戦略的創造研究推進事業 CREST 研究領域 「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」 研究課題

「アダプティブパワーフォトニクスの基盤技術」

研究終了報告書

研究期間 平成19年10月~平成25年3月

研究代表者:宮永憲明 (大阪大学レーザーエネルギー学 研究センター・教授)

§1 研究実施の概要

(1) 実施概要

<u>計画立案の経緯</u>

- チーム全体の目標を次のように立案した。
- 1) Ti:サファイアレーザーに代わる新しい超短パルス高強度レーザー技術の開発を目指し、
- 2) パワーレーザーとアダプティブ光波制御の融合を図る。
- 3) 近未来の科学技術用レーザーのみならず将来の超高強度レーザーにも活用可能な技術、
- 4) 産業用パルスレーザーへの技術波及も念頭に置き、
- 5) そのための技術を自主開発し、我が国のレーザー技術の進展に資すること。

基本構想

- 上記の1)~5)に対して、次のように研究開発の対象・課題を選定した。
- 1) 半導体レーザー励起の高出力固体レーザー(DPSSL)の開発

広帯域増幅方式として光パラメトリックチャープパルス増幅(OPCPA)を採用し、その励 起源はDPSSLとする。DPSSLとしては、大出力ピコ秒化に有利なNd:ガラスレーザーを 選び、将来有望なものとしてYb系材料も選択した。また、光パラメトリック増幅の前置増幅 部にファイバーレーザーを活用し、その高出力化、高安定化を図る。

2) 広帯域レーザー制御

超広帯域光の分散計測・補正を高精度化してパルス幅~5fs、ピーク出力 30TW の技術 を実現するともに、搬送波包絡線位相(CEP)の制御も加味して、世界最高性能の数サイ クルレーザーに仕上げる。これと併せて、レーザービームの空間的位相・偏光分布制御を 高強度レーザーに導入することも検討する。

- 3) さらなる高出力化に向けた取り組み 大口径化とビーム結合を併せ持った技術の開発を行う。また、高出力化に不可欠な高 耐力多層膜素子に関して、その設計指針を得るためのデータベースを構築する。
- 4) コンパクトな超短パルスレーザーの技術開発

高繰り返し高平均出力の産業用レーザーにも波及可能な技術を念頭に置き、フェムト秒 ファイバー発振器の高性能化を図る。また、従来のチャープパルス増幅(CPA)手法を改 良し、よりコンパクトな超短パルスレーザー技術を開発する。

5) 自主開発

可能な限り国産品を用いて、主要な機器は自主開発する。

研究チーム構成

上記の計画を推進するために、開発拠点を阪大レーザー研の宮永グループに置き、高出力 レーザー技術を有する浜松ホトニクスの川嶋グループ、多層膜等の光学素子評価の知見を有 するレーザー総研の藤田グループ、及び Yb 系高繰り返しレーザーと超短パルスの技術を有す



図1研究体制と主な分担課題.

る原研機構関西研の山川グループが連携し、図1のような共同体制で研究を進めた。 また、開発された技術の応用を視野に、本チーム外の機関との協力体制にも留意した。

成果の概要

>1mJ/パルスの高安定ファイバーCPA(宮永グループ)、J級Nd:ガラスCPA(宮永・川嶋グル ープ)、>100mJYb:YLFCPA(山川グループ)を実証し、高出力・高繰り返しDPSSL技術を 大きく進展させた。これらを励起源として、分散・CEP計測・制御フィードバック機能を有する負 分散パルス伸長、信号光増幅、正分散パルス圧縮のOPCPAシステム(励起レーザー未投入段 階で8fs、宮永グループ)及び、正分散パルス伸長、アイドラー増幅、正分散パルス圧縮のコン パクトOPCPA(山川グループ)を構築した。

広帯域種光発生技術としては、完全 CEP 制御の Ti:サファイアモード同期発振器(宮永グル ープ)、アイドラーを利用した CEP 自己安定化光源(宮永グループ)、パルス幅 21.6fs の Yb フ ァイバーモード同期発振器(宮永・川嶋グループ)を開発した。

新たな増幅技術としては、部分重水素化 KDP による広帯域 OPCPA を実証した。(山川・宮 永グループ)また、多ビーム励起光パラメトリック増幅によるコヒーレントビーム結合、半導体レー ザーアレイの周波数コムのコヒーレント結合による高繰り返しピコ秒発生技術、時間・空間分散レ ーザー光の増幅・超短パルスへの自動的再構築の原理実証を行った。(宮永・川嶋グループ)

誘電体素子のレーザー損傷に関するデータベースを構築では、国内コーティングメーカと協力し、誘電体多層膜ミラーのピコ秒パルスに対するレーザー損傷耐性の現状を明らかにした。また、誘電体材料及び多層膜のナノ秒、ピコ秒、フェムト秒パルスに対する損傷メカニズムを明らかにし、高強度レーザー用高耐力光学素子への指針を示した。(藤田グループ)

上記で述べたレーザーは、T:サファイア発振器と一部の計測器、制御器を除き、全て独自開発したものである。現在、これらの成果は、文部科学省の光科学プログラム「融合光新創成ネットワーク拠点」の光源開発における Yb:ファイバー発振器と OPCPA、NEDO「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」の光源開発におけるファイバー増幅器に技術波及を行っている。

(2)顕著な成果

1. 半導体レーザー励起の固体レーザー(DPSSL)の開発

>1mJ/パルス、繰り返し1~10kHz、安定性 0.2%rms の世界最高レベルのファイバーCPA、 世界に例のない J 級パルスエネルギーの Nd:ガラスピコ秒 CPA、再生増幅器単体では世界最 高出力である 107 mJ/パルスの Yb:YLF CPA レーザーを完成させ、高出力 DPSSL CPA の 基盤技術を確立した。この Nd:ガラス CPA レーザーを励起源として、100mJ/pulse 以上の OPCPA を達成すれば、世界最高出力の数サイクルレーザーとなる。

2. 超広帯域高強度レーザー技術の進展

部分重水素化 KDP(pDKDP)を用いて 250nm の OPCPA 帯域を実証するとともに、重水素 化率を最適化することにより 500nm の増幅帯域が可能であることを示した。また、ランダム位相 の多ビームアレイ励起 OPA において、信号光が回折限界のビーム品質で増幅可能であること を実証した。さらに、pDKDPと多ビームアレイ励起を組み合わせ、0.1EW/ビームの超高強度レ ーザーのコンセプトを提案した。また、誘電体多層膜のピコ秒、フェムト秒レーザー耐力のデー タベースを構築し、その損傷機構を明らかにして高耐力素子の指針を提示した。

3. コンパクトな超短パルスレーザーの技術開発

受動モード同期 Yb ファイバー発振器で、フーリエ変換限界のクリーンパルスと 21.6fs(6.6 サ イクル@1µm 帯)の世界最短パルスの発生に成功した。また、正分散パルス伸長、アイドラー増 幅、正分散パルス圧縮のコンパクト OPCPA を原理実証した。さらに、半導体レーザーアレイ周 波数コムのコヒーレント結合による高繰り返しピコ秒発生、4f 光学系のフーリエ変換面に増幅器 を配置する時間・空間分散レーザー光の増幅と超短パルスの自動的再構築の手法を原理実証 した。

§2. 研究構想

(1)当初の研究構想

研究立案時には、学術研究及び産業用の超短パルスレーザーの殆どは Nd:YAG レーザーの2 倍高調波励起の Ti:サファイアチャープパルス(CPA)レーザーであり、その供給担い手は欧米のメ ーカーであった。その状況は現在も続いている。特に、学術研究用の>10Hz 繰り返しの超短パル スレーザーの性能に関して、それらの性能をパルスエネルギーとパルス幅でマッピングすると図 2 のようになる。



図2繰り返し動作超短パルスレーザーのパルスエネルギー・パルス幅のマッピング.

ここで、青色のハッチング領域の短波長側の境界は、レーザー媒質である Ti:サファイアの増幅 帯域制限とその励起源である Nd:YAG レーザーがフラッシュランプ励起であることに起因していた。

そこで、本研究ではその状況を打破するために、増幅方式としては光パラメトリックチャープパル ス増幅(OPCPA: optical parametric chirped pulse amplification)を、その励起源としては半 導体レーザー励起の固体レーザー(DPSSL: laser diode pumped solid state laser)を採用し、 従来にない高出力(パルスエネルギー150mJ)と超短パルス性(~5fs)を両立させることを目標とし た。また、このような数サイクルパルスレーザーで重要な搬送波包絡線位相(CEP: carrier envelope phase)の制御を高出力レーザーで実現することも目指した。この研究立案当時、ドイツ MPQ がパルス幅とピーク強度の点で世界最先端を進んでおり、その後 OPCPA 励起源として DPSSL の開発を始めたが、その技術的困難さのために高出力化の進展が阻まれており、パルス エネルギー~100mJ、パルス幅~8fs にとどまっているのが現状である。

このような状況を踏まえ、本研究では、「基幹装置(目標:~5fs,~30TW)」の構築とその技術波及 を目指して、図3のような開発スケジュールを立案した。



図3研究開発の進め方.

(2)新たに追加・修正など変更した研究構想

① 新展開から生まれた新たな研究計画や目標等

単に最高性能の装置を構築するだけでなく、開発された技術が近未来の超短パルス高強度レー ザーにも役立てるべきと考えた。

(a)~500nm 超広帯域非線形光学結晶の開発とビーム結合による大口径化手法の開発

光パラメトリック増幅に従来使われてきた BBO 結晶に比べて増幅帯域が広く、大口径・高耐力 が可能な材料として、重水素化率を最適化した DKDP 結晶を取り上げ、1µm 帯で 250nm の光 パラメトリック増幅帯域を実証し、さらに励起波長の最適化によって 500nm の帯域が可能である ことを示した。また、スケーラブルな高出力化を目指して、多ビーム励起による自動的なコヒーレ ントビーム結合を考案し、その原理実証を基に特許申請を行った。(阪大レーザー研、浜松ホトニ クス)

② 中間評価における指摘や助言を踏まえた対応

「研究タイトルのアダプティブ制御についてより具体的な研究開発が望まれる」との指摘を踏まえて、以下のような対応を行った。

- (a) 光パラメトリックチャープパルス増幅(OPCPA)とパルス圧縮における新たな分散補正手法 数サイクルレーザー光の光パラメトリックチャープパルス増幅(OPCPA)とパルス圧縮で重要な 分散補正をより簡便なコンセプトで実現するために、信号光とアイドラー光では偶数次の分散の 符号が反転することを利用し、正分散媒質(ガラスブロック等)によるパルス伸張・圧縮を用いるこ とを着想した。この手法と高繰り返しピコ秒が可能な半導体レーザー励起 Yb系 DPSSLによる光 パラメトリック励起を組み合わせることによって、コンパクト高平均出超短パルスレーザーが実現可 能となる。(原研機構関西研)
- (b) 分散フリーな超短パルス増幅技術の開発

スペクトル分散制御に用いられる 4f 光学系では、アフォーカルに組まれた凸レンズ(凹面鏡)の 入射部と出射部に回折格子が配置され、中央のフーリエ変換面に位相変調器が置かれる。この レンズ対と回折格子対の光学系は原理的に分散フリーであるために、位相変調器の代わりに増 幅器(レーザー増幅媒質あるいは光パラメトリック増幅結晶)を置くことによって、分散フリーな超 短パルス増幅を実現することが可能となる。このとき、フーリエ変換面ではパルス幅が自動的に伸 張されるために、CW 励起の高繰り返し超短パルス増幅や高繰り返しピコ秒励起の光パラメトリッ ク増幅に活用可能となる。これの原理実証を行い国内、海外特許申請を行った。(阪大レーザー 研、浜松ホトニクス、レーザー総研)

