

「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

全体計画概要

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(≤5fs)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)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。

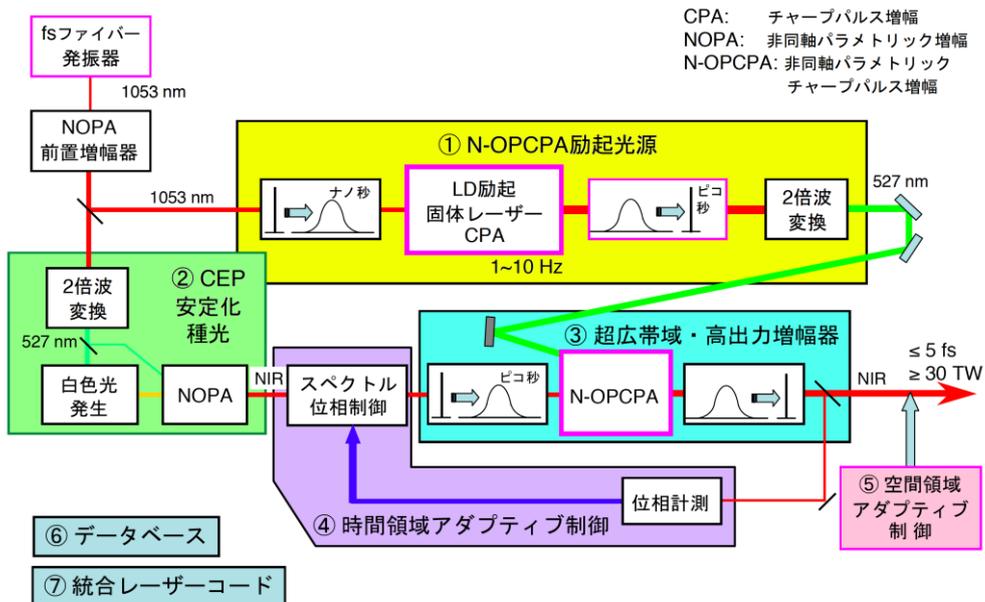


図1 基幹装置(数サイクル高出力レーザー)構成のブロック図.

平成 21 年度実施の概要

- ① 非同軸光パラメトリックチャープパルス(N-OPCPA)増幅の励起源開発
半導体レーザー(LD)励起チャープパルス増幅固体レーザーについて、昨年度の成果(1J/パルス)に基づき、さらなる高出化とファイバーフロントエンドの構築による安定化を図った。
- ② 搬送波包絡線位相(CEP)安定化種光の開発
光パラメトリック増幅におけるアイトラー光を活用した CEP 安定化光源の手法は昨年度までにほぼ修了しており、非同軸光パラメトリック増幅(N-OPCPA)システムに導入する際の課題を検討した。
- ③ 超広帯域・高出力増幅器
多段 N-OPCPA の前置増幅試験に着手するとともに、増幅された超広帯域光のスペクトル位相(分散)を簡便に計測する手法を取り入れた。
- ④ 時間的アダプティブ制御
基幹装置に組み込む分散評価・制御のための MIIPS (Multiphoton Interpulse Interference Phase Scan) 計測光学系を構築し、その特性を評価するとともに、負の群遅延分散を有する分散補正素子の性能評価を開始した。
- ⑤ 空間的アダプティブ制御
軸対称偏光数サイクルレーザー発生のための素子設計とそれを用いたレーザープラズマ相互作用の粒子コード計算を開始した。
- ⑥ データベース
バルク材料のレーザー損傷閾値の温度依存性を計測するとともに、シリカ/ハフニア積層の誘電体多層膜素子のピコ秒レーザー耐力を評価した。
- ⑦ 統合レーザーコード
空間的に位相偏光分布を有する数サイクルレーザーパルスとプラズマの相互作用を記述できる粒子コードを開発するとともに、ビーム制御素子の設計コードとの連結を図った。

§ 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、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

- 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、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

①研究分担グループ長:川嶋 利幸(浜松ホトニクス株式会社、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

