

宮永憲明

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・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

超短パルスレーザーは多様な科学技術・学術及び産業分野に極めて有用であることから、近年急速に進歩している。本研究では、半導体レーザー励起の高出力固体レーザー(DPSSL)による非同軸光パラメトリックチャープパルス増幅(noncollinear OPCPA: NOPCPA)と超短パルスの分散補償、搬送波包絡線位相(CEP)制御といった精密制御を組み合わせることによって、世界最高レベルの数サイクルレーザー(ピーク出力:~30TW、パルス幅:~5fs、繰り返し周波数:10Hz)を実現することを最大の目標としている。そのために、CEP安定化種光源、OPA励起源の安定化のための光ファイバーフロントエンドと増幅器、パルス出力~5JのNd:ガラスDPSSLとその2倍高調波変換、大口径NOPCPA、および高出力パラメトリック増幅における分散計測・補償とCEP安定化・制御の技術開発を行い、それらのシステム化に取り組んでいる。これらの主要技術の開発はほぼ完成しつつあり、システム全体を組み上げて試験に入る段階である。今後は、利用研究に供しながら数サイクルレーザーの出力を向上させるとともに、時間的・空間的位相制御や偏光分布制御技術を取り入れ、アダプティブな制御機能を有するパワーフォトリクスの基盤技術をまとめ上げる計画である。

## §2. 研究実施体制

### (1) 宮永グループ

- ① 研究分担グループ長: 宮永憲明 (大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、教授)
- ② 研究項目
  - ・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)
  - ・光波メトロロジー・アダプティブ制御

## (2) 山川グループ

① 研究分担グループ長: 山川考一 (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)

### ② 研究項目

- ・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
- ・多層膜素子の分散評価

## (3) 川嶋グループ

① 研究分担グループ長: 川嶋利幸 (浜松ホトニクス (株) 開発本部、グループ長代理)

### 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

## (3) 藤田グループ

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、主席研究員)

### 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

## §3. 研究実施内容

### 3.1 研究の概要

開発している装置の詳細構成と基本仕様を図 1 に示す。現状のフロントエンドは、① CEP 安定化数サイクルレーザー、② 帯域幅 10nm で動作する偏波保存単一モードファイバーCPA (パルス幅 2.5ns)、③-1 偏波保存 30 $\mu$ m LMA ファイバーCPA と 100 $\mu$ m コアの偏波保存フォトニック結晶ファイバーCPA (パルス幅 2.5ns、繰り返し 10kHz)、パルス圧縮・2倍高調波変換器 (SHG)、及び ③-2 偏波保存 30 $\mu$ m LMA ファイバーCPA と 70 $\mu$ m コアの偏波保存フォトニック結晶ファイバーCPA (パルス幅 7.5ns、繰り返し 10kHz または 10Hz) から構成している。パルス伸長器はともに Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG) である。

④の CPA DPSSL の増幅器ヘッドは Nd:ガラスジグザグスラブであり、像転送型の多重パス光路と能動波面補正によって高出力を可能とした。最大パルスエネルギー5J、パルス幅~3.5ns のチャープパルスは誘電体多層膜回折格子を用いたダブルパス光路のパルス圧縮器で 50ps に圧縮された後に DKDP (最大ビームサイズ 4cm $\times$ 4cm) で2倍高調波変換され、分岐して NOPCPA 主増幅器に導く。⑤の NOPCPA では、負分散チャープミラーによるパルス伸長 (150fs) をした後に NOPCPA 前置増幅器で 50 $\mu$ J 程度まで増幅され、さらに負分散素子 (回折格子とプリズムを組み合わせたもの、あるいはそれ

らを一体化した Grism 対) で 30ps にパルス伸長して分散・CEP 制御器 (DAZZLER 又は MIIPS) に導く。その出力は NOPCPA 主増幅器で >200mJ に増幅された後、正分散のガラスブロックによってパルス圧縮される。圧縮パルスの高次分散特性は SPIDER によって計測し、CEP ドリフトは f-2f 干渉計によって計測し、それらのデータを分散・CEP 制御器にフィードバックする。