③ コンパクトな超短パルスレーザーのための技術開発

上記の新たな研究展開を基に、産業レーザーにも役立つ技術波及を検討している。

(a) 超短パルス増幅技術

上記、②(a)、(b)に加えて、高平均出力ファイバーCPA本CRESTの社会還元でプロトタイプを 開発するなど、これらの実用化について参加企業(浜松ホトニクス)と検討を行っている。

(b) 半導体レーザーのビーム結合による高平均出力超短パルスレーザー

本研究における位相計測やコヒーレントビーム結合の技術を活用し、半導体レーザーアレイの 周波数コムを位相同期することによって高繰り返しの超短パルスレーザーを実現可能である。こ の手法は現在のファイバーCPA や Yb 系 thin disk 超短パルスレーザーにとって代わり、将来 の産業用、科学技術用レーザーの主流となると期待される。本研究ではそのための原理実証を 行い、国内、海外特許申請を行った。(阪大レーザー研、浜松ホトニクス、レーザー総研)

§3 研究実施体制

- (1)「宮永(阪大レーザー研)」グループ
- ① 研究参加者

| 氏名 | 所属 | 役職 | 参加時期 |
|-------|------|--------|---------------|
| 宮永 憲明 | 大阪大学 | 教授 | H19.10 \sim |
| 河仲 準二 | 同上 | 准教授 | H19.10 \sim |
| 中田 芳樹 | 同上 | 准教授 | H19.10~ |
| 椿本 孝治 | 同上 | 助教 | H19.10 \sim |
| 末田 敬一 | 同上 | 特任講師 | H19.10~ |
| 片井 隆志 | 同上 | 特任研究員 | H19.10~H21.3 |
| 竹内 康樹 | 同上 | 博士後期課程 | H19.10~H21.3 |
| 中嶋 亮 | 巨上 | 博士前期課程 | H19.10~H20.3 |
| 本谷 匡 | 同上 | 博士前期課程 | H19.10~H21.3 |
| 荒木 良 | 同上 | 博士前期課程 | H21.4~H23.3 |
| 荻野純平 | 同上 | 博士後期課程 | H22.4~ |
| 水津良章 | 同上 | 博士前期課程 | H22.4~ |

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(原研機構関西研)」グループ

① 研究参加者

| 氏名 | 所属 | 役職 | 参加時期 |
|------------------|-------------|-------|---------------|
| 山川 考一 日本原子力研究開発機 | | 研究主幹 | H19.10~ |
| | 構 量子ビーム応用研究 | | |
| | 部門 | | |
| 青山 誠 | 同上 | 研究副主幹 | H19.10 \sim |
| 赤羽 温 | 同上 | 研究副主幹 | H19.10~ |
| 小川 奏 | 同上 | ポスドク | H20.5~H24.3 |

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(浜松ホトニクス)」グループ

① 研究参加者

| 氏名 | 所属 | 役職 | 参加時期 |
|-------|------------|-------|---------------|
| 川嶋 利幸 | 浜松ホトニクス(株) | グループ長 | H19.10~ |
| 松本 修 | 同上 | 専任部員 | H19.10~H22.6 |
| 栗田 隆史 | 同上 | 部員 | H19.10~ |
| 関根 尊史 | 同上 | 部員 | H19.10 \sim |

② 研究項目

・ 光パラメトリック増幅励起レーザーの開発

(4)「藤田(レーザー総研)」グループ

① 研究参加者

| 氏名 | 所属 | 役職 | 参加時期 |
|-------|--------|-------|---------|
| 藤田 雅之 | レーザー総研 | 主席研究員 | H19.10~ |
| 本越 伸二 | 同上 | 主任研究員 | H19.10~ |
| 染川 智弘 | 同上 | 研究員 | H20.4~ |

② 研究項目

・多層膜素子、光学材料の高耐力化データベース

§4 研究実施内容及び成果

4.1 はじめに

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た。そのために、CEP 安定化種光源、NOPCPA 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、パルス出力数 J 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った。



図 4.1-1 基幹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).

開発している装置(基幹装置)の詳細構成と基本仕様を図 4.1-1 に示す。①~⑧の構成要素について、次のような分担で開発を行った。

- ① CEP 安定化種光:大阪大学 宮永グループ
- ② ファイバーチャープパルス増幅(CPA)前置増幅部:大阪大学 宮永グループ
- ③ 大口径ファイバーCPA:大阪大学 宮永グループ
- ④ 半導体レーザー励起高出力ガラスレーザー(CPA DPSSL):浜松ホトニクス 川嶋グループ
- ⑤ 光パラメトリックチャープパルス増幅部(NOPCPA):大阪大学 宮永グループ
- ⑥ 超広帯域 OPCPA、分散補正技術:原研機構関西研 山川グループ

- ⑦ 高耐力光学素子技術:レーザー総研 藤田グループ
- ⑧ 位相・偏光分布制御:大阪大学 宮永グループ

フロントエンドは、CEP 安定化数サイクルレーザー(図中①)とファイバーチャープパルス増幅 器(CPA)から構成し、高安定動作と高ビーム品質を実現している。ファイバーCPA 部は、帯域幅 10nm で動作する偏波保存単一モードファイバーCPA 前置増幅器(図中②、パルス幅 2.5ns)と 大口径ファイバーCPA、パルス圧縮・2倍高調波変換器(SHG)から構成した(図中③・1、パルス 幅 2.5ns、繰り返し1-10kHz)。ここで、大口径ファイバーとしては偏波保存 30µm LMA ファイバ ーと 100µm コアの偏波保存フォトニック結晶 (PCF rod)ファイバーを用いており、サブピコ秒パ ルス出力は OPCPA(図中⑤)の非同軸光パラメトリック前置増幅部(Pre-NOPA)の励起源として 用いる。ファイバーCPA 部はもう1系統有り、同じく偏波保存 30µm LMA ファイバーと 100µm コ アの PCF rod ファイバー(図中③・2、パルス幅 4.5ns)から構成し、その出力を CPA DPSSL の 増幅器(図中④)の種光として用いた。パルス伸張器はともに Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG)である。

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~3ns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×4cm)で2倍高調波変換され、分岐してOPCPA(図中⑤)の主増幅器(Main NOPA)に導く。

OPCPAでは、チャープミラーによるパルス伸張(150fs)をした後に、DAZZLER 変調器を用い て分散・CEP 制御を行う。前置増幅器で 50µJ 程度まで増幅され、さらに負分散素子(回折格子 とプリズムの組み合わせ)で 30ps にパルス伸張する。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 DAZZLER 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に向けたデータベースづくりを行った。前者は、コンパクトな高輝度超短パルス光源技術として、後者は、超短パルスレーザーの高出力化と長寿命化に資することができる。

以下に、上記の課題に関する研究実施内容と成果をまとめる。

4.2 種光源の開発

4.2.1 フェムト秒ファイバー発振器(浜松ホトニクス 川嶋グループ、大阪大学 宮永グループ)

偏波合成された 915nm 半導体レーザー励起による受動モード同期 Yb ファイバー発振器の 技術開発を行い、21.6fs の超短パルスレーザーが安定して出力可能とした。このパルス幅は波 長 1000nm 帯において 6.6 サイクルパルスに相当し、これまで報告された Yb ファイバー発振器 のパルス幅(28.3fs)を大幅に更新した。

図 4.2-1 に発振器の構成を示す。ファイバー部分は、シングルモードファイバー(SMF₁₋₃、 NA=0.14、コア径=5.3µm、クラッド径=125µm)とYbファイバー(吸収係数 515dB/m@915nm、 NA=0.19、コア径=3.8µm、クラッド径=125µm)とで構成されている。ファイバーの両端は FC/APC コネクタである。励起レーザーは 915nm で発振する2台の偏波ファイバー結合半導体 レーザーから構成されている。半導体レーザーの各出力は偏波合成コンバイナーによって効率 は 88%で合成され、シングルモードファイバーによって出力される。偏波合成後の励起出力は最 大 500mW である。915nm の励起光は WDM(挿入ロス=10% @915nm, 10%@950-1120nm) によって共振器内のファイバーへ供給した。モード同期発振は、1枚の λ/2 波長板と 2 枚の λ/4 波長板を用いた非線形偏波回転(NPR)によるセルフスタート型である。共振器内はファラデー アイソレーターによって一方向のみの伝搬としている。波長 1µm 帯では SMF と YDF は正の分 散値を持っているため、共振器内の分散を調整するために反射型グレーティング対(GP₁, 600lines/mm)を用いた。レーザー出力は偏光ビームスプリッターキューブ(BK7、12.7mm)に よって共振器から取り出され、透過型グレーティング対(GP₂, 600lines/mm)によってパルス圧縮 され、SF14 プリズム対によって高次分散の補償を行った。

図 4.2-2 に SHG-FROG (Frequency-resolved Optical Gating) により計測した時間波形と スペクトル位相およびビームパターンを示す。発振光の周回方向の最適化、構成素子の実測分 散値を用いた高次分散の低減等によってより短波長領域にスペクトルを拡大し、21.6fs(FWHM) のパルス幅を得た。フーリエ限界パルスをは 22.4fs(6.7 サイクル)である。実測のパルス幅は、 6.6cycle(@1000nm)に相当し、Yb ファイバー発振器のパルスとしては世界最短である。また、レ -ザー出力は16.3mW、パルス繰返し率は99.3MHz であった。

今回得られた結果は、これまで一般的であった 975nm 励起 Yb ファイバー発振器とは異なり、 励起波長を短波長化としたことで、950nm~1090nm にわたる広帯域スペクトル光の発生に成功 した。その結果、これまで報告された 30fs 前後のパルス幅を大幅に短パルス化することを可能と した。得られたスペクトル幅は 140nm 以上にわたるため、広帯域スペクトルの光源を必要とする 数サイクルパルス用光源としてだけでなく、分光用光源としての利用も有望である。



図 4.2-1 915nm 励起モード同期 Yb ファ イバー発振器の構成図.

図 4.2-2 パルス波形と位相特性 (挿入写真はビームパターン).

4.2.2 CEP 安定化技術(大阪大学 宮永グループ) (a) Ti:サファイアレーザー発振器

基幹装置に用いた発振器は、数サイクルパルス幅(1 オクターブのスペクトル幅)をもつ Ti:サフ アイアレーザー(VENTEON)である(図 4.2-3)。





図 4.2-3 パルス相関波形と位相分布.



当初は発振周波数 80MHz に対して搬送波包絡線オフセット周波数 (feo)が 20MHz であったた め、4 パルスに1回の割合でしか CEP が安定化しなかった。従って、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工程が必要であった。そこで、 発振器周波数を 80MHz から 100MHz に変更し、さらに CEP ロッキング方式を改良することに より、パルス列全てにおいて完全なCEP安定化を実現した(図4.2-4)。パルス幅は4.5fsであり、 ほぼフーリエ変換限界に近い。

(b) CEP 自己安定化技術を用いた数サイクル光発生

2次及び3次の非線形過程における光波間の位相関係を利用して、種光の位相擾乱(□)をキ

ャンセルすることができる。本研究では、図 4.2-5 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、材料:サファイア)を信号光として非同軸光パラメトリック(NOPA、結晶:BBO) を行い、その際に発生するアイドラー光の CEP を自己安定させた。この手法の課題であるアイド ラー光のスペクトル角度分散を小さく抑え、再度白色光に変換(WLG-2、材料:YAG 結晶)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。図 4.2-6(a)にスペクトル、 同図(b)にパルス波形を示す。図 4.2-6(c)に示すように、基本波・2 倍高調波(f-2f) 干渉スペクトル は時間的に安定であり、CEP の自己安定化を実現している。この手法は簡便であるだけでなく、 利用目的に応じた波長域の数サイクル種光を発生するのに適している。



図 4.2-5 CEP 自己安定化超広帯域パルスの発生のための光学配置.