①研究分担グループ長:藤田 雅之(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

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は (4-1) に対応する)

① 非同軸光パラメトリックチャープパルス(N-OPCPA)増幅の励起源開発

昨年度までに、NOPA の励起光源として半導体レーザー(LD)励起チャープパルス増幅(CPA)Nd:ガラスレーザーでは、ピコ秒パルス化に必要なスペクトル幅(4nm)において1J/パルスの出力までを実証するとともに、2倍高調波変換実験(入射パワー密度:10ps パルス換算で6GW/cm²)を行い、非線形結晶の損傷無しに変換効率>50%を達成した。

今年度は、ファイバーフロントエンドの開発によるシステムの安定化、LD励起 CPA Nd:ガラスレーザーの出力向上、及び2倍高調波変換効率の向上を目指した。

ファイバーフロントエンド LD励起 large mode area Yb 添加偏波保存ファイバー増幅器(図1(a))を構成し中心波長1053nmにおいて1段増幅で1nJ/パルス、2段増幅で48nJ/パルスまでの増幅を実証した(図1(b))。この成果を社会還元するために、>1mJ/パルス、繰り返し10~1,000Hz、M²<1.5の1ミクロン帯のファイバー増幅システムを試作した(詳細は⑧に述べる)。

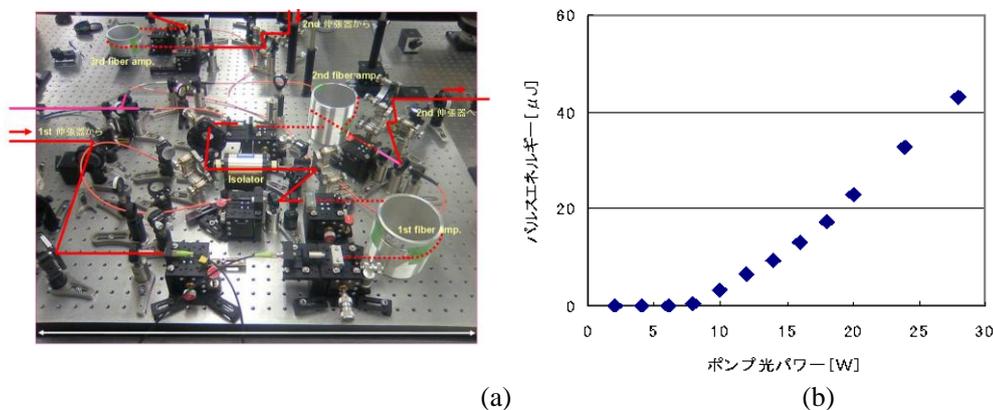


図 1. (a)多段ファイバー増幅試験の光学系(ファイバーはアルミの円筒に巻かれている)
(b)ファイバー増幅器2段目増幅特性

LD 励起 CPA Nd:ガラスレーザー 増幅器中でのレーザー損傷を回避するためにチャープパルス幅を 1.4ns から 2.7ns に広げて 8 パス増幅試験を行った。結果を図 2 に示すように、スペクトル幅 3.7nm、出力エネルギー2.38J/パルスを達成し、ともに理論と良く一致した。これらの値は、NOPA 励起用の繰り返しレーザーとして世界最高であり、将来パルス幅をさらに伸長することにより>5J/パルスまでも視野に入る。これまで蓄積してきた基盤技術を統合して、N-OPCPA の励起光として供給するために、パルス圧縮器及び 2 倍高調波変換器による励起レーザーシステムを構築中である。