上記の基幹装置開発と併行して、⑥ OPCPA の帯域幅向上技術や分散補正技術、及び ⑦ 誘電体多層膜の高耐力化と光学材料の高性能化に向けたデータベースづくりを行い、基幹装置の性能向上に資する。また、基幹装置の出力部には空間的位相・偏光制御可能な素子を挿入し、超短パルスとプラズマの相互作用において新たな現象の研究に役立てることを目指している。

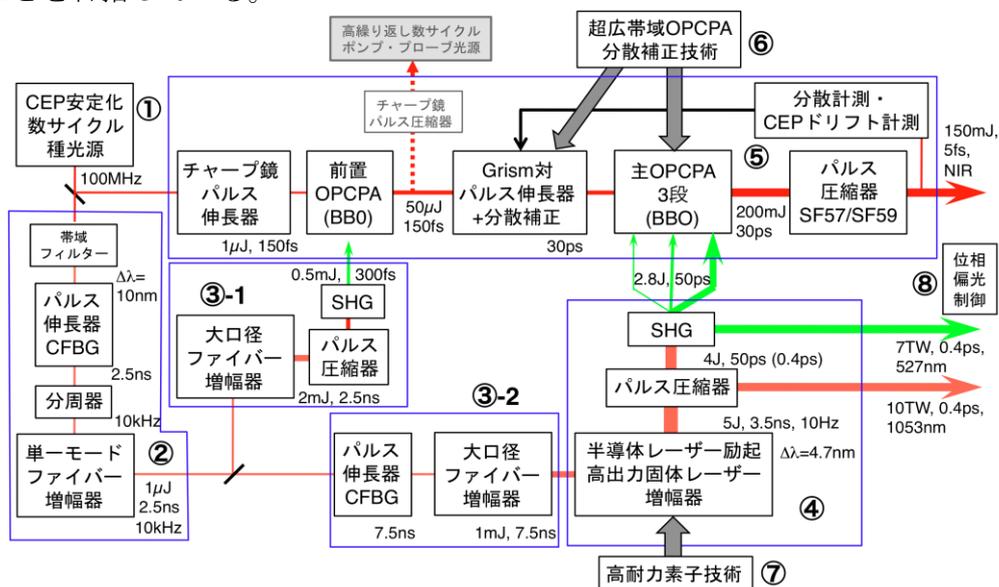


図 1 開発中の装置の詳細構成ブロック図 (上) と写真 (下、手前が CPA DPSSL、奥がファイバーレーザーと OPCPA 部)。

### 3.2 平成 22 年度の研究成果の概要

a) CEP 安定化 Ti:サファイアレーザー発振器 (図 1 ①、宮永グループ)

本システムに用いた発振器は、1 オクターブのスペクトル幅や数サイクルのパルス幅といった特徴(図 2)の他に、CEP 安定化の機能を付加した。従来の CEP 安定化発振器では、搬送波包絡線オフセット周波数( $f_{ceo}$ )がゼロで無かったために CEP の周期的変動が避けられず、全く同じ条件の CEP で実験を行うにはパルスピッキングや増幅タイミングの調整等の複雑な行程が必要であった。これに対して、本研究では発振器周波数を 80MHz から 100MHz に変更し、さらにロック方式を改良することで  $f_{ceo}$  をゼロにすることにより、パルス列全てにおいて同一の CEP とするよう改良した(図 3)。

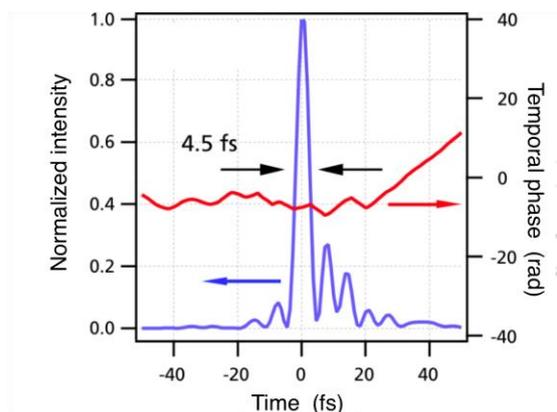


図 2 パルス相関波形と位相分布.