図 4.2-6 (a):スペクトル、(b):パルス波形、(c): f-2f 干渉スペクトル(CEP)の安定性.

4.3 光パラメトリック増幅用励起レーザーの開発

4.3.1 光ファイバーチャープパルス増幅器・パルス圧縮、波長変換(大阪大学 宮永グループ) Yb添加ファイバーレーザー(利得ピーク波長~1030nm)を後段のLD励起Nd:ガラスレーザー CPA(図 4.1-1④、レーザー材料:HAP-4)の増幅帯域(中心波長 1053nm)で動作させた。単一 モードファイバー増幅器(図 4.1-1②)は多段構成とし、段間に CFBG パルス伸張、アイソレータ ー、1053nm バンドパスフィルター(帯域幅 10nm)、パルスピッカーを配置し、パルス繰り返し周 波数を 80MHz から 1MHz、1-10kHz と徐々に落としながら増幅を行った(図 4.3-1)。CFBG の チャーピングは 2.5ns/10nm であり、後段の回折格子(溝密度 1200 本/mm)パルス圧縮器との 高次分散の差を補正してある。利得ピークを外れた波長で動作させるため、1030nm 帯に ASE (amplified spontaneous emission)が生じ、多段増幅を行う際に、利得低下が起きるという問 題がある。そこで、Yb添加ファイバーの吸収断面積が 1053nmよりも 1030nm で大きいこと(図 4.3-2)を利用して ASE を抑制し、目標出力を達成するためのファイバー長の最適化を行った。 図 4.3-3 に示すように、ファイバーを長くすることで ASE の発生を抑制でき、1053nm 信号光の S/N は向上し、ファイバー長が 8m の場合に ASE を信号光の 10⁻³以下に抑えることができた。 多段増幅器において ASE が増幅されていくことを考慮してもこの値は十分小さいと言える。



図 4.3-1 多段単一モードファイバー増幅システム.



図 4.3-2 Yb 添加ファイバーの吸収、誘導放出断面積. 図 4.3-3 ファイバー長依存性.

こうして得られた単一モードファイバー増幅器の出力は 1μJ/pulse であり、これをファイバー分 波器で2分岐し、一方をNOPCPAの前置増幅部の種光に(図 4.1-1③-1)、他方をNd:ガラスレ ーザーCPA の種光とした(図 4.1-1③-2)。大口径ファイバー増幅器(図 4.3-4)は、偏波保持型 Yb添加LMAファイバー(コア径 30μm)とフォトニック結晶 PCロッド型ファイバー(コア径 100μm) で構成した。また、Nd:ガラスレーザーCPA 用種光の系列(図 4.1-1③-2)では、大出力増幅にお けるレーザー損傷を回避するために、高次分散を補正した CFBG をさらに追加して 6.25ns/10nmにまでチャーピングさせ、上記の大口径ファイバー増幅器に入力した。

以下に、図 4.1-1③・1 の系列について、大口径ファイバーCPA・パルス圧縮及び2倍高調波 変換の特性を示す。励起方式をパルス励起方式(1kHz)にすることで、発熱による温度擾乱を抑 制し出力の安定化を図るとともに、ロッド型ファイバーについては冷却構造の改善を行った。その 結果、図 4.3-5 に示すように LMA ファイバー、ロッドファイバー出力の安定性は各々0.3%rms、 0,2%rms に達し、同図の写真に示すように良好な出力ビームパターンを得ることができた。次に、 LMAファイバーとロッド型ファイバーの増幅特性を図 4.3-6に示す。1kHz 励起において利得 84 倍、1.4mJ/パルス(ナノ秒パルス CPA では最高レベル)を達成した。



図 4.3-4 LMA ファイバー及び PC ロッドファイバー増幅器構成の概要(左上)、写真 (下)、及び PC ロッドファイバー増幅器の冷却構造(右上).



図 4.3-5 LMAファイバー(左), PCロッドファイバー増幅器(右)の出力安定性および近視野像.



図 4.3-6 PC ロッドファイバーの増幅器の増幅特性.

この出力をNOPCPA前置増幅部の励起源とするために、図 4.3-7 に示すようにチャープパル スを回折格子対でパルス幅 280fs まで圧縮した。さらに、BBO 結晶による 2 倍高調波変換では 変換効率 36% (出力安定性 1.5%rms)を達成した。



図 4.3-7 ファイバーCPA 出力のパルス圧縮と2倍高調波変換.

4.3.2 半導体レーザー励起高出力 Nd:ガラスチャープパルス増幅器(浜松ホトニクス 川嶋グループ)

高強度超短パルスレーザーを発生させるには、広いスペクトル領域にわたって増幅する必要 があるため、一般的に光パラメトリックチャープパルス増幅法(OPCPA, Optical parametric chirped pulse amplification)を用いて研究開発が進められてきた。特に、光と物質の非線形相 互作用の研究においては光強度を増加させることが必要なため、超短パルスエネルギーの大出 力化が重要である。そのためには、OPCPA ポンプ光の大出力化と併せて、繰返し動作が求めら れる。数 10TW 以上のピーク強度を繰り返し出力するためには、ジュール級の励起レーザーが 必要になる。しかしながら、そのようなレーザーはシングルショットベースの大型レーザー施設に 限られ、また繰返し可能なジュール級のレーザー開発は熱光学効果によって、その高出力化は 制限されてきた。そこで、繰返し動作可能なジュール級レーザーとして、半導体レーザー(LD)励 起高出力 Nd:ガラスチャープパルス増幅システムを構築した。

図 4.3-8 にレーザーシステムの構成図を示す。4.3.1 項で述べた光ファイバーチャープパルス 増幅器出力の1ビーム(図 4.1-1③-2)を、LD 励起 Nd:ガラスレーザー増幅器の入力光として用 いた。レーザー増幅器は、全反射を用いたジグザグ光路の4パス前置増幅と同じくジグザグ光路 の4パス主増幅器から成る合計8パス増幅で構成した。フロントエンド部からの出力光はビーム径



図 4.3-8 LD 励起高出力 Nd:ガラスチャープパルス増幅システムの構成図.

♦3 mm に切り出され、像転送テレスコープを介してスラブレーザー増幅器へ導光される。4 パス 前置増幅の結果、パルスエネルギー80 mJ が得られた。次に、前置増幅で得られた光パルスを 矩形形状(幅 10mm、高さ20mm)にビーム整形した後に、4 パス主増幅を繰り返し率1 Hz で行 った。図 4.3-9 および図 4.3-10 に出力特性、スペクトル特性をそれぞれ示す。LD 励起エネルギ -50 J のとき、出力エネルギー2.38 J、パルス幅 2.5 ns が得られた。このときのスペクトル幅は 3.7 nm であった。ガラス媒質の利得峡帯域化によりスペクトル幅は 4.5 nm から 3.7 nm まで狭 められた。パルス幅も同様に 4.3 ns から 2.5 ns まで狭められた。得られたスペクトル幅が 3.7 nm であることから、これはフーリエ変換限界パルスの 450 fs に相当し、このレーザー自体を用い た高強度物理実験にも展開が可能である。

以上により、目標仕様のジュール級の出力を達成した。このようなレーザーは世界的にも限られ、これを OPCPA の励起光源として用いることによって世界トップレベルの高強度超短パルスレ ーザー装置を実現した。



図 4.3-9 LD 励起に対する出力エネルギ 一特性.

図 4.3-10 主増幅器の入出力スペクトル.

4.3.3 Nd:ガラスチャープパルス増幅器出力のパルス圧縮(大阪大学 宮永グループ、浜松ホトニク ス 川嶋グループ)

図 4.3-11 に誘電体多層膜回折格子を用いた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、140mm×120mm、420mm×210mm、溝密度は1740本/mm であり、波面歪み無くホルダーに取りつける工夫をしている。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。当初計画では、大口径の回折格子で4回回折させる設 計であったが、ピコ秒パルスによる損傷を考慮して、2枚構成のダブルパスに設計変更した。



図 4.3-11 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): パルス圧縮器の写真、(b): 圧縮パルスの時間波形.

圧縮パルスを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 4.1-1⑤)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。

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。なお、パルス圧縮出力は、波長1053nm、527nm、ピークパワー1~2TW、繰り返し周波数10HzのJ級レーザーパルスであり、世界的にもユニークな存在である。

4.3.4 高出力2倍高調波変換(浜松ホトニクス 川嶋グループ)

パルス圧縮後の波長変換素子として非線形結晶の大型化と研磨の容易さと、適度な有効非線 形定数を有し、またスペクトル許容幅の広さから DKDP(リン酸重水素カリウム)結晶を選択した。 結晶サイズは直径 ¢65mm、厚みは5mm および7mmとし入射レーザーの強度に応じて使い分 けるようにした。DKDP は潮解性があるため、結晶ホルダーへの取り付けは窒素雰囲気中で行っ た。図 4.3-12 に DKDP 波長変換器の写真を示す。スペクトル幅 4nm のチャープパルス光を入 力した場合、50%以上の変換効率が見込まれる。

図 4.3-13 に CLBO(セシウムリチウムボーレート)結晶を用いた場合の狭帯域スペクトルな大 出力レーザーによる波長変換特性結果を示す。基本波 12.1 W(12 J, 1 Hz)の入力に対して、2 倍高調波 7.4 W(7.4 J, 1 Hz)の出力が得られ、計算結果と良い一致を示した。したがって、 DKDP 結晶を用いた場合でも、ジュール級の波長変換パルスの発生が見込まれる。



図 4.3-12 DKDP 波長変換器.

図 4.3-13 大出力パルス入力時の波長変換特性.

Conversion efficiency

- 4.4 高出力光パラメトリック増幅器の開発
- 4.4.1 増幅システム設計と分散補正(大阪大学 宮永グループ)

図 4.4-1 に基幹装置における NOPCPA の基本ブロック図と分散計測・補正の概要を、図 4.4-2 に具体的分散補正の様子を示す。

NOPCPA 種光のパルス伸張部は、前置増幅用のチャープミラー、回折格子対、およびプリズム対で構成され、負分散により 30ps 程度まで伸張される。この負分散は、NOPCPA による増幅後の圧縮器 (SF57/59 ガラスブロック)による正分散により補償され、数サイクルパルス幅まで圧縮される。また、音響光学分散制御素子 (Dazzler)を挿入することで、グレーティングおよびプリズムでは除去しきれない残留高次分散を補償することで、5fs 程度までの圧縮が可能である。なお、図のプリズム対と回折格子対の光学系を一体化したものとして Grism があるが、本研究の帯域幅とパルス伸張幅 (30ps)には対応が困難である。そのために、新たに透過型回折格子を用いて、従来のものに比べて使用可能帯域が非常に広く(400nm)かつ非常にコンパクトな Grism を

開発中である。



図 4.4・1 基幹装置における NOPCPA の基本ブロック構成と分散計測・補正システム.



図 4.4-2 パルス伸張、増幅、圧縮における分散補正の設計と実測データ.