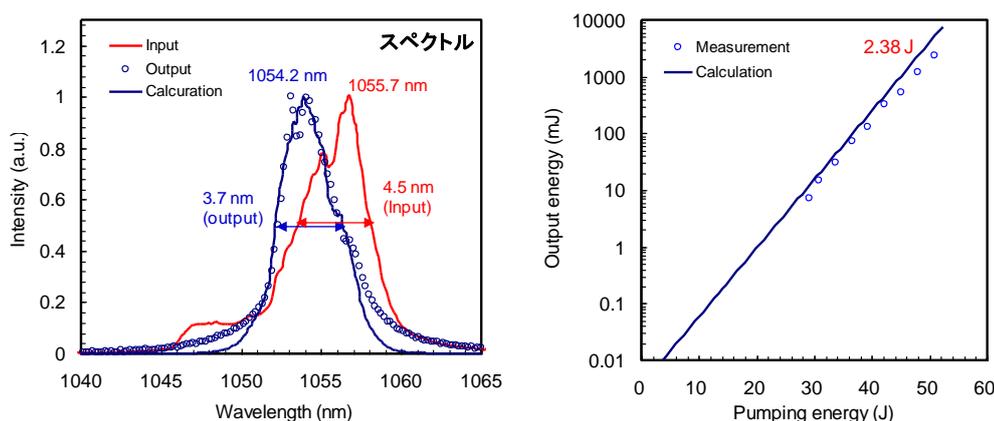


図 2. LD 励起 Nd:ガラス増幅器によるチャープパルス増幅特性

左: 入出力スペクトル、右: LD 励起に対する出力エネルギー特性

2 倍高調変換の性能向上 >1J/パルスの繰り返し動作レーザーによって波長変換試験を行った。最大設計熱負荷の約 6 割に当たる条件で CLBO 結晶を用いた結果、56.3%の高い変換効率を得た。この結果に基づき DKDP を用いたときのシミュレーションを行い、80%以上の変換効率が見込める見込みを得た。これらの知見を基にして、DKDP 結晶を用いた広帯域波長変換試験を開始した。

② 搬送波包絡線位相 (CEP) 安定化種光の開発

新たに YAG 結晶を用いた白色光種光源の超広帯域化と光パラメトリック増幅におけるアイドラー光を活用した CEP 安定化については昨年度までに一応完了しており、基幹装置に導入する場合の課題について検討を行った。

③ 超広帯域・高出力増幅器

昨年度までに、①のレーザーで励起する場合、結晶の損傷閾値以下で 300nm 以上のスペクトル帯域と 150mJ/パルスの出力を同時達成するための 3 段 N-OPCPA を設計するとともに、より大口径化が可能な LBO を結晶を用いた試験では>200nm の増幅帯域(2 軸性の結晶では最大)を実証した。

今年度は 3 段 N-NOPA の試験を行うとともに、増幅光の位相計測を簡便に行うための周波数シェアリング干渉の開発と高繰り返し Yb:YLF レーザー励起 N-OPCPA の高輝度化(Yb:YLF レーザー出力を 20mJ から 50mJ へと増強)を行った。さらに、N-OPCPA の飽和過程を含めた近似

解析を導き、複雑な数値解析モデルを必要とせずに簡便に N-OPCPA の最適設計ができるように整備した。

多段 N-OPCPA 試験 数サイクルに対応するスペクトル幅を有するパルスをTWの出力まで増幅するには、前置増幅と主増幅が必要となる。本年度は前置増幅器の開発を進め、BBO 結晶を用いた3段 N-OPCPA で30,000 倍の利得を得た。図 3(a)に増幅後のスペクトル、図 3(b)にパルス幅を示す。パルス圧縮を行った結果、増幅後 8fs を達成した。