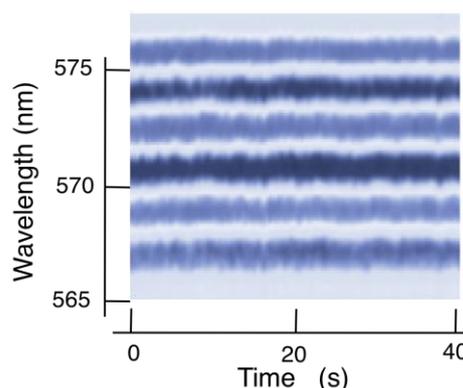


図 3 CEP の安定性及び制御性のデータ.

## b) NOPCPA 増幅器励起用レーザーの LD 励起ファイバー増幅部の開発

(図 1 ②, ③、宮永グループ、川嶋グループ)

NOPCPA 励起光の種光として切り出された光( $\lambda_c=1053\text{nm}$ 、 $\Delta\lambda=10\text{nm}$ )は、パルス伸張器(チャープドファイバーブラッググレーティング:CFBG)により 2.5ns まで伸張され、次に 1パルスあたりのエネルギーを増やすために、パルスピッカーにより繰り返し周波数が 100MHz から 10kHz まで分周された後、数段の単一モードファイバーにより自然放射増幅(ASE)光の除去を行うと同時に  $1\mu\text{J}$ まで増幅を行った。増幅された光をファイバー分波器(1:1)で分け、一方を大口径ファイバー増幅器(偏波保持型 Yb 添加 LMA ファイバー(コア径  $30\mu\text{m}$ )とフォトニック結晶ロッド型ファイバー(コア径  $70\mu\text{m}$ )で構成)により増幅して(図1、③-2、目標 1mJ)、半導体レーザー励起固体レーザー部(図1、④)へ入力する。もう一方は、同じく Yb 添加 LMA ファイバー(コア径  $30\mu\text{m}$ )とフォトニック結晶ロッド型ファイバー(コア径  $100\mu\text{m}$ )で構成される増幅器(図1、③-1、目標 1mJ)を通った後、回折格子によるパルス圧縮(300fs)と BBO 結晶による波長変換を行って、NOPCPA(図1、⑤)の前増幅の励起レーザーとして供される。

図1、③-2の系統では、高出力レーザー光による固体増幅器の損傷を防ぐために、CFBGの追加により 7.5ns までのパルス伸張を行った。現状で  $\sim 0.2\text{mJ}$ までの増幅試験が完了しており、LMA ファイバーの設計利得( $>100$ )ロッド型ファイバーの設計利得( $>10$ )を達成した。外観写真を図 4 に、 $70\mu\text{m}$  コアロッド型ファイバーの出力特性(入射パルスエネルギー:  $0.05, 0.1\mu\text{J}$ )を図 5 に示す。

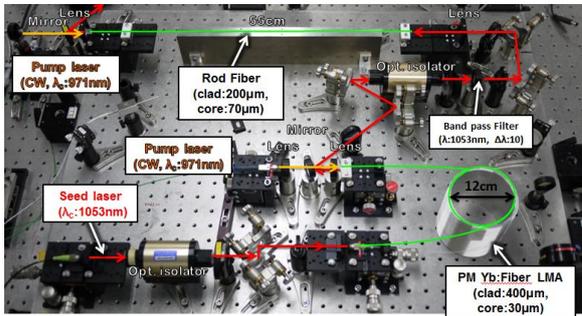


図 4 大口径ファイバー増幅器の外観。

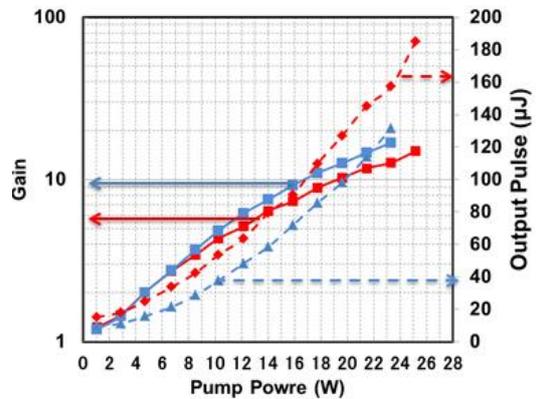


図 5 70μm コアファイバーの増幅特性。

また、ファイバーレーザーの最大の利点である安定性と高ビーム品質について評価した。図 6 に示すように、10 分間運転におけるフォトニック結晶型ロッド型ファイバーの出力変動は 3.1% p-V、0.6% rms と安定しており、市販 YAG レーザー励起の OPA (出力変動: 19.1% RMS) に比べて 30 倍以上の安定性改善が得られた。また、ロッドファイバーの出力パターンは入射カップラの精密調整によってモードフィールドを反映した良好な状態を保持できることを確認した。

