

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」  
平成 19 年度採択研究代表者

宮永 憲明

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心 教授

アダプティブパワーフォトリクスの基盤技術

## 1. 研究実施の概要

本研究では、レーザー光に空間的・時間的光波制御を加味することによって、物質との相互作用、特に非線形相互作用における新しい現象の研究を目指している。そのために、搬送波包絡線位相（光電場振動の絶対位相）を制御した数サイクル（ $\leq 5\text{fs}$ ）超短パルスと  $30\text{TW}$  のピークパワーを  $10\text{Hz}$  の繰り返しで実現するレーザー装置（基幹装置）を開発しつつ、併せて光波の空間的位相・偏光分布制御技術を開発している。

初年度である平成 19 年度は、3 次の非線形効果である自己位相変調を利用した超広帯域光の発生、非同軸光パラメトリック過程を利用した搬送波包絡線位相の安定化技術と超広帯域増幅技術、及び高出力光パラメトリック増幅に必要な励起レーザーの開発を開始した。

結果として、自己位相変調における入射レーザーパルスの条件と 3 次の非線形材料の最適化により、中心波長約  $800\text{nm}$  においてスペクトル幅  $200\sim 270\text{nm}$  の広帯域光を発生させるとともに、その搬送波包絡線位相を自己安定化させることに成功した。広帯域増幅技術では、Nd:ガラスレーザーの 2 倍高調波（波長  $527\text{nm}$ ）励起に適した手法として、中心波長  $800\sim 900\text{nm}$ （帯域幅約  $300\text{nm}$ ）の非同軸光パラメトリックの最適化を行った。これと併せて、中心波長  $1000\sim 1100\text{nm}$  における近縮退非同軸光パラメトリック増幅の最適化を行うとともに、異なる非同軸角の 2 段励起による増幅帯域の拡大（ $400\sim 500\text{nm}$ ）を実証した。高出力光パラメトリック増幅用の励起レーザーについては、パルスエネルギー約  $7\text{J}$ 、繰り返し  $10\text{Hz}$  の半導体レーザー励起 Nd:ガラスレーザーのチャープパルス増幅システムを設計し、部品の設置と光軸調整をほぼ完了した。

平成 20 年度は、Nd:ガラスレーザーのチャープパルス増幅、ピコ秒パルス圧縮及び 2 倍高調波変換の試験を開始し、これを励起源とする大口径（約  $4\text{cm}\times 4\text{cm}$ ）非同軸光パラメトリック増幅の最適化を行い、ピーク出力  $\text{TW}$  の数サイクルレーザーを達成する計画である。

## 2. 研究実施内容

(文中にある参照番号は 4. (1)に対応する)

### 研究目的

平成 19 年度は、搬送波包絡線位相 (光電場振動の絶対位相) を制御した数サイクル ( $\leq 5\text{fs}$ ) 超短パルスと 30TW のピークパワーを 10Hz の繰り返しで実現するレーザー装置 (基幹装置) の開発に注力する。主な内容は次の通りである。

- 1) 数サイクル光の発生と搬送波包絡線位相の安定化 : 3 次の非線形効果である自己位相変調を最適化する。非同軸光パラメトリック過程を利用した自己安定化を採用し、新たな手法を用いて広帯域化を図る。
- 2) 超広帯域増幅技術 : Nd:ガラス及び Yb 系固体レーザーの 2 倍高調波励起の光パラメトリック増幅に関して、帯域幅拡大のための最適を行い、広帯域化の手法を開発する。
- 3) 高出力光パラメトリック増幅 : 励起レーザーとして半導体レーザー励起 Nd:ガラスレーザーのチャープパルス増幅システムを設計し、システム構築を開始する。

また、これらの研究と並行して、以下の研究を進める。

- 4) 光波メトロロジー・アダプティブ制御 : 軸対称偏光とプラズマの相互作用を記述する粒子 (PIC) コードを開発する。
- 5) 光学材料データベース : 多層膜素子のレーザー耐力試験、光学材料の物性値の人為的制御の研究、及び光パラメトリック増幅に用いられる非線形結晶の組成に関する検討に着手する。
- 6) 統合レーザーコード : Nd:ガラスレーザーの広帯域動作の解析を進める。

### 本年度の実施内容

#### 1) 数サイクル光の発生と搬送波包絡線位相の安定化

図 1 に示すように、フェムト秒レーザーパルス励起の白色光 (WLG-1) を信号光として非同軸光パラメトリック (NOPA) を行った際のアイドラー光の搬送波包絡線位相が自己安定することを利用した。アイドラー光のスペクトル角度分散を小さく抑えて、ある種の材料を用いて再度白色光に変換 (WLG-2) することによって、超広帯域と搬送波包絡線位相の安定化を両立させた。WLG-1 の材料 (サファイア結晶) とフェムト秒レーザーの強度の最適化、NOPA におけるアイドラー光発生最適化、WLG-1 の最適材料の選択によって、図 2 に示すような超広帯域 (スペクトル幅 270nm、フーリエ変換限界パルス幅約 4fs) で、図 3 に示すように搬送波包絡線位相が安定な光源を開発した。(これらの成果について論文執筆中)