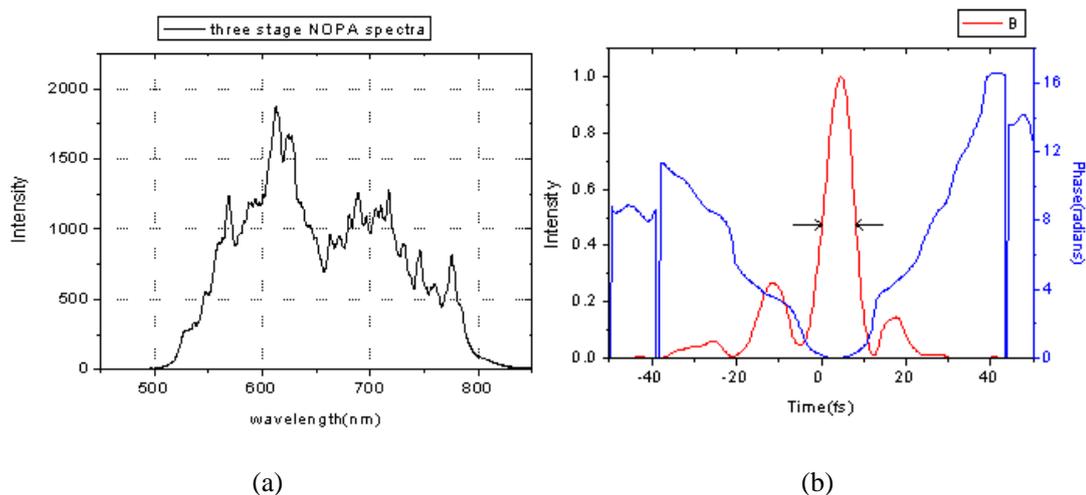


図 3. BBO 結晶による 3 段 N-OPCPA 出力のスペクトル(a)とパルス幅(b)

周波数シェアリング干渉計 N-OPCPA 出力光のスペクトル位相を測定するために、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光学系(図4の左)を構築した。図4の右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。図から明らかなように、3次の分散が大きく影響していることが明らかとなった。

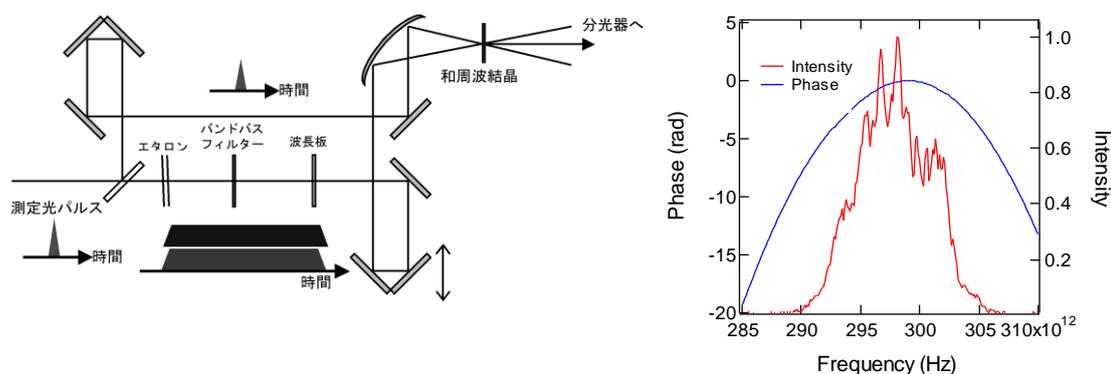


図 4. 周波数シェアリング干渉計(左)と OPCA 増幅光のスペクトル位相データ(右)

④ 時間的アダプティブ制御

昨年度までに、数サイクルパルスに必要な 300nm 以上のスペクトル幅に適用可能な分散計測・制御のために、MIIPS (Multiphoton Interpulse Interference Phase Scan) 計測系(図5の左)を整備し、今年度はこの手法の検証ならびに材料分散補正用のチャープミラー(負の群遅延分散)の特性を評価した(図5の右)。