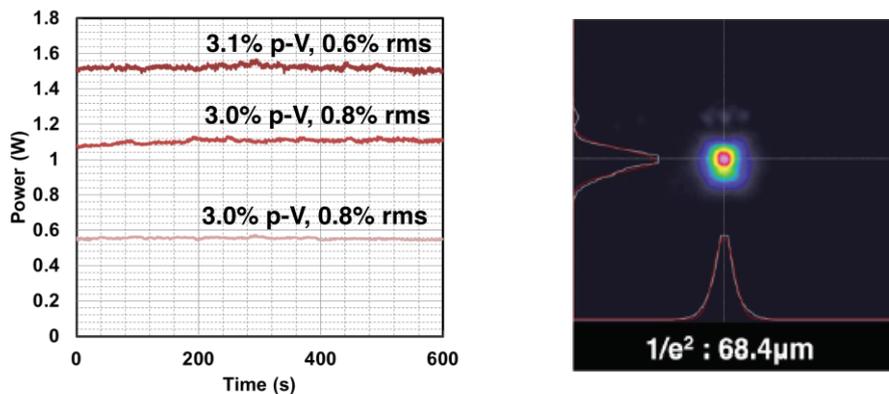


図 6 70μm ロッドファイバー出力の時間変動(左)と出力パターン(右)。

図1、③-2 の系統のLMAとロッドファイバー増幅器の外観写真をそれぞれ図 7 に示す。LMA とロッドファイバーの励起には、ASE発生抑制と熱による不安定性の改善を目的として、パルス動作による励起を行った。励起光繰り返し周波数 1kHz (duty15%)、10kHz (duty50%)、2つのモードで励起を行った場合の増幅特性を図 8 に示す。いずれのモードにおいても、パルス励起によるASE発生低下ともない利得損失が低減されており、高利得を实

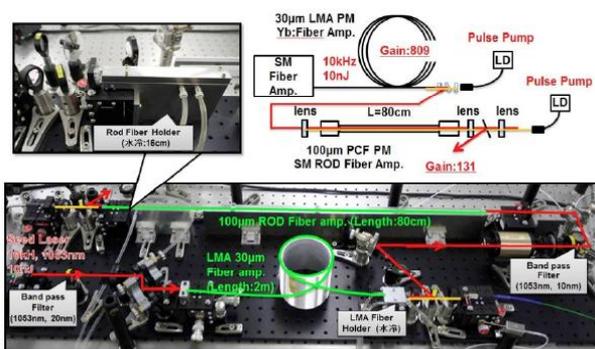


図7 大口径ファイバー(100 $\mu$ m)増幅器の外観.

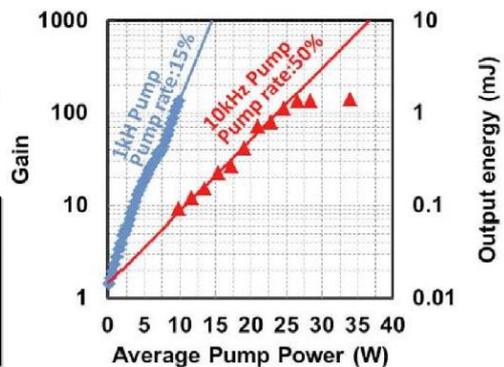


図8 100 $\mu$ m コアファイバーの増幅特性.

現しているため、目標である2mJを達成した。また、パルス励起による安定性改善についても評価を行った。ロッド型ファイバーの出力変動は 2.6% p-V、0.4% rms と前述のCW励起(70 $\mu$ m ロッドファイバー)に比べて安定性が向上しており、パルス励起により出力の不安定性が改善されることを確認した。