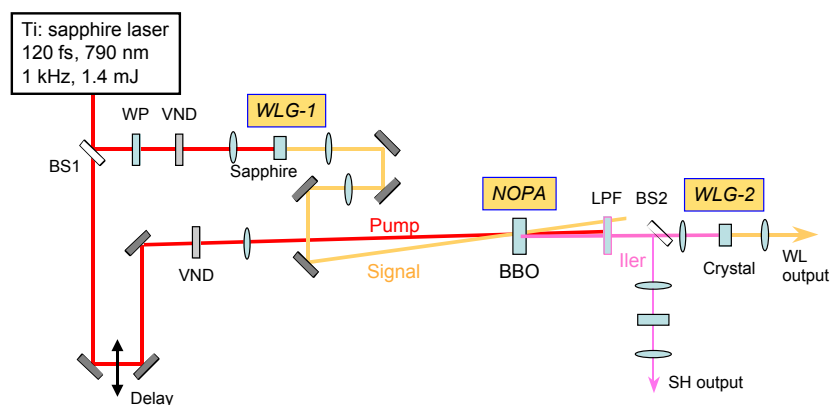


図1 搬送波包絡線位相を安定化した超広帯域光発生の実験配置.

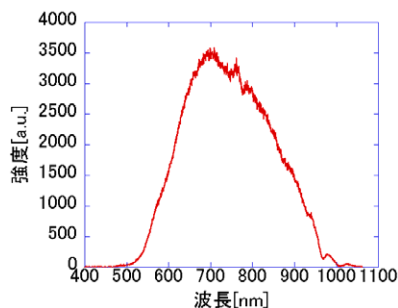


図2 超広帯域白色光のスペクトル.

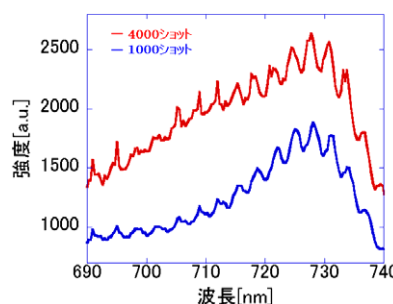


図3 f-2f 干渉による搬送波包絡線位相安定化の確認結果.

## 2) 超広帯域増幅技術

将来の高繰り返し光パラメトリック増幅器の励起光源に必要な高出力・高効率 Yb 添加固体レーザーの開発 (原著論文 1), 2)) と超広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅の予備実験を行った。Yb 添加 LLF レーザー開発では、光パラメトリック増幅器の励起に十分な約 10 mJ の増幅エネルギーを得た。(原著論文 3)) また、超広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅については、Yb 添加 YLF レーザー光の 2 倍高調波光を 2 ビーム用意し、非同軸角度の異なる光パラメトリック増幅器を開発した。信号光としては、フォトニック結晶ファイバーで得られる帯域幅 400 nm 以上の白色光を用いた。50 GW/cm<sup>2</sup> の励起光強度において、中心波長 1 $\mu$ m 帯の近赤外領域において、信号光の増幅波長帯域幅として 350 nm を達成した。(原著論文 4))

## 3) 高出力光パラメトリック増幅

光パラメトリック増幅のための高出力かつ高安定化した励起レーザーの開発を目指して、半導体レーザー励起固体レーザーによる高出力ピコ秒パルス発生及び高効率な波長変換技術の開発研究を行った。高出力ピコ秒パルス発生の研究では、半導体レーザー励起 Nd:ガラスジグザグスラブヘッドを 4 パス前置増幅、4 パス主増幅、合計 8 パスするシステムを設計・構築し、1 パス当たり 7 倍、4 パスで 2444 倍の小信号利得を得た。(原著論文 5)) さらに、

出力 1~2J のナノ秒パルスを一ピコ秒パルス (100ps 以下) まで時間的に圧縮するために、誘電体多層膜回折格子を用いたパルス圧縮器の試作に着手した。高出力波長変換の研究では、高ピークパワー密度の下で光学損傷なく 2 倍高調波変換を行うための最適設計を行い、入力光強度  $30\text{GW}/\text{cm}^2$  (ビームサイズ 4cm 角、エネルギー 3J、パルス幅 10ps)、厚さ 5cm の DKDP 結晶により変換効率 80%以上が可能である事を確認し、2 倍高調波発生器の試作を行った。また、手持ちの CLBO 結晶による波長変換試験のデータにより計算コードの妥当性を確認し、非線形結晶内の発熱と変換効率の関係を評価した。