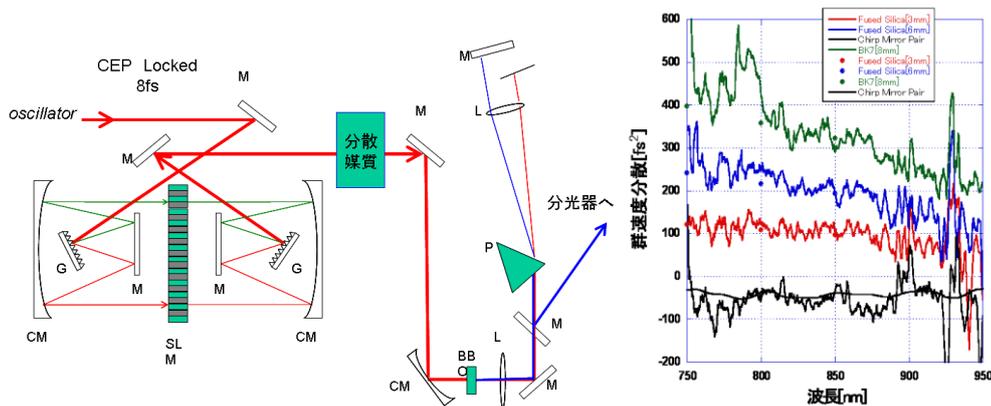


図5. MIIPSの装置構成(左)と厚さの異なるBK7ガラス(緑、青、赤)及びチャープミラー(黒)の群遅延分散. チャープミラーのデータ上に重ねた実線は設計値.

⑤ 空間的アダプティブ制御

軸対称偏光数サイクルレーザー発生に必要な素子を設計するために、大型計算機を用いたシミュレーションを開始した。新たに開発したコードを用いることで、素子の設計と同時にその素子を用いたプラズマ相互作用実験を粒子シミュレーションすることが可能となった。図6に数サイクルレーザーを希薄プラズマに照射したバブル発生とその伝搬を示す。数サイクルの高強度レーザーを用いたバブル電子加速によって、高エネルギーの準単色成分が現れることが分かる。

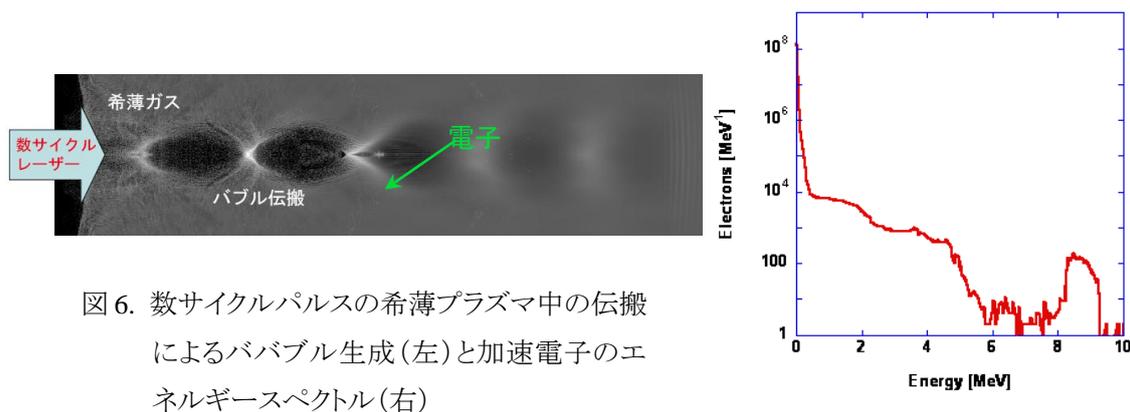


図6. 数サイクルパルスの希薄プラズマ中の伝搬によるバブル生成(左)と加速電子のエネルギースペクトル(右)

⑥ データベース

昨年度までに、ピコ秒パルスレーザーによる損傷の閾値エネルギー密度は、ナノ秒パルスによる電子雪崩破壊のモデル値比べて数倍以上高くなることが確認された。

光学材料は温度の低下に伴い熱伝導率が向上する。従って、今年度は光学素子のレーザー

損傷の温度依存性を評価した。測定試料には均一性の高い石英ガラス材料(合成、熔融)を用い、真空容器内に設置して液体窒素とヒーターにより 123~473K の範囲で温度制御した。照射レーザーには、パルス幅 4ns の Nd:YAG レーザーの基本波(ω : 1064nm)と 3 倍高調波(3 ω : 355nm)を用いた。石英材料は、真空容器内に設置し、液体窒素とプレートヒータにより、123 K~473 K に亘り温度制御を行いながら、レーザー光を試料内部に集光照射した。結果として、石英ガラスの種類に関わらず、電子雪崩が支配的な近赤外光と多光子吸収過程が支配的な紫外光ともに、材料温度が下がるに従い損傷閾値は高くなることが分かった(図 7(a))。

