研究に必要なレーザードライバーの光学設計法を考案し、BIBO結晶(bismuth triborate:  $\text{BiB}_3\text{O}_6$ /BIBO)及びそのタイリング化をしたものを光パラメトリックチャープパルス増幅器とした搬送波位相安定・ペタワット出力・オクターブバンド幅・赤外波長帯域・サイクルパルスレーザー光の発生を目

的とした。

## 3. 研究の方法

### (1)搬送波位相制御光学系の解析

光ファイバーにおける非線形光学効果を記述する非線形波動方程式に関する数値計算コードを開発し、光ファイバー中におけるピコ秒パルスレーザーの自己位相変調による時間的広がりに関する実験も実施した。本研究では、OPCPAの信号光の発生源として中空ファイバー等による白色光コンティニューム発生に関する数値計算法を確立する。また、第二高調波発生の数値計算コードを差周波数混合に応用し、非線形光学結晶(BBO、BIBO)を用いた差周波数混合による搬送波位相の制御に関する最適化設計を行う。

### (2)タイリング型 BIBO 結晶を用いた二段大口径 OPCPA の最適化設計

励起光の強度及び増幅後の信号光とアイドラ光の強度はBIBO結晶の損傷閾値( $\sim 100\text{GW/cm}^2$ )以下に抑えなければならない。BIBO結晶の大きさは現段階では数cm程度であるが、高エネルギーを得るには、レーザービーム径を大きくすると同時に結晶の大口径化も必要である。本研究は平行型OPCPAを使えることから、数枚BIBO結晶をタイリング化した配置によるOPCPA結晶の大口径化方式を提案する。近視野及び遠視野分布を用いて各結晶間の厚み誤差による位相差、時間差、結晶相互の位置及び角度関係、平面度及び平行度に関する諸指標を明らかにしたうえで、結晶損傷を起ささないように励起光、信号光、アイドラ光のビーム径を最適化することで、レーザーの高出力化を図る。

搬送波位相安定・第一段OPCPA・ビームエキスパンダ・第二段OPCPA等の光学系の間における連係動作の基礎実験及び実験データの解析を行い、非線形波動方程式を用いた数値計算と全ての光学系の最適化設計の結果を評価する。初期実証実験で得られた実験結果と数値解析結果の比較を行うことによって、搬送波位相制御・ペタワット・オクターブバンド幅・赤外サイクルパルスレーザー発振に関する光学設計法を確立する。

### (3)OPCPAシステムにおける励起レーザーの先頭強度の安定性向上

実用的なOPCPAレーザーシステムを構築するため、励起レーザー光のピーク強度の安定性が新たな課題として浮上ってきて、安定

したサイクルパルスレーザーを発生するには、励起レーザー光の安定性向上が求められてきた。本研究では微小な位相不整合を取り入れた第二高調波発生を用いた基本波ピーク強度レーザー光の安定性技術を新たに開発し、それに関する数値計算および実験検証を行い、励起レーザーの先頭強度における安定性向上を図る。

#### 4. 研究成果

##### (1) 搬送波位相制御光学系の解析

本研究では、開発した光ファイバーにおける非線形光学効果を記述する非線形波動方程式数値計コードを生かし、OPCPAの信号光の発生源として中空ファイバー等による白色光コンティニューム発生に関する数値計算法を確立した。また、開発した第二高調波発生の数値計算法を差周波数混合に応用し、オクターブ幅信号光の発生に関する定量評価法を確立した。これまでの研究でIgor Proというグラフィックスソフトを用いて展開してきたが、より汎用性の高いMathematicaやMaple、EXCELでも数値計算及び光学系評価を行えるようになった。

##### (2) タイリング型 BIBO 結晶を用いた二段大口径 OPCA の最適化設計

本研究で考案したOPCPAにおける励起光と信号光を時間的に遅延させ励起光パルスと信号光パルスの立ち上りと立ち下り部分に別々に合わせる増幅方式を用いた蛍光の寄生増幅の抑制について理論的に検証した。また、タイリング型 BIBO 結晶を用いた大口径OPCPAの最適化設計も行った。これらの研究の実施に当たって、OPCPAの基礎となった二次の非線形光学効果における小信号区域と飽和区域の動的特性を解析的に明らかにすることができた。特に位相不整合による最適な非線形光学結晶長の最適化に関しては解析的手法を完成することができた。