また、本レーザーは圧縮には帯域の問題から回折格子を使用することが不可能であるため、一般的な CPA とは逆に負分散でパルスを伸張して、正分散で圧縮する構成である。圧縮には大型のガラスブロックおよびチャープミラーを使用する。そのため分散補償用のチャープミラーには正分散でしかも大口径が必要とされるが、今回2インチの正分散(GVD=100fs²)のチャープミラーを開発した。そのGVDを測定した結果を図 4.4-3 に示す。図から分かるようにほぼ 100fs に最適化されていることが分かる。

4.4.2 光パラメトリック前置増幅器(大阪大学 宮永グループ)

NOPCPA の増幅部は、前置増幅 1 段および主増幅 3 段で構成する。前置増幅部(Type-I BBO, 3mm 厚)の役割は、数サイクル種光源から出射直後のスペクトルに偏りが見られるため、



図 4.4-3 新たに開発したチャープミラーの GVD 測定結果.

それをフラットにすることである。また、後段の NOPCPA においてパラメトリック背景光(OPG)等の発生を抑制するために、主増幅器への注入エネルギーを高くすることを目的とする。図 4.4-4 に入力を 1nJ としたときの、結晶の厚みと励起強度を変化させたときの増幅後の出力を計算した結果を示す。計算は高次分散まで考慮した非線形3波結合方程式を数値計算で解くことにより行った。この結果、結晶厚 3mm で20GW/cm²で励起したときに増幅後の出力として装置仕様である1uJに達することが分かる。



図 4.4-4 NOPCPA 前置増幅部における増幅特性の数値計算結果.

4.4.3 光パラメトリック主増幅器(大阪大学 宮永グループ)

NOPCPA 主増幅においては、2段および3段増幅を検討した。すなわち、2段の場合では最終 出力 30TW(150mJ)を目標とし、3段の場合はそれ以上の可能性を追求する。各増幅段には、 広帯域両面反射防止コートされた 3mm 厚の Type-I BBO 結晶を用い、NOPA における非同軸 角は約 2°である。

パルス伸張・分散補償後の入力パルスエネルギーが 5µJであることと、信号光と OPG (optical parametric generation)の比率(S/N 比)ができるだけ大きくなるように考慮して、格段のそれぞれの利得を G1=400、G2=100 と設定した。図 4.4-5 は励起パルスエネルギー20mJ、励起強度 12GW/cm²、励起パルス幅 50ps、信号光パルス幅 30ps の条件で励起したときの利得スペクトルを、図 4.4-6 に励起パルスエネルギー1J、励起強度 10GW/cm²、励起パルス幅 50ps、信号光パルス幅 30ps のときの利得スペクトルをそれぞれ示す。

それぞれの利得を抑え未飽和領域で励起することで OPG の発生を抑制し、3mm と薄い結晶

を強励起することで 5fs 圧縮に必要な帯域(300-350nm)を維持しつつ、利得を稼いでいる。このときの変換効率はそれぞれ、10%、20%である。5µJ が利得 400x100 倍で増幅され、200mJ に到達すると予測される。



上述の2段 NOPCPA にもう1 段 BBO 結晶を追加し、励起パルスエネルギー2.5J、励起強度 10GW/cm²で励起した場合、利得 2.5 倍が見込める。このとき、変換効率 20%、出力 500mJ に 達し、かつ飽和領域に近づくため、ショットごとの安定成功向上が見込める。また、上述の計算か ら分かるように、3段目でビーム径が 25mm に達することから、本プロジェクトで 30mm 角と非常 に大口径の BBO 結晶を採用した。図 4.4-7 にその外観を示す。



図 4.4-7 NOPCPA の3段目用に準備した 30mm 角の BBO 結晶.

4.4.4 ビーム転送・パルス圧縮・集光光学系(大阪大学 宮永グループ)

パルス圧縮には、エネルギー損失を極力抑制するという観点から、SF57 あるいは SF59 と呼ば れる高屈折率(n>1.8)を有するガラスブロックによる、正分散圧縮を行う。長さ 200mm のガラス ブロック(面精度 \/10)を通過することでパルス幅が次第に短くなる。このとき、最小パルス幅





図 4.4-8 カセグレン型ビーム拡大光学系.

図 4.4-9 大型軸外し放物面集光鏡.

(~5fs)となるビーム出口部分での B-integral 値が1以下にするように、3段目 NOPA の出力ビ ーム径 25mmx25mmをガラスブロック上では 150mm まで拡大し、ビーム強度を下げている。そ のため図 4.4-8 に示すカセグレン拡大光学系を用いた。また、この大口径ビームを集光するため に集光には直径180mm 大型の軸外し放物面鏡(図 4.4-9)を用いた。

4.5 高繰り返し超短パルスレーザーの開発

4.5.1 Yb 添加高出力固体レーザーの開発(原研機構関西研 山川グループ)

光パラメトリック増幅光の高エネルギー化を目指し、高出力 Yb:YLF ポンプレーザーの開発に 着手した。Yb:YLF 再生増幅器は高出力化に対応した共振器構造で、凹面ミラーと平面ミラー、 ダイクロイックミラー、最大2台の励起用半導体レーザー(LD)、ポッケルスセル、偏光子、クライオ スタットから構成されている(図 4.5-1 参照)。



図 4.5-1 Yb:YLF 再生増幅器の構成.



の入出力特性. ○印は Q-switch 動作、▲ 印は seeding 動作時.

特性のモードサイズ依存性.

図 4.5-2 に示すように LD 励起パワー582 W 時に 107 mJ(平均出力 1.07 W)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。 さらに、繰り返し周波数を10 Hzから100 Hzへと高繰り返し化を図るために、YLF 結晶内の熱 除去対策が重要となる。このため、3次元熱解析シミュレーションを行い、結晶内の熱除去が最も 有効な結晶サイズと結晶ホルダーを再設計した。今回使用した Yb: YLF 結晶(6 mm×2.3 mm×3 mm 厚)は Yb 添加率を従来の半分(10at.%)とし、一方結晶長を2倍程度長くして銅製 の結晶ホルダーへの接触面積を増加させて冷却効率の向上を図っている。そして結晶ホルダー に取り付けられた、Yb:YLF はクライオスタット内に収容されて液体窒素で冷却される。このような 構成で、再生増幅器の全長と凹面ミラーの曲率を変えることで様々なモードサイズに設定するこ とが可能であり、増幅計算では 1.49 mmg 以下のモードサイズで発振することが確認できた。こ の結果から、LD 励起時間 2 ms、繰り返し数 100 Hz で Q スイッチ発振実験を行った。モードサ イズをそれぞれ 1.19 mmφ、1.37 mmφ、1.49 mmφ に設定し Q-switch 発振を行ったところ図 4.5-3 に示す結果が得られた。モードサイズ 1.4 mmφ では、平均出力 1.6 W で出力の飽和が見

られ、また 1.37 mmφ では 2 W の最大平均出力が得られた。そして 1.19 mmφ では 2.6 W(出 カエネルギー26 mJ)の最大平均出力が得られた。これは 10 Hz 動作時の平均出力の 2.6 倍に 相当し、結晶の熱除去が有効に機能していることが確認でき、光パラメトリック増幅器のさらなる高 出力、高繰り返し化に目処が得られた。

一方、4.5.2 項で述べるアイドラーを利用した光パラメトリック増幅光の分散補正には、ポンプレ ーザー光の位相補償が重要となる。このため、回折格子とシリンドリカルミラーを組み合わせた 4f 光学系(図 4.5-4)内に空間液晶位相変調器(Spatial Light Modulator:SLM、図 4.5-5)を設 置し、光学的に展開したフーリエ面において、周波数成分の位相を任意にプログラミングすること によって位相制御を可能とする位相変調器を製作した。この SLM をパルス伸張器とYb:YLF 再 生増幅器との間に設置し、ポンプレーザー光の位相計測には周波数分解型光ゲート法 (Frequency Resolved Optical Gating:FROG)を用いた。

図 4.5-6 に FROG を用いた計測結果を示す。図 4.5-6(d)から明らかなように、SLM を動作させない場合のオリジナルパルス(破線)には, 残留分散の影響でメインパルスの 20%程に相当する背景光が存在するが、この残留分散を補償するように SLM に適切な分散を与えることにより、背景光の無いクリーンなパルス(実線)が得られ、SLM を用いることによりポンプレーザー光の位相を能動的に補償できることが明らかとなり、これによってアイドラー光の分散補償がより精密に行うことが可能となった。







図 4.5-4 4f 光学系.

図 4.5-5 液晶空間位相変調器.



図 4.5-6 FROG 計測結果. (a): 位相制御なし(original), (b): 位相制御あり (SLM-ON)の場合の FROG イメージ像. (c): スペクトル強度と位相. (d): 時間強度と 位相.

4.5.2 アイドラーを利用した光パラメトリック増幅と能動分散補正(原研機構関西研 山川グループ)

光パラメトリックチャープパルス増幅時に発生するアイドラー光のチャープがシグナル光に対し て反転する性質を用いて、アイドラー光をシグナル光パルス伸長に用いたのと同じ正分散媒質で 圧縮することを提案し、その実証実験を行った。図 4.5-7 に示すように、モードロック発振器(中心 波長 1020 nm、パルス幅 57 fs)の出力パルスを 2 つに分け、一つをポンプ光光源である Yb:YLF CPA レーザーのシード光に、もう一方を OPCPA のシグナル光として用いた。Yb:YLF 再生増幅器の出力はパルス圧縮器で 2 ps 程度まで圧縮された後に 2 倍波に波長変換され、 OPCPA のポンプ光として OPA 結晶 (BBO、タイプ I、7mm 厚)に入射する。実験時のポンプ光 エネルギーは約 1 mJ であり、81 GW/cm²の強度に相当する。OPCPA のシグナル光は正の分 散を有する高分散ガラスブロック(長さ 50 mm)の透過によりパルス伸張され、OPA 結晶に入射 し、ポンプ光により増幅される。実験時の装置の繰り返し数は 10Hz である。OPA により発生した アイドラー光のエネルギー6.4 µJ、利得は 10³ であった。発生したアイドラー光は、先ほどシグナ ル光パルス伸長に用いた同一のガラスブロックを透過させパルス圧縮した。ガラスブロック透過前 後のアイドラー光のパルス幅はシングルショット自己相関器で計測した。



図 4.5-7 光パラメトリック過程のアイドラー光を用いた超短パルス増幅の実験配置.

パルス伸長前後のシグナル光の自己相関波形を図 4.5-8 に示す。相関波形からシグナル光は ガラスブロックによりフーリエ変換限界(51.7 fs)に近い 57 fs(半値全幅、以下 FWHM)から 390 fs(FWHM)までパルス伸長されていることがわかった。

一方、ガラスブロック透過前後のアイドラー光パルスの自己相関波形計測結果を図 4.5-9 に示す。ガラスブロック透過によりアイドラー光パルス幅は 295 fs(FWHM)から 73.9 fs(FWHM)に 圧縮することに成功した。



••• w/o glass block SF11 passed 0.8 Normalized Intensity 0.6 0.4 0.2 0.04 -800 -600 -400 -200 0 200 400 600 800 Delay (fs) 図 4.5-9 アイドラー光の自己相関波形. ○はパルス伸張後、●は圧縮後.

○はパルス伸張前、○は伸張後.