同様の方法で、石英基板上に製膜された SiO₂ 膜のレーザー損傷閾値の温度依存性を評価した(図 7(b))。薄膜との境界面や、欠陥、応力などの違いがあるにも関わらず、ガラス内部の損傷閾値の温度依存性(図 7(a))と同様に傾向を示した。結果、低温条件で稼働するレーザー装置では、より高い出力での動作が可能であると考えられる。

また、HfO₂/SiO₂ で積層された多層膜光学素子について、波長 1053 nm、パルス幅 3ps のレーザーによる損傷閾値を評価した。回折格子については、2.2~4.5J/cm²、ミラーでは 3.3~6.3 J/cm²の結果を示し、またこの値は大気中と真空中でほぼ同じであることが確認された。

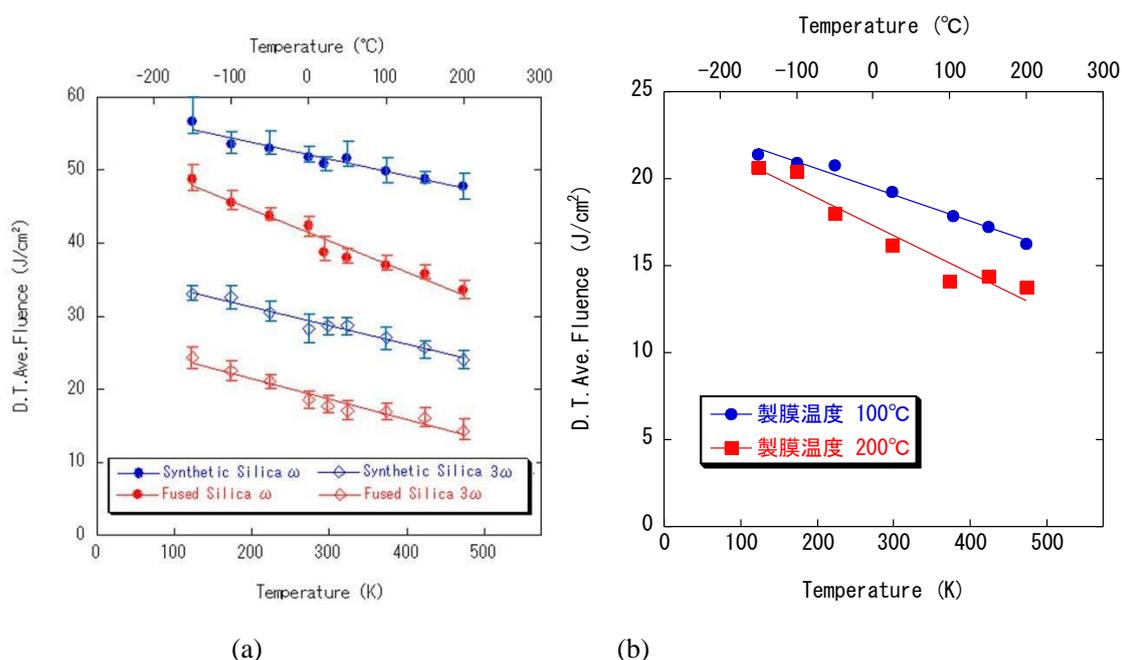


図 7. ガラス内部(a)と SiO₂ 膜(b)のレーザー損傷閾値の温度依存性

⑦ 統合レーザーコード

昨年度までに 2 倍高調波変換や非同軸パラメトリック増幅に関する計算機コードを整備し、今年度は⑤に述べた粒子コードなどを開発した。

⑧ 高出力ファイバーレーザーの実用化(平成 21 年度研究成果の社会還元)