### c) OPCPA 主増幅器用ピコ秒パルス発生と2倍高調波変換(図1④、川嶋グループ)

図9に大口径回折格子によるパルス圧縮器とパルス圧縮後の時間波形を示す。回折格1と2の寸法はそれぞれ、420mm $\times$ 210mm、140mm $\times$ 120mm、溝本数1740本/mmである。パルス圧縮率は2枚の回折格子の間隔を調整することにより調整している。2nsのチャープパルス光を圧縮した後、オートコリレーターにより時間波形の測定を行った結果、1.9ps(FWHM)のパルス幅が得られた。OPCPAの主増幅器(図1⑤)では約50psの励起パルス幅を想定しているため十分な性能を有している。

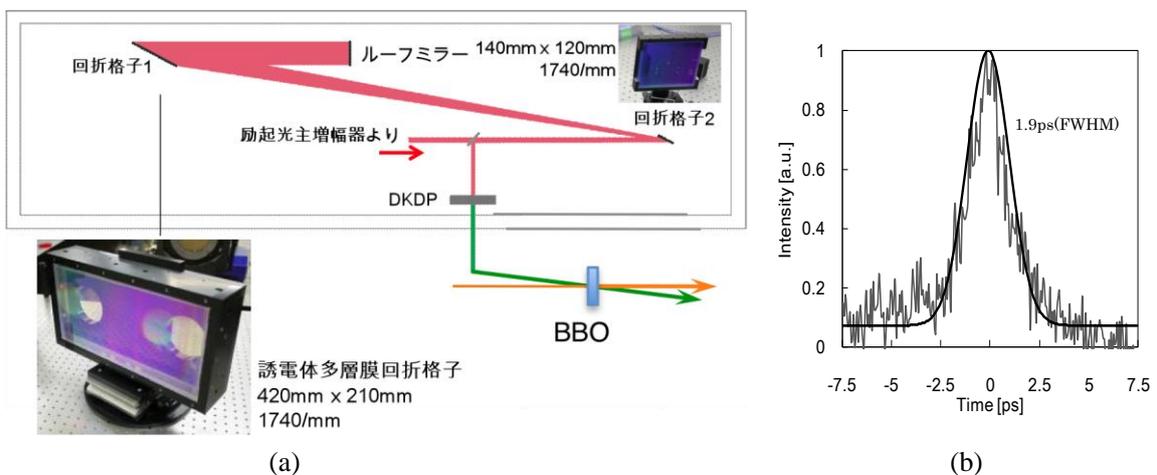


図9 大口径誘電体多層膜回折格子によるピコ秒パルス発生.

(a)パルス圧縮器の配置図、(b)パルス圧縮後の時間波形.

2倍高調波変換に関しては、入力光帯域幅を考慮した計算を行い、帯域 4nm(FWHM)の場合の変換効率は44%、同 3nmの場合は50%以上の効率が見込まれることを明らかにした。今後、誘電体多層膜回折格子からのピコ秒パルスによる波長変換試験を実施する。

#### d) 分散補正技術の開発(図1⑥、山川グループ)

超広帯域パラメトリック増幅光の位相計測とその制御を行うことを目的に、まずは昨年度整備した位相計測装置を用いてシグナル光、ポンプ光およびアイドラー光の位相計測を行い、ポンプ光位相がシグナル光およびアイドラー光の位相に及ぼす影響を明らかにした。これにより、ポンプ光の位相を適切に制御することにより、超広帯域パラメトリック増幅光の位相制御が可能であることが明らかになった。(原著論文5)

またパラメトリック増幅光の高エネルギー化を目指し、Yb:YLF ポンプレーザーを高出力化に対応した共振器構成に再設計し、増幅試験を行った。その結果、図10に示すようにLD励起パワー582W時に107mJ(平均出力1.07W)の出力エネルギーが得られた。今回得られた出力はチャープパルス再生増幅器単体では世界最高出力である。