このように、同一のガラスブロックをパルス伸長及び圧縮に用いてサブ 100 fs パルス幅の圧縮 アイドラーを得ることに成功した。この手法を用いることで、レーザー加工現場の様な厳しい環境 でも使用に耐えうるシンプルで堅牢、高効率な実用的フェムト秒 CPA レーザーが構築可能であ る。

4.5.3 多層膜素子の分散評価(原研機構関西研 山川グループ)

分散補償用チャープミラーの試作品として、異なる群遅延分散(GDD)を持った2枚のチャープ ミラーを試作し、これらをペアで用いることによって高精度に分散量を制御する手法を確立した。 (波長帯域:700~1100 nm、平均反射率:99~99.5%、GDD:-100±20 fs²)。ポイントは、要求 される波長帯域が非常に広いため、1枚のチャープミラーでは GDD の揺らぎが非常大きくなり、 分散制御の性能が悪化するため、2枚目のチャープミラーを一枚目のものと逆の GDD になるよう に設計し、2枚をペアで使うことで、比較的変動の少ない GDD が得られる。この分散補償用チャ ープミラーの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 4.5-10)を構築した。

位相測定の予備実験として、4.5.1 項で述べた 4f 光学系内に設置した SLM に光パラメトリック 増幅光を入力した。図 4.5-11 は位相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(SLM によって3次の位相歪みを与えている)。図から明らかなように、SLM に よる3次分散が大きく影響していることがわかり、リアルタイムで広帯域光の位相計測が可能となり、 今後試作した分散補償用チャープミラーのリアルタイム位相計測を行う予定である。





4.6 多層膜素子、光学材料の高耐力化データベース

4.6.1 レーザー損傷耐力の温度依存性(レーザー総研 藤田グループ)

イットリビウム(Yb)イオンを添加した YAG 材料は、大きな蓄積効率や比較的広い蛍光スペクト ル幅など、今後の高強度レーザー光源として期待されている。しかし、Yb:YAG レーザー材料は、 準三準位系のエネルギー準位を有することから、高強度励起をする必要があり、装置の大型化、 複雑化が問題となっている。この解決方法の一つとして、レーザー媒質を極低温にまで冷却する ことにより、四準位動作を可能にするとともに熱伝導率も向上することから、低温動作型レーザー 装置としての開発が進められている。そのレーザー装置に使用される光学素子も同様に極低温 にまで冷却されるが、冷却時にその光学特性、特にレーザー損傷耐力がどのように変化するか については、殆ど研究がなされていない。そのため、本研究では、低温条件下における光学素 子のレーザー損傷耐力を評価することにより、低温動作型高強度レーザー装置に必要な光学素 子のデータベースを構築することを試みた。

誘電体光学材料におけるレーザー損傷耐力の温度依存性を評価するために、含有不純物濃度の異なった5種類の石英ガラス材料を用意した。石英ガラス材料は、紫外から近赤外域に亘り高い透過性をもつため、レンズや窓材として、また多層膜ミラーの基板材料としても多く用いられている。レーザー損傷耐力の評価には、波長1064nm、パルス幅4nsのレーザーパルスを用い

た。真空容器内で温度を-150~200℃に制御した石英ガラス材料内部にレーザーパルスを集光 し、照射エネルギー密度を徐々に増加し、損傷を発生するエネルギー密度を損傷閾値として評 価した。測定結果を図4.6-1に示す。全ての試料において、低温になるに従い、レーザー損傷閾 値は直線的に増加することが判った。また、その直線の傾きは、材料より異なり、不純物含有量に 依存し大きくなっている。この結果より、誘電体材料のレーザー損傷機構である衝突電離は、温 度の低下により起こり難くなり、不純物が寄与する初期電子生成量も減少するため、含有不純物 量が多い石英ガラスでは温度依存性が顕著になるものと説明できる。また、この傾向は、基板表 面、光学薄膜においても同じであることも判った。

パルス幅が短くなった場合のレーザー損傷耐力について、異なった光学薄膜材料に対して評価を行った。評価用レーザーには、中心波長 800nm のチタンサファイアレーザーを使用し、パルス幅を 100fs、2ps、200ps に調整し、温度変化に対する各パルス幅のレーザー損傷閾値を測定した。各パルス幅によるレーザー損傷閾値の絶対値は大きく異なるため、それぞれの室温における損傷閾値を1として、各温度の閾値を規格化し、温度に対する規格化された損傷閾値の変化の傾きを ΔDT と定義して比較した。図 4.6-2 は、横軸パルス幅、縦軸 ΔDT を示す。結果として、全ての材料において、パルス幅が拡がると、ΔDT は負の傾き、すなわち温度増加に従い損傷閾値は低下する傾向が強くなることが明らかになった。これは、レーザー損傷閾値を決定する支配的な損傷機構が、パルス幅の拡大とともに変化することを示唆している。

以上のことから、パルス幅が数 ps 以上の長いパルス幅では、衝突電離が支配的なレーザー損 傷機構となり、低温になるに従いレーザー損傷耐力は向上する。すなわち、このバルス幅領域で は、低温動作型レーザーにおいて、より高出力動作が期待できると結論づけられる。



0.0004 . D.T. -0.0004 2 MgF2 SiO2 -0.0008 AI203 . HfO2 ZrO2 Ta2O5 ž -0.001210³ 10-2 101 104 10-1 10 10 Pulse width (ps)

図 4.6-1 石英ガラス材料の内部損傷 閾値の温度依存性.

図 4.6-2 パルス幅に対する光学薄膜レーザ 一損傷閾値の温度変化.

4.6.2 誘電体多層膜のピコ秒・フェムト秒レーザー損傷耐力(レーザー総研藤田グループ) 数サイクル高出力レーザーの実現には光学素子の高耐力化が不可欠である。基幹装置に用いられる多層膜光学素子や光学結晶のフェムト秒領域での損傷メカニズムを明らかにし、高耐力化の指針を得ることを目的とし、最も重要な回折光学素子と誘電体多層膜ミラーについて、レーザー損傷耐力評価試験を行い、現状のデータベースを構築した。

評価用レーザーには、パルス幅 300fs のガラスレーザーを発振器としたチャープパルス増幅装置を使用した。試料に照射されるレーザーパルスは、最大出力 100mJ、パルス幅 2.2ps となる。 入射レーザーパルスエネルギーと照射位置を変えて、損傷の有無を確認し、損傷閾値を求めた。 測定試料には、国内コーティングメーカの協力による提供された誘電体多層膜ミラーを用い、比較の為に評価したパルス幅 10ns の損傷閾値との関係を図 4.6・3 に示す。

パルス幅 10ns の場合、損傷閾値 5J/cm²から 277J/cm²まで、メーカーにより大きく異なる結果 となったのに対して、同じ試料を照射したパルス幅 2.2ps では、0.7~9J/cm²と試料間の差がなく なり、多くの試料の損傷閾値は 3~7J/cm²の間に固まった。この結果は、ロングパルスの場合に は、コーティング技術に起因する僅かな不純物や欠陥が損傷閾値を決定するのに対して、数 ps





図 4.6-3 誘電体多層膜ミラーにおける パルス幅に対する損傷閾値の比較.

図 4.6-4 100fs パルスによる誘電体薄 膜材料の閾値存性.

この原因を明らかにするために、独自で製作した各種誘電体材料薄膜の 100fs パルスに対す るレーザー損傷耐力を評価した。評価用レーザーには、4.6.1 項で述べたチタンサファイアレー ザー装置を用いた。図 4.6-4 に各材料のバンドギャップエネルギーに対するレーザー損傷閾値 を示す。比較で評価した 200ps パルスの各種誘電体材料のレーザー損傷閾値は、材料の物性 値のみで決まらないのに対して、100fs パルスではバンドギャップエネルギーのみで決定されるこ とが判る。また、これらの材料を使用した誘電体多層膜光学素子のレーザー損傷閾値は、多層 膜を構成する閾値の低い材料により決定されることも明らかになった。このことから、上述の各メ ーカーの誘電体多層膜ミラーの 2.2ps パルスに対する損傷閾値が比較的差が顕われないことを 説明している。

4.6.3 超短パルスレーザー用誘電体多層膜の設計指針(レーザー総研藤田グループ)

4.6.2 項の結果から、高強度レーザー用多層膜光学素子は、SiO2や MgF2などバンドギャップ エネルギーの大きな材料で構成することにより、高耐力化が可能であると言える。しかしながら、 SiO2や MgF2材料は、低屈折率材料として知られ、これらの材料で多層膜を構成すると、多層膜 層数の増加、反射率波長帯域幅の狭小化などが懸念される。

多層膜光学素子としての可能性を確認するために、SiO₂とMgF₂を積層しミラーの設計を試みた。図 4.6-5 に計算した反射率特性を示す。比較のために、大阪大学の LFEX レーザーシステムで使用されている誘電体多層膜回折格子の入射角度 72°、S 偏光に対する回折特性を示した。回折格子の効率 90%以上の波長帯域幅は約 60nm と計算されている。SiO₂と MgF₂の 60 層の誘電体多層膜ミラーの反射率 90%以上の帯域幅も同じ約 60nm が求められた。現状の高出力・高強度レーザーシステムの使用帯域幅は、回折格子の帯域幅で制限されるため、その帯域幅に対してはバンドギャップエネルギーの大きな材料のみで積層することにより十分に高耐力化は可能であり、またこの層数は技術的にも可能と考えられる。

しかしながら、更に短いパルス幅をもつ高強度レーザー用ミラーには、より広い反射帯域が要求される。一般に、反射率の反射帯域を拡げるためには、僅かに設計中心波長をずらした多層膜の組み合わせを重ね合わせる手法が用いられる。この手法により SiO₂と MgF₂の積層で反射帯域を拡げると、170nmの反射帯域幅に対して約180層が必要となり、技術的に難しいことが判った。

100fs レーザーパルスに対する HfO₂とMgF₂材料のレーザー耐力は、約 2J/cm²と約 3J/cm²

である(図 4.6-4)。即ち、HfO2材料を用いたミラーに約 2J/cm²以上のレーザーパルスが入射した場合に損傷が生じると予想される。言い換えると、HfO2 層に入射されるレーザーエネルギーを 2J/cm²以下に抑えれば、高耐力化が可能である。レーザー入射層にSiO2とMgF2でミラーを形成し、下層 HfO2 のミラー層へのエネルギーを抑えるようにすることにより、広い反射帯域と高耐力を兼ねることが期待できる。図 4.6-6 に、SiO2と MgF2、30 層で約 40%を反射する高耐力・低分散ミラーの特性を示す。初期段階で、反射率 95%以上の波長帯域が 175nm 得られた。今後、実験的検証を行うとともに、更に高耐力、広帯域の最適化を行うことにより、数サイクルレーザー用光学素子の基盤技術を支える。



図 4.6-5 SiO₂/ MgF₂による多層膜ミラーの反射率特性



図 4.6-6 SiO₂とMgF₂を用いた低分散ミラーの反射特性と群速度遅延.