本CRESTでの開発成果を発展させて企業にてシステム化することによって、高安定・高パルス出力のファイバーレーザーを実現した。これにより、本研究における基幹装置のLD励起CPA Nd:ガラスレーザーにおいて、従来の光パラメトリック増幅(OPCPA)部を本装置で置きかえることができ、高い出力安定性を得られる見通しである。本装置は、シングルモードYbファイバーと2つのラージモードエリア偏波保持Ybファイバー(コア径25 μ mと70 μ m)による3段の増幅器構成である。出力パルスエネルギー1.5mJ/pulse、ビーム品質 $M^2 \sim 1$ 、利得安定性<10%@5時間のレーザー特性を得た。



図8 単一モードと偏波保持ファイバー(コア径25 μ m)による1,2段目増幅部

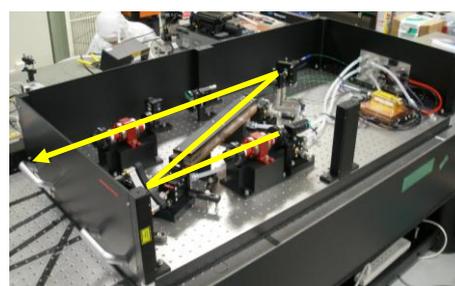


図9 偏波保持ファイバー(コア径70 μ m)による3段目増幅部

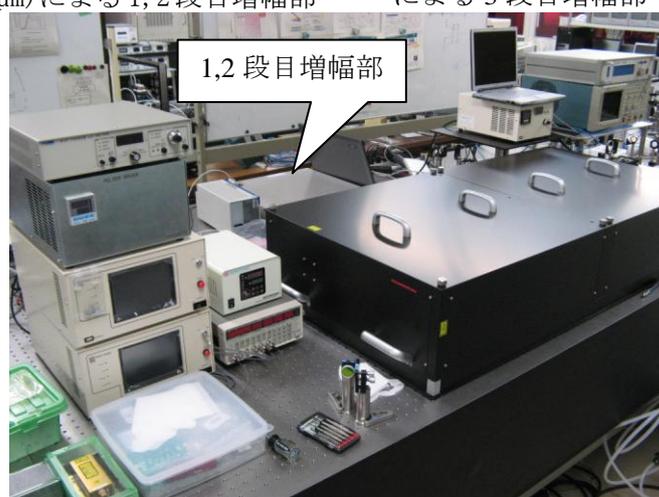


図10 高出力ファイバーレーザーの全写真

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

- 1) 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, vol. **17**, 7744-7749 (2009)

- 2) B. Zhao, Y. Jiang, K. Sueda, N. Miyanaga and T. Kobayashi, "Sub-15fs ultraviolet pulses generated by achromatic phase-matching sum-frequency mixing", *Optics Express*, vol. **17**, 17711-17714 (2009)
- 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*, vol. **2**, pp. 072503-1-072503-3 (2009)
- 4) T. Harimoto and K. Yamakawa, "Analytical Expressions for Small-Signal and Saturation Processes of Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. **48**, pp. 098005-1 – 098005-2 (2009).
- 5) 河仲準二、
"高パルスエネルギーYb 添加バルク固体レーザー"
光学 第**38**巻 第1号 pp. 10-16 (2009).
- 6) S. Pearce, R. Yasuhara, A. Yoshida, J. Kawanaka, T. Kawashima, and H. Kan, "Efficient generation of 200 mJ nanosecond pulses at 100 Hz repetition rate from a cryogenic cooled Yb:YAG MOPA system," *Opt. Comm.* Vol. **282**, pp. 2199-2203 (2009).
- 7) H. Furuse, J. Kawanaka, K. Takeshita, N. Miyanaga, T. Saiki, K. Imasaki, M. Fujita, and S. Ishii, "Total-reflection active-mirror laser with cryogenic Yb:YAG ceramics," *Opt. Lett.* **34**, 3439-3441 (2009).

(4-2) 知財出願

- ① 平成21年度特許出願件数(国内 1件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 2件)