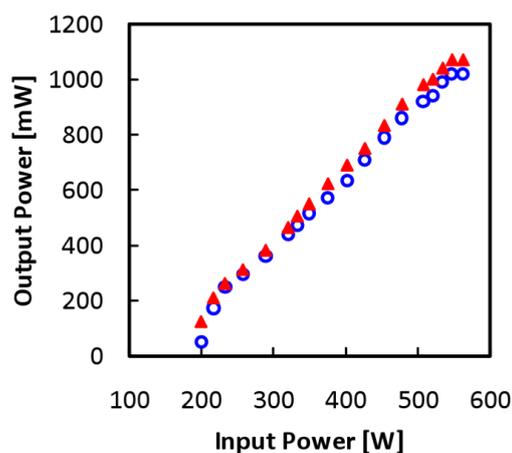


図10 低温冷却型 Yb:YLF 再生増幅器の入出力特性。○印はQ-switch動作、▲印は seeding動作時。

#### e) 誘電体多層膜ミラーと回折格子のピコ秒レーザー損傷(図1⑦、藤田グループ)

ピコ秒レーザー装置を用いて、誘電体多層膜ミラーおよび誘電体多層膜回折格子のレーザー損傷閾値を比較評価した。誘電体多層膜ミラーは、波長 1053nm のレーザー光に対して入射角度 72°で反射率 99.9%以上を持ち、誘電体多層膜回折格子は 1053nm に対して入射角度 72°で 98%以上の回折効率を持つ。比較のために、10ns のナノ秒レーザーによる損傷閾値と合わせて、図11にまとめた。10ns パルスの時のミラーのレーザー損傷閾値は 16J/cm<sup>2</sup>、回折格子の損傷閾値は 8.9J/cm<sup>2</sup>となった。回折格子は、誘電体多層膜層の最表層に格子構造が形成されている。その格子構造部に光が集中するため、格子構造を持たないミラーに比べて損傷閾値が低くなった。一方、2ps パルスの場合のミラーおよび回折格子の損傷閾値は、それぞれ 4.4J/cm<sup>2</sup>と 4.1J/cm<sup>2</sup>と求められ、僅かな差であることが判った。この結果、回折格子においても、これまでのミラーの場合と同様に、ナノ秒とピコ秒では損傷機構が異なり、比較的高い損傷閾値が得られるものと考えられることができる。(原著論文3)

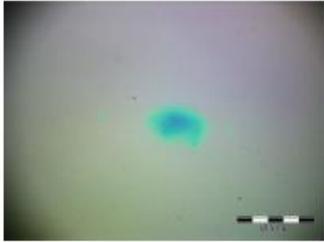
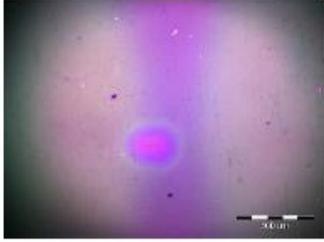
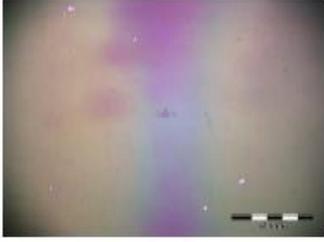
パルス幅	10 ns	2 ps
<b>誘電体多層膜ミラー</b> R>99.9% $\lambda = 1053\text{nm}$ AOI=72°	 DT: 16 J/cm <sup>2</sup> I = 17 J/cm <sup>2</sup>	 DT: 4.4 J/cm <sup>2</sup> I = 5.4 J/cm <sup>2</sup>
<b>誘電体多層膜回折格子</b> $\eta > 98.0\%$ $\lambda = 1053\text{nm}$ AOI=72°	 DT: 8.9 J/cm <sup>2</sup> I = 11 J/cm <sup>2</sup>	 DT: 4.1 J/cm <sup>2</sup> I = 6.4 J/cm <sup>2</sup>

図 11 誘電体多層膜ミラーと誘電体回折格子の損傷閾値と損傷形状

## §4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ●論文詳細情報

1. T. Kurita, K. Sueda, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga, “Experimental demonstration of spatially coherent beam combining using optical parametric amplification”, *Optics Express*, Vol. 18 Issue 14, p.14541 (2010). doi:10.1364/OE.18.014541
2. 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)*, Vol. 79, No. 6, p. 517 (2010).
3. 三上勝大, 本越伸二, 藤田雅之, 實野孝久, 河仲準二, 安原亮, “石英バルク材料のレーザー内部損傷しきい値”, *レーザー研究*, Vol.38, p.458 (2010).
4. 三上勝大, 本越伸二, 藤田雅之, 實野孝久, 高井正憲, 幸原健二, 堀越秀春, “紫外レーザー照射に対する石英材料内部損傷しきい値の温度依存性”, *レーザー研究*, Vol.38, p.620 (2010).
5. 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*, vol.38, No.10, p.779, (2010).

#### (4-2)知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 2 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 4 件)