4.7 アダプティブ制御を用いた超短パルスレーザーのコンパクト化に向けた展開

4.7.1 CW 光のコヒーレント結合による超短パルス光源(大阪大学 宮永グループ、浜松ホトニクス 川嶋グループ)

一般的に、ピコ秒~サブピコ秒の高繰返しレーザーの開発は主にモード同期発振による方法 が用いられてきた。特に、チタンサファイアをレーザー媒体としたモード同期発振器では繰返し率 100MHz、パルス幅が10fs、レーザー出力300mWを超えるものが既に製品化されている。しか しながら、これらは精密な調整が必要な上、設置環境(温度・湿度)にも十分に配慮する必要があ る。これまでの研究開発によって小型化が進められたが、現状では数m²~10数m²の設置面積 を必要とする。また価格においても1000万円以上するものが一般的であり、容易に導入できる 装置ではない。

一方、半導体レーザーをモード同期発振させることで高繰返しサブピコ秒パルスを得ることができる。この方法により繰返し率300MHz ~240GHz、パルス幅 10ps~400fs を切るレーザー 出力が得られている。繰り返し率が高いためパルスあたりのエネルギーは数 pJ、ピークパワーは 数 W 程度が現状における最高値である。この方法は半導体レーザーを用いていることから、小 型軽量、機械的に安定、低消費電力、低コストといったメリットがある。しかしながら半導体レーザ ーの共振器長は実際上、ある長さに制限されるためさらなる高出力化は難しい。

そこで、従来のモード同期レーザーにおける縦モードの同期を空間的な周波数コムアレイの位相同期に置き換えることによって、超短パルス光源の小型化を実現できる可能性がある。具体的には、異なる周波数(波長)で連続(CW)発振あるいは増幅する多数の半導体レーザーやファイバーレーザーを位相同期し分散素子を用いて合波することによって、高出力の高繰り返し短パルスレーザーを発生させることが可能である。

原理実証実験として、分布帰還型半導体レーザー(DFB-LD)を3 台用いて合波した場合の パルス発生実験を行った。図4.7-1に構成図を示す。光源に用いたLDの波長は、1550.780nm、 1550.783nm、1550.786nm、波長間隔は0.03nm(周波数間隔は370MHz)とし、これを偏光 ビームスプリッターキューブ(PBS)およびビームスプリッター(BS)を用いて同軸上に配置させた。 直交偏光成分を合波させるために半波長板(\/2)および偏光子(PL)を用いた。光出力をフォト ダイオード(PD)で検出しRFスペクトルアナライザーで観測した結果を図4.7-1の挿入図に示す。 3 つの光源相互の差周波である、370MHzおよび740MHzが観測された。

CW 光を3分波光とし、それらを再合波した時の合波パルス列を図4.7-2に示す。パルス繰返し率370MHz、パルス幅は900psのパルス列が得られた。理想的には、ピーク出力は光源1つの場合に比べてN2=32=9倍になるが、光源の波長安定性、位相ドリフトの影響からピーク出力の増加は約7.3倍であった。したがって、より多くのCW光を合波することで、さらに高ピーク化、短パルス化を実現することができる。



なお、上記の原理実証実験結果を基に、国内特許(特開 2012-078812)及び、海外特許出願 を行った。



図 4.7-1 CW-LD 光のコヒーレント結合実験 配置図. 挿入図はビート信号を示す.

図 4.7-2 コヒーレントに合波されたパル ス列.

4.7.2 光パラメトリック過程を用いたビーム結合(大阪大学 宮永グループ、浜松ホトニクス 川嶋グ ループ)

超短パルスレーザーの高強度化は世界の流れであり、増幅器の大型化(大口径化)だけでなく、 コヒーレントビーム結合が必須となっている。そこで、本研究における重要な増幅手法である光パ ラメトリック増幅(OPA)過程を用いたビーム結合の方式を発案し、その原理実証を行った。

本方式では、大口径の単一結晶を用い、OPA を多ビームで励起する。その際に、励起ビーム 間の位相ステップ誤差は信号光の増幅時に発生するアイドラー光の空間位相分布に押しやられ、 高ビーム品質の信号光増幅が可能となる。実験では、Nd:YAGレーザーの2倍高調波パルス(波 長 532nm)を励起光とし、Nd:YLF レーザーパルス(波長 1053nm)を信号光としてもしいた。結 果を図 4.7-3 に示す。励起光の近視野(NFP)位相分布がランダム配列をしていることをマイケル ソン干渉計で確認した。これらのランダム位相配列によって励起光の遠視野パターン(FFP)はス ッペクルとなる。このスペックル構造は、明らかにアイドラー光のそれに引き継がれるが、信号光 の FFP は良好なガウシアン形状となっている。Encircled energy の解析から、増幅された信号 光のビーム品質はほぼ回折限界であることが確かめられた。

この方式によって能動的コヒーレントビーム結合が不要となり、また、励起光には広帯域を必要 としないため、超短パルスレーザーの大出力化に大きく貢献することができる。なお、上記の原理 実証実験結果を基に、国内特許出願(特開 2011-203648)を行った。



図 4.7-3 ランダム位相多ビーム励起の光パラメトリック増幅. (a): ランダム位相板 及び位相分布. (b): 励起光、アイドラー光、信号光の遠視野パターンの比較.

4.7.3 光パラメトリック増幅の超広帯域化のための非線形光学材料の探索(原研機構関西研 山川 グループ、大阪大学 宮永グループ)

4.7.3 項で述べた多ビーム励起 OPA を実用化するには、超広帯域、大口径、かつレーザー損 傷耐力の高い非線形光学結晶が必要となる。そこで、本研究では、かつて核融合レーザーの高 調波変換帯域の拡大のために研究された部分重水素化 KDP(pDKDP)の活用を思い立った。 実験には 4.5.1 項で述べた Yb:YLF ピコ秒レーザーの2倍高調波(波長 515nm)を励起源とし、 OPCPAの光学系は 4.5.1 項で述べたものを利用した。図 4.7-4(a)に示すように、波長 1µm 帯に おける KDP と DKDP の位相整合角の波長依存性は下に凸、上に凸の逆の特性をもっている。 従って、重水素化率を最適化することによって、より広帯域での OPCPA が可能となる。図 4.7-4(b)に示すように、利得~2×10⁶ で~250nm の増幅帯域が達成できた。また、重水素化率を 最適化することによって、さらなる広帯域化が可能である。図 4.7-5 は、本研究の基幹装置のお ける OPCPA 励起源波長(Nd:ガラスレーザーの2倍高調波: 527nm)に対する増幅帯域スペクト ルである。重水素化率を 60%に調整することによって、BBO、KDP、DKDP に比べて格段に広 帯域化が可能となり、中心波長 1.1µm に対して 500nm の利得帯域が期待できる。







図 4.7-5 励起波長 527nm に対する OPCPA 利得帯域.

4.7.4 チャープパルス増幅に代わる手法としての時間・空間分散パルス増幅(大阪大学 宮永グル ープ、浜松ホトニクス 川嶋グループ)

従来の超短パルスレーザーの増幅で用いられているチャープパルス増幅方式は、まず回折格 子やプリズムなどの分散媒質で構成されるパルス伸長器を用いて、超短パルスに含まれる波長 毎に光路差を付けることでパルス幅を時間的に伸長する。その後増幅等を行ったあとに、パルス 伸長器と逆の群遅延分散特性をもつパルス圧縮器によって、再び超短パルス光に発生させる。 この場合、パルス伸長器と圧縮器は対で用いなければならず、超短パルスの高強度レーザーを 発生させる場合には、装置サイズが非常に大型化してしまう傾向がある。また、信号光は時間的 にチャープしているが、空間的には分散していないので増幅後の帯域が元の帯域より狭くなる、 いわゆる利得の狭帯域化が発生し、超短パルス化する上で問題となる。

そこで、チャープパルス増幅に代わる増幅手法として、時間・空間分散パルス増幅(STDPA, Spatiotemporally dispersed pulse amplification)法による超短パルス光源の開発を行った。 本方式は、超短パルスレーザー光の広帯域の周波数(波長)成分を空間的に分散(分光、フーリ エ変換)した際に、周波数成分ごとの時間幅が自動的に伸びることを利用し、それぞれの周波数 成分を異なる空間位置で増幅した後に逆フーリエ変換して高強度の超短パルスを得るというもの である。これは従来のチャープパルス増幅と異なり、パルス伸長器や圧縮器が不要になりシステ ムが極めてシンプルとなるだけでなく、利得の狭帯域化も抑制することができる。原理実証実験を 行うために、増幅器は基幹装置のLD励起 Nd ガラス増幅器(図 4.1・1④)を用いた。モード同期 Yb ファイバー発振器の出力の一部を干渉フィルタにより抽出し、これを種光源とした(出力 20mW、繰返し率 74.1MHz、パルスエネルギー0.27nJ、パルス幅 250fs、中心波長 1053nm、 スペクトル幅 10nm(1/e²))。図 4.7-6 に STDPA 実証実験の構成図を示す。STDPA は 2 組の 4f 光学系[溝本数 900lines/mmの反射型回折格子(G₁₋₂)と焦点距離 508mmのレンズ(L₁₋₂)、 および溝本数 1200lines/mmの反射型回折格子(G₃₋₄)と焦点距離 508mmのレンズ(L₃₋₄)]を 用いて行った。図 4.7-6の挿入図はG₁₋₂の組み合わせにおけるフーリエ面でのビームパターンを 示す。STDPA の利得特性および出力パルスエネルギーを図 4.7-7 に示す。LD 電流値 100A の時、STDPA 利得 352 倍、パルスエネルギー0.32µJ が得られた。挿入図は合波後のビームパ ターンを示している。フーリエ面におけるパルス幅は入射ビーム径および回折格子のパラメータ より、1.6ps(G₁₋₂)および 2.5ps(G₃₋₄)と計算された。



図 4.7-6 STDPA の構成図. 挿入図は G₁₋₂の回折 格子対のフーリエ面のビームパターンを示す.

図 4.7-7 LD 電流に対する STDPA 利 得と出力パルスエネルギー.

合波後のスペクトルおよびパルス特性を、図 4.7-8(a)および(b)にそれぞれ示す。パルス幅は 自己相関計を用いて評価した。増幅前のスペクトル幅 8.2nm、増幅後のスペクトル幅は 6.5nm であった。パルス幅は 520fs (FWHM)であった。このときのピーク出力は 0.6MW に達した。さら に、利得の狭帯域化の抑制効果を確かめるために、通常の多重パス増幅をした場合のスペクト ル幅の変化を測定したところ、9.6nm→4.8nm にスペクトルが狭帯域化した。この結果より、 STDPA は利得狭帯域化を抑制するトでも有効な増幅手法であることが実証された。



図 4.7-8 (a): STDPA のスペクトル. (b): 再構成後の自己相関波形.