##### (3) OPCA システムにおける励起レーザーの先頭強度の安定性向上

###### ① マルチパス方式による励起レーザー光の高効率化

OPCPA レーザーシステムに用いる 532 nm 励起レーザーの効率化を図るため、図 1 に示すようなマルチパス第二高調波発生方式を提案した。波長 1064 nm、繰り返し周波数の 20~70 kHz、パルス幅 13.6~28.6 ns の Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーを厚さ 6 mm の BBO 結晶に照射させることで図 2 示す実験結果を得た。シングルパスの結果と比較すると、ダブルパス第二高調波の出力パワーは最大で 2.7 倍まで増加することが実験で示された。

###### ② 励起レーザーの先頭強度における安定性向上

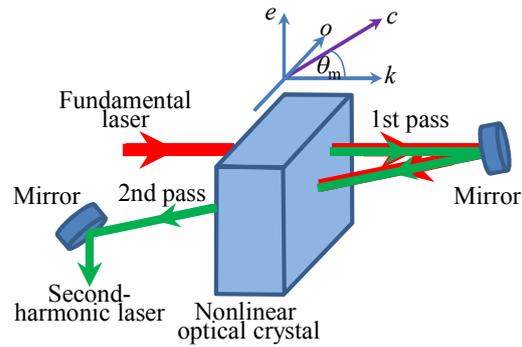


図 1 マルチパス方式を用いた励起レーザーの高効率化

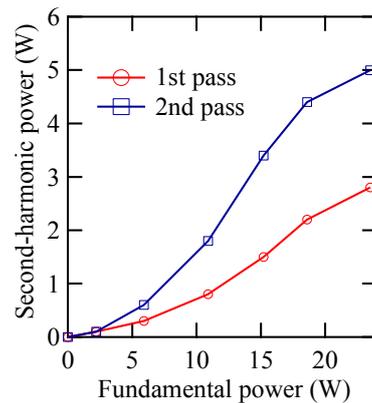


図 2 第二高調波出力パワーの基本波入力パワーに対する依存性

これまでの研究で信号光の増幅結果が励起光のピーク強度の安定性に大きく左右されることから、励起光レーザー強度の安定化は新たな課題として浮上してきた。OPCPAシステムとして非線形光学効果を用いることから、励起光の安定性のためには同じく二次の非線形光学効果の利用が望まれている。このようなニーズに応えるために、本研究は励起光のレーザー光強度の安定化を新たな研究内容として取り入れ、第二高調波発生による励起光の安定化方式を検討した。安定したサイクルパルスレーザー光の発生に必要な技術として、位相不整合を利用したレーザー光の安定化の可能性が明らかになり、それに関する数値計算および実験検証を行った。図 3 に示すように、微小な位相不整合ファクターを第二高調波発生過程に取り入れることによって、基本波レーザーパルスの先頭強度における安定性向上を理論解析で明らかにした。また、実験では、波長 1064 nm、繰り返し周波数 20 kHz、パルス幅 13.6 ns の Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーを厚さ 2 cm の LBO 結晶に照射させ、結晶温度を調整することによって位相不整合状態を発生させた結果、図 4 に示すように基本波レーザーパルスの先頭強度の安定性を 7% から 2% に上げることができた。