図 4 高出力光パラメトリック増幅の励起源として開発中のピコ秒ガラスレーザー装置.  
左：チャープパルス発生部。 右：ジグザグスラブヘッドを用いた 8 パス増幅器。

#### 4) 光波メトロロジー・アダプティブ制御

空間的に位相・偏光分布を有するフェムト秒レーザーとプラズマ電子の相互作用を記述可能な PIC コードを開発した。(紙面の都合上、詳細は省略する。)

#### 5) 光学材料データベース

数サイクル高出力レーザーの実現に不可欠な光学素子の高耐力化を研究するために、本年度はピコ秒レーザーを用いた損傷耐力評価装置を整備した。真空中における誘電体多層膜ミラーの損傷閾値に関して、パルス幅 3.6ps と 9.3ns の比較実験を開始し、各々  $35\text{J}/\text{cm}^2$ 、 $2\text{J}/\text{cm}^2$  の値を得た。光学素子の損傷は電子なだれが支配的であることから、損傷閾値はパルス幅の 1/2 乗に比例することが知られている。しかしながら、数ピコ秒以下のパルス幅においては電子なだれを引き起こすまでの時間がないため、1/2 乗則よりも高い値を示すことが確認された。また、損傷の形状に関しては、ナノ秒パルスではより大きな損傷になるのに対して、ピコ秒ではレーザースポット内部に留まっていることが分かった。

光スイッチに用いられる電気光学結晶 DKDP とファラデー素子 TGG 結晶の物性値の温度依存性を計測し、ポッケルスセルとファラデー回転子の大幅な高性能化に関する知見を得た。(論文執筆中) また、ある種の 2 次の非線形結晶に関して、その組成を調整することによって光パラメトリック増幅の広帯域化が可能であることに着目し、組成の最適化と基

礎実験に着手した。

#### 6) 統合レーザーコード

Nd:ガラスレーザーの広帯域動作の解析ならびにピコ秒2倍高調波変換のためのコードを整備した。(紙面の都合上、詳細は省略する。)

#### まとめ

基幹装置に関しては、主要部品の設置が順調に進み、平成20年にはピーク出力TWの数サイクルレーザーの試験に入ることができる見通しを得た。その他、光波の空間的制御、材料データベース、レーザーコードの研究も順調に立ち上がってきており、今後アダプティブパワーフォトリニクス(PLD)の基盤技術としてまとめ上げていきたい。

### 3. 研究実施体制

#### (1) 宮永グループ(大阪大学レーザーエネルギー学研究中心)

①研究分担グループ長: 宮永 憲明(大阪大学、教授)

##### ②研究項目

- 1) 基幹装置技術の開発(超広帯域種光技術の開発と基幹装置の構築)
- 2) 光波メトロロジー・アダプティブ制御
- 3) 光学材料データベースと統合レーザーコード

#### (2) 山川グループ(日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門)

①研究分担グループ長: 山川 考一((独)日本原子力研究開発機構、研究主幹)

##### ②研究項目

- 1) 超広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅・パルス圧縮技術の開発
- 2) 多層膜素子の分散評価

#### (3) 川嶋グループ(浜松ホトニクス(株))

①研究分担グループ長: 川嶋 利幸(浜松ホトニクス(株)、主任部員)

##### ②研究項目

- ・高出力ピコ秒パルス技術、高効率波長変換技術、及び高出力化・安定化技術

#### (4) 藤田グループ((財)レーザー技術総合研究所)

①研究分担グループ長: 藤田 雅之((財)レーザー技術総合研究所、主任研究員)

##### ②研究項目

- ・多層膜素子と光学材料の高耐力化のためのデータ蓄積

#### 4. 研究成果の発表等

##### (1) 論文発表(原著論文)

- 1) T. 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," *Optics Express*, vol. 15, pp. 15438-15443 (2007).
- 2) T. 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," *Optics Express*, vol. 15, pp. 17529-17535 (2007).
- 3) Y. Akahane, M. Aoyama, A. Sugiyama, R. Kubo, K. Ogawa, K. Tsuji and K. Yamakawa "High-energy diode-pumped picosecond regenerative amplification at 999 nm in wavelength with a cryogenically cooled LuLiF<sub>4</sub> crystal," *Optics Letters*, vol. 33, pp. 494-496 (2008).
- 4) K. Ogawa, M. Aoyama, Y. Akahane, K. Tsuji, J. Kawanaka, T. Harimoto, H. Nishioka, M. Fujita, and K. Yamakawa, "Bandwidth Enhancement of Optical Parametric Chirped Pulse Amplification by Temporally Delayed Two Pump Beams," *Japanese Journal of Applied Physics*, in press.
- 5) T. Kurita, T. Sekine, O. Matsumoto, T. Kawashima, K. Sueda, J. Kawanaka, N. Miyanaga, K. Yamakawa, and M. Fujita, "Chirped pulse amplification of high-energy diode-pumped zig-zag slab laser", in review, (to published in *Proceedings of APLS 2008*).