さらなる高強度化を図る場合、STDPA は光パラメトリック増幅と組み合わせて用いることで、さらに優位性が発揮される。通常、高強度レーザー開発において、光学部品のレーザー損傷を避けるためにビーム径を拡大しフルーエンスを下げる必要がある。例えばビーム径を50mm~100mm とした場合、溝本数 1200lines/mm の回折格子を用いれば、増幅器でのパル

ス幅は50ps~100psに自動的に伸長される。したがって、Yb:YAGなどのLD励起固体レーザーを励起源とした、時間・空間分散光パラメトリック増幅システムを構成すれば、コンパクトな高強度な超短パルスレーザーシステムを実現できる可能性がある。

なお、上記の原理実証実験結果を基に国内特許(特開特開 2012-078813、他1件)及び、海 外特許出願を行った。

4.8 研究成果の今後期待される展開

(a) 基幹装置の利用研究

基幹装置は、この報告書執筆時点では、残念ながら目標達成に至っていないが、残りの研究 期間内に仕上げる努力をしている。性能的には、短パルス性、ピーク強度の高さで世界的にもユ ニークな装置となる。この装置を多様なレーザープラズマ相互作用の研究に供していきたいと考 えている。

(b) 半導体レーザー励起高出力 CPA ガラスレーザー

OPCPA 励起用大出力レーザーの開発に成功した。これにより、ジュール級のパルスエネルギー(~3J)、ピコ秒のパルス幅が繰返し動作可能(~10Hz)となった。これは、励起光源として用いてさらなる短パルス光の発生を可能にするだけでなく、励起光源自体を用いて数 TW 級の高強度実験をも可能にする。例えば、大パルスエネルギーを生かして中性子発生が可能であり、燃料電池をはじめ各種分析・評価に利用するといった展開が考えられる。

(c) コンパクト超短パルス光源

また本プロジェクトでは、特に超短パルス光源の発生および増幅技術に大幅な進展があった。 Yb ファイバーを用いた受動モード同期発振器の開発では、波長 950nm~1090nm にわたる広 帯域光の発生に成功した。これにより、超短パルス光源としてだけでなく、1µm 帯の光源を必要 とする応用の波長可変光源としての利用も期待できる。さらに、これらの超短パルス光源は、時 間・空間分散光による光パラメトリック増幅を行う事で、従来にくらべて小型かつ高出力なレーザ ーシステムの構築が可能となる。

なお、産業の超短パルスレーザーについては、現在、ファイバーCPAとThin disk タイプのものが精力的に開発されている。本研究で開発した22fs発振器とファイバーCPAの組み合わせにより、1ビーム当たり100W程度の光源が可能となる。

さらに、将来の産業用超短パルスレーザーは半導体レーザーで置き換えられると予想され、 4.7.1 項で試験したような LD アレイの周波数コムを位相同期した高繰り返しピコ秒・フェムト秒光 源が実用化されれば、装置の安定性やフォトンコストの低減が可能となると期待される。

(d) 超高強度レーザー技術への波及効果

本研究の「半導体レーザー励起 CPA 固体レーザー」、「多ビーム励起 OPA によるビーム結合」、 「大口径化が可能な部分重水素化 KDP による超広帯域 OPCPA」を組み合わせることにより、世界に先駆けて超高強度といわれるエクサワット級、さらにはゼタワット級のレーザー光の発生の可能性も見えてくる。これらが実現されれば、これまで不可能と言われた高強度場での実験が可能になり、未知の物理の解明などが進み、科学技術の発展に大いに資するものと期待される。

(e) Yb 系高繰り返し高出力固体レーザー

高繰り返し Yb 添加高出力固体レーザーの開発により、阪大レーザー研で進めている半導体レ ーザー励起高出力 Nd:ガラスチャープパルス増幅システムとは互いに異なる特性を持つレーザ ー材料を用いたシステム開発を相補的に進めることができ、将来の高エネルギー・高平均出力 LD 励起固体レーザーシステムの設計開発に必要な基礎データを幅広く、かつ効率よく取得する ことが可能となる。類似の研究開発は欧州を中心に精力的に進められているが、単一グループ による研究が主なため、総合的な研究開発には到っていない。よってこれらの研究開発を推進す ることで、この分野における日本の研究開発レベルを一気に世界トップレベルに押し上げることも 不可能ではないと考えている。

一方、新たに提案したアイドラーを利用した光パラメトリック増幅で簡便な能動分散補正が可能

になり、これまで産業分野への普及が遅れていたフェムト秒 CPAレーザーがシンプルで堅牢、高効率な実用的フェムト秒 CPA レーザーとしてレーザー加工現場の様な厳しい環境でも利用可能になると考えている。

(f) 多層膜素子、光学材料データベースの活用

多層膜素子、光学材料の高耐力化データベースは未だ十分とは言えないが、本研究で蓄積された現状、基礎データ、損傷メカニズムへの理解は、高強度レーザー用光学素子のみならず、 様々な高出力レーザー用光学素子の耐力、寿命の向上へ重要な指針を示すものである。

超短パルスレーザーに対するレーザー損傷耐力と光学素子材料のバンドギャップとの関係は、 更に理論的、実験的な評価が必要である。例えば、SiO2薄膜と、石英ガラスは同じ組成でありな がら、レーザー損傷閾値は未だ2倍異なる。つまり、薄膜特有の欠陥準位を軽減することにより、 更なる高耐力化は可能と考えられる。そのためには、種々の成膜技術、成膜条件との関係を明ら かにするとともに、混合材料などを検討することにより新たな高耐力化へのアプローチが期待でき る。

これらの研究成果を基にして、さらに広帯域分散補償光学素子、広帯域偏光素子、広帯域回折格子などの開発へ拡げることにより、高強度レーザーの利用が可能となると考えている。

§5 成果発表等

(1) 原著論文発表 (国内(和文)誌 11 件、国際(欧文)誌 20 件)

- 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, **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, **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 LuLiF₄ crystal," Optics Letters, **33**, pp. 494-496 (2008).
- 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, vol. 47, No. 6, pp. 4592-4594 (2008).
- 5. T. Harimoto and K. Yamakawa "Recompression of a Femtosecond Second-Harmonic Pulse Based on Combined Action of Group-Velocity Dispersion and Phase Modulations in a Potassium Dihydrogen Phosphate Crystal", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. **47**, No. 6, pp. 4547-4551 (2008).
- 6. 小澤祐貴, 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位相シフトの数値解析」, レーザー研究, Vol.36, No. 6, pp. 374-378 (2008).
- 7. 山川考一, 青山 誠, 赤羽 温, 小川 奏, 辻 公一「超高強度数サイクルレーザー」レー ザー研究, Vol.36, No. 9, pp.555-561 (2008).
- 8. Baozhen Zhao, Yongliang Jiang, Keiich Sueda, Noriaki Miyanaga, and Takayoshi Kobayashi, "Ultrabroadband noncollinear optical parametric amplification with LBO crystal", Optics Express, Vol. **16** Issue 23, pp.18863-18868 (2008).
- 9. R. Yasuhara, S. Tokita, J. Kawanaka, T. Kawashima, H. Kan, H. Yagi, H. Nozawa, T. Yanagitani, Y. Fujimoto, H. Yoshida, and M. Nakatsuka,

"Development of cryogenic TGG ceramic based Faraday rotator for inertial fusion driver", Journal of Physics: Conference Series, The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, **112**, 032059 (2008).

- 10. 宮永憲明, "大出力レーザー応用の拡がり", レーザー研究, 36, pp.530-537 (2008).
- 11. 山川考一, 青山 誠, 赤羽 温, 小川 奏, 辻 公一, "超高強度数サイクルレーザー", レ ーザー研究, **36**, pp.555-561 (2008).
- 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, 17, 7744-7749 (2009).
- 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, 17, 17711-17714 (2009).
- 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, 2, pp. 072503-1-072503-3 (2009).
- T. Harimoto and K. Yamakawa, "Analytical Expressions for Small-Signal and Saturation Processes of Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification", Japanese Journal of Applied Physics, 48, pp. 098005-1 – 098005-2 (2009).
- 16. 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).
- 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., 282, pp. 2199-2203 (2009).
- 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).
- 19. T. Kurita, K. Sueda, T. Sekine, T. Kawashima, and N. Miyanaga, "2.4-Joule chirped pulse operation by a laser-diode-pumped slab laser for pumping non-collinear OPCPA", Institute of Physics, Journal of Physics: Conference Series, Vol. **244**, Issue 3, p. 032009-032009 (2010).
- 20. 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).
- 21. 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, 38, p.458 (2010).
- 22. 三上勝大,本越伸二,藤田雅之,實野孝久,高井正憲,宰原健二,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,38, p.620 (2010).
- 23. 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, 38, p.779, (2010).
- 24. 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.p. 14541-14546 (2010).
- 25. K. Mikami, "Laser-induced damage thresholds in silica glasses at different temperature", SPIE, **7504**, p.p.A-1 A-7 (2010).
- 26. Kurita, H. Yoshida, H. Furuse, T. Kawashima, and N. Miyanaga, "Dispersion compensation in an Yb-doped fiber oscillator for generating transform-limited, wing-free pulses", Opt. Express, **19**, pp. 25199-25205 (2011).
- 27. 本越伸二, "レーザー誘起電子雪崩蛍光法による高バンドギャップ材料の検出", レーザ

一研究, Vol. 39, No.12, pp.923-926 (2011).

- 28. 三上勝大,本越伸二,藤田雅之, 實野孝久,田中和夫, "Z-Scan 法を用いた石英ガラ スの非線形屈折率測定",レーザー研究, Vol. **39**, No.12, pp.927-930 (2011).
- 29. S. Motokoshi, K. Kato, T. Somekawa, K. Mikami and T. Jitsuno, "Database on Damage Thresholds of Picoseconds Pulse for HR Coatings", Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2011, SPIE **8190**, pp.81900I-1–I-5 (2012).
- 30. K. Mikami, S. Motokoshi, M. Fujita, T. Jitsuno and K. Tanaka, "Laser-Induced Damage Thresholds of Optical Coatings at Different Temperature", Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2011, SPIE **8190**, pp.81900A-1-A-7 (2012).
- 31. T. Kurita, H. Yoshida, T. Kawashima, and N. Miyanaga, "Generation of sub-7-cycle optical pulses from a mode-locked ytterbium-doped single-mode fiber oscillator pumped by polarization-combined 915 nm laser diodes", Opt. Lett. Vol. 37, No. 19, p.p. 3972-3974 (2012).

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

- 1. 栗田隆史, 末田敬一, 関根尊史, 松本 修, 川嶋利幸, 河仲準二, 宮永憲明, "半導体 レーザー励起 Nd:ガラス CPA レーザーシステムによる非同軸光 OPCPA 励起光源の開 発", レーザー学会第 375 回研究会資料集,「高機能固体レーザーとその応用」(千里ラ イフサイエンスセンター, 大阪, 2008 年 7 月).
- 2. 山川 考一, 赤羽 温, 小川 奏, 辻 公一, 青山 誠, "パルス伸張・圧縮に同一の正分 散媒質を用いた光パラメトリックチャープパルス増幅法", 電気学会研究会資料, 光量子 デバイス研究会 OQD-09-61(熊本大学, 熊本, 2009 年 9 月)
- 3. 宮永憲明, "高出力 Yb 添加固体レーザーの現状と今後の展開", 光学, 第 38 巻, 第 1 号 pp.2-9 (2009).
- 4. J. Kawanaka, R. Yasuhara, S. Pearce, T. Kawashima, and H. Kan, "Efficient, High-Power, Repeatable, Cryogenic Yb:YAG MOPA System," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'09, OSA), Technical Digest, CFD5 (2009).
- 5. H. Furuse, T. Saiki, K. Imasaki, M. Fujita, S. Ishii, K. Takeshita, N. Miyanaga, and J. Kawanaka, "Total-Reflection Active-Mirror Laser with Directly Liquid-Nitrogen-Cooled Yb:YAG Ceramics," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'09, OSA), Technical Digest, CThR2 (2009).
- 6. J. Kawanaka, R. Yasuhara, Y. Takeuchi, S. Pearce, T. Kawashima, and H. Kan, "Development of High Power Yb:YAG Pump Source for Few Cycle Pulse Amplification," Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe (CLEO/Europe'09, EPS, IEEE, OSA), Technical Digest, CA7.4 (2009).
- H. Furuse, T. Saiki, M. Fujita, K. Imasaki, S. Ishii, K. Takeshita, N. Miyanaga, and J. Kawanaka, "High Efficient Cryogenically-Cooled Yb:YAG Active-Mirror Laser Using Total-Reflection Geometry," Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe (CLEO/Europe'09, EPS, IEEE, OSA), Technical Digest, CA3.3 (2009).
- 8. Y. Takeuchi, J. Kawanaka, and M. Fujita, "Nonlinear Refractive Index of a YAG Crystal at Low Temperature," Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe (CLEO/Europe'09, EPS, IEEE, OSA), Technical Digest, CA.P.24 (2009).
- 9. Y. Akahane, K. Ogawa, K. Tsuji, M. Aoyama, and K. Yamakawa, "Compression of idler pulses with an identical positive dispersive media to signal pulse stretcher in ultrafast optical-parametric chirped-pulse amplification", Proc. of SPIE 7589-75890 (2010).
- 10. 赤羽 温, 小川 奏, 山川 考一, "アイドラーパルス圧縮における高強度フェムト秒レーザ 一光発生", 電気学会研究会資料, 光・量子デバイス研究会 OQD-10-48 (pp.11-14)