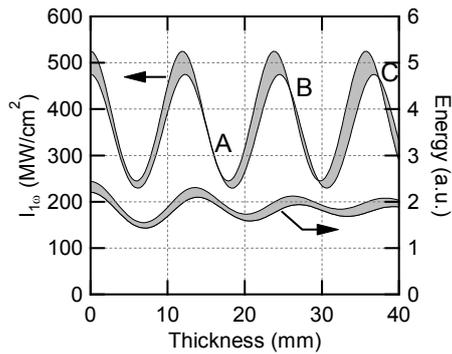


図3 基本波先頭強度における安定性の数値解析結果

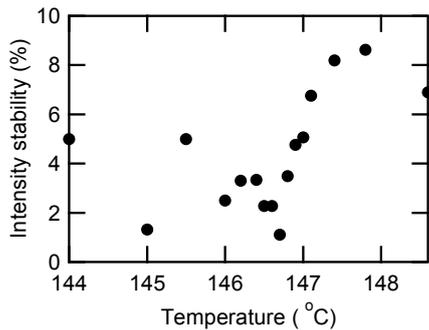


図4 基本波レーザーパルス先頭強度における安定性の実験結果

③特性パラメータ  $\Delta S$  による非線形光学系の最適化

本研究では、非線形波動方程式に関連する特性パラメータ  $\Delta S$  と非線形光学結晶の最適な長さとの解析関係を明らかにし、より簡易な非線形光学結晶の設計法を確立することができた。図5に  $\Delta S$  を用いた結晶長さとの位相不整合角の解析結果及び非線形波動方程式による数値計算結果を示す。これによって二次の非線形光学過程における  $\Delta S$  値を基本波及び第二高調波の飽和区域への評価方法を確立した。

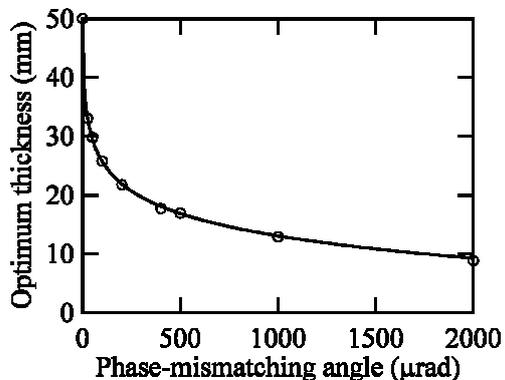


図5  $\Delta S$  を用いた非線形光学結晶の最適化設計

本研究では、搬送波位相安定の初期実験システムの構築ができたが、詳細な実験等を更に遂行する必要がある、今後も関連する実験を進めていきたい。

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5件)

- ① Tetsuo Harimoto, Boku Yo, and Kosuke Uchida: "Compensation for the thermal effect in the second-harmonic generation of a Q-switched nanosecond-kilohertz Nd:YVO<sub>4</sub> laser," Optical Review, Vol. 19, No. 5, 341-344 (2012) (査読有).
- ② Tetsuo Harimoto: "Simple method of designing the thickness of a nonlinear optical crystal of second-harmonic generation under imperfect phase-matching conditions," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.51, No.10, 108001-1-2 (2012) (査読有).
- ③ Tetsuo Harimoto, Boku Yo, and Kosuke Uchida: "Stable fourth-harmonic generation of a Q-switched nanosecond-kilohertz Nd:YVO<sub>4</sub> laser and its application to dicing of silicon wafer," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.51, No.8, 088001-1-2 (2012) (査読有).
- ④ Tetsuo Harimoto and Hidetomo Tsugane: "Peak intensity stabilization of fundamental laser through second-harmonic generation process," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.51, No.8, 088002-1-2 (2012) (査読有).
- ⑤ Tetsuo Harimoto, Boku Yo, and Kosuke Uchida: "A novel multipass scheme for enhancement of second harmonic generation," Opt. Express, Vol.19, No.23, 22692-22697 (2011) (査読有).

[学会発表] (計2件)

- ① 津金英朋、シャリル スライマン、張本鉄雄: "BBO 結晶の温度制御による Q-Switched Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーの第四高調波発生の安定化", 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会、予稿集 DVD、04-171、早稲田大学早稲田キャンパス、早稲田中・高等学校興風館、2012 年 3 月 15 日、講演番号 15a-GP2-6。
- ② 楊牧、内田孝介、張本鉄雄、小佐野美樹、山田耕平、松坂浩志、小松利安、細野高史: "BBO 結晶を用いた Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーの第四高調波の出力

安定化、”第10回レーザー学会東京支部  
研究会、講演予稿集、P-11、p.6、東海大  
学高輪湘南キャンパス、2010年3月3  
日。

## 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