2010年12月.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

- ① 招待講演(国内会議 4件、国際会議 9件)
 - 1. 山川考一(日本原子力研究開発機構),"高強度テーブルトップレーザーが切り拓く量 子ビームテクノロジー",第6回エクストリーム・フォトニクス研究会「先端光源開発と量 子科学への応用」,ホテル竹島,2007年11月14日.
 - 2. K. Yamakawa(日本原子力研究開発機構), "Ultrafast, High Intensity Lasers: Challenges and Perspectives", Coast/Coral Winter School on Advanced Laser Science, Echigo Yuzawa, Japan, 2008 年 1 月 17 日.
 - J. Kawanaka(大阪大学), Y. Takeuchi, T. Nakanishi, H. Furuse, H. Yoshida, N. Miyanaga, R. Yasuhara, T. Kawashima, and H. Kan, "Efficient, High-Pulse-Energy, Repeatable, Cryogenic Yb:YAG MOPA System," The 5th Asian Symposium on Intense Laser Science (ASILS-5), S-10 (2009).
 - 4. 山川考一(日本原子力研究開発機構), "ペタワットレーザー:極限の光強度を目指して」、応用物理学会特別シンポジウム「レーザー:生誕から半世紀を経て,新時代を切り拓く究極の光を求めて進化し続けるその魅力とは?", 長崎大学, 2010 年 9 月 15日.
 - 5. 山川考一(日本原子力研究開発機構), "超短パルス光パラメトリック増幅法", 第6回 超高速光エレクトロニクス研究会「超高速光技術の将来展望」, 筑波山 江戸屋, 2010年12月3日.
 - K. Yamakawa (日本原子力研究開発機構), "Optical-Parametric Chirped-Pulse Amplification using a Positive Dispersive Material for Pulse Stretching and Compression", IEEE Annual Photonics Society Meeting 2010, Denver, CO, USA, 11 November, 2010.
 - K. Yamakawa (日本原子力研究開発機構), "Cryogenically-cooled ytterbium-doped solid-state lasers and their applications", International Symposium on Chirped Pulse Amplification (25th anniversary of the invention of CPA), Quebec, Canada, 20 November, 2010.
 - 8. 山川考一(日本原子力研究開発機構) "低温冷却型 Yb 添加高出力固体レーザー", レーザー学会学術講演会第31回年次大会, TKP 仙台カンファレンスセンター(宮城 県仙台), 平成24年年1月31日.
 - 9. N. Miyanaga (大阪大学), "Advanced Technology for High-energy Ultra-intense Laser", Summer Meeting of Optical Society of Korea, BEXCO, Busan, July, 14, 2011 (Plenary talk).
 - 10. N. Miyanaga (大阪大学), "Construction of LFEX PW Laser and Conceptual Design of Sub EW Laser at Osaka University", IQEC/CLEO Pacific Rim 2011, Sydney Convention and Exhibition Centre, Sydney, August 31, 2011.
 - 11. N. Miyanaga(大阪大学), *et. al.*, "Intense few cycle laser based on OPCPA pumped by LD-pumped by Nd: glass laser", The 8th Asia Pacific Laser Symposium (APLS 2012), Huangshan City, China, May 27-30, (2012).
 - 12. K. Yamakawa, (日本原子力研究開発機構), "Cryogenically-cooled ytterbium-doped solid-state laser technologies for OPCPA pumping", 5th Asian Workshop on Generation and Application of Coherent XUV and X-ray Radiation (5th AWCXR) and the ISSP International Workshop on Coherent Soft X-ray Sciences, Chiba, Japan, June 29, (2012).
 - 13. N. Miyanaga (大阪大学), *et. al.*, "I Development of intense and high-average-power femtosecond lasers based on OPCPA pumped by solid-state lasers", 5th Asian Workshop on Generation and Applications of Coherent XUV and X-ray Radiation (5thAWCXR), Kashiwa Campus, The University of Tokyo, June 27-29, (2012).

- ② 口頭発表 (国内会議 40 件、国際会議 39 件)
 - 1. 市木孝征(大阪大学),本越伸二(レーザー技術総合研究所),他,"ピコ秒レーザー による光学薄膜のレーザー損傷",レーザー学会学術講演会第 28 回年次大会,名 古屋国際会議,2008年1月30日.
 - 2. J. Kawanaka(大阪大学), et al., "Generation of Energetic Beam Ultimate (GENBU) Laser Main Laser -", The 6th Asia Pacific Laser Symposium (APLS 2008) Nagoya Congress Center, Nagoya, 2008 年 1 月 31 日.
 - K. Yamakawa(日本原子力研究開発機構), et al., "Generation of Energetic Beam Ultimate (GENBU) Laser -OPCPA Laser -," The 6th Asia Pacific Laser Symposium (APLS 2008) Nagoya Congress Center, Nagoya, 2008 年 1 月 31 日.
 - 4. T. kurita (浜松ホトニクス), *et al.*, "Chirped pulse amplification of high-energy diode-pumped zig-zag slab laser", The 6th Asia Pacific Laser Symposium (APLS 2008) Nagoya Congress Center, Nagoya, 2008 年 1 月 31 日.
 - 5. K. Sueda (大阪大学), *et al.*, "Generation of self-phase-stabilized pulses for intense few-cycle laser system", The 6th Asia Pacific Laser Symposium (APLS 2008) Nagoya Congress Center, Nagoya, 2008 年 1 月 31 日.
 - 6. 宮永憲明(大阪大学), "大出力レーザーの現状と将来", レーザー学会学術講演会 第 28 回年次大会「シンポジウム 新産業基盤の創成をめざす次世代大出力レーザ ー開発」名古屋国際会議場, 2008 年 2 月 1 日.
 - 7. 河仲準二(大阪大学レーザーエネルギー学研究センター), "超広帯域増幅と数サイ クルレーザー: GENBU-主レーザー", レーザー学会学術講演会第 28 回年次大会 「シンポジウム 新産業基盤の創成をめざす次世代大出力レーザー開発」名古屋国 際会議場, 2008 年 2 月 1 日.
 - 8. 山川考一(日本原子力研究開発機構), "超広帯域増幅と数サイクルレーザー: GENBU-OPCPAレーザー", レーザー学会学術講演会第28回年次大会「シンポジ ウム 新産業基盤の創成をめざす次世代大出力レーザー開発」名古屋国際会議場, 2008年2月1日.
 - 9. 赤羽 温(日本原子力研究開発機構),他,"低温冷却 Yb:LLF 結晶を用いたピコ秒 再生チャープパルス増幅器",第 55 回応用物理学関係連合講演会,日本大学船橋 キャンパス,2008年3月30日.
 - 10. Y. Akahane(日本原子力研究開発機構), M. Aoyama, A. Sugiyama, R. Kubo, K. Ogawa, K. Tsuji and K. Yamakawa, "Multi-millijoule, diode-pumped, picosecond regenerative amplifier at 999-nm wavelength with cryogenically-cooled Yb3+:LuLiF4 crystal", CLEO/QELS 2008 (San Jose, USA) 2008/5/8
 - M. Aoyama(日本原子力研究開発機構), K. Ogawa, Y. Akahane, K. Tsuji, A. Sugiyama, J. Kawanaka, H. Nishioka, M. Fujita, and K. Yamakawa, "High-energy, diode-pumped, cryogenically-cooled Yb:LiYF4 chirped-pulse amplification system", CLEO/QELS 2008 (San Jose, USA) 2008/5/8
 - 12. 栗田隆史(浜松ホトニクス),末田敬一,関根尊史,松本 修,川嶋利幸,河仲準二, 宮永憲明,"半導体レーザー励起 Nd:ガラス CPA レーザーシステムによる非同軸光 OPCPA 励起光源の開発",レーザー学会第 375 回研究会「高機能固体レーザーと その応用」(千里ライフサイエンスセンター,大阪,2008 年 7 月)
 - 13. 末田敬一(大阪大学),栗田隆史,関根尊史,川嶋利幸,山川考一、藤田雅之、河仲 準二、小林孝嘉、宮永憲明, "高出力数サイクルレーザー用励起光源の開発", 2008 年秋季 第 69 回応用物理学会学術講演会、2008 年 9 月 2 日
 - 14. 小川 奏(日本原子力研究開発機構), 赤羽 温, 青山 誠, 辻 公一, 河仲準二, 西 岡 一, 藤田雅之, 山川考一, "超広帯域光パラメトリックチャープパルス増幅システム (6)・LD 励起低温冷却型 Yb:YLF チャープパルス増幅システムの高エネルギー化

-", 第 69 回応用物理学会学術講演会(中部大)、2008 年 9 月 4 日

- 15. 三上勝大(レーザー総研),本越伸二,藤田雅之,實野孝久,河仲準二,安原亮, "低温条件下における光学材料の損傷閾値(3)",応用物理学会,中部大学,平成 20年9月3日
- 16. S. Motokoshi(レーザー総研), K. Mikami, T. Jitsuno, M. Fujita, J. Kawanaka, R. Yasuhara, "Laser Damage thresholds of Silica Glasses at Low Temperature", Boulder Damage Symposium 2008、米国コロラド州, 平成 20 年 9月 24 日
- K. Yamakawa(日本原子力研究開発機構), M. Aoyama, Y. Akahane, K. Tsuji, K. Ogawa, T. Harimoto, J. Kawanaka, H. Nishioka and M. Fujita, "Ultra-broadband optical parametric chirped-pulse amplification using a cryogenic-cooled Yb:YLF pump laser", Frontiers in Optics 2008 (Rochester, USA) 2008/10/23.
- 18. T. Kurita (浜松ホトニクス), K. Sueda, T. Sekine, T. Kawashima, J. Kawanaka, and N. Miyanaga, "1.04-J CPA Output from Diode-Pumped Nd:glass Zig-Zag Slab Laser for 30 TW Few-Cycle NOPA Laser System", OSA 92nd Annual Meeting, Frontiers in Optics 2008, (Rochester, USA, Oct. 2008), PDPA6.
- K. Yamakawa(日本原子力研究開発機構), M. Aoyama, Y. Akahane, K. Tsuji, K. Ogawa, T. Harimoto, J. Kawanaka, H. Nishioka and M. Fujita, "Bandwidth enhancement of optical parametric chirped-pulse amplification by temporally delayed twin pump beams", LEOS Annual Meeting 2008 (Newport Beach, USA) 2008/11/13
- 20. 本谷 匡(大阪大学),末田敬一,栗田隆史,関根尊史,川嶋利幸,山川考一,藤田 雅之,河中準二,小林孝嘉,宮永憲明,"高出力数サイクルレーザー励起光源の開 発",レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会,2009 年 1 月 10 日
- 21. 栗田 隆史(浜松ホトニクス),末田 敬一,関根 尊史,川嶋 利幸,河仲 準二,宮 永 憲明, "30TW 数サイクル NOPA システム励起用 LD 励起 Nd:glass ジグザグスラ ブ CPA レーザーの開発",レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会(徳島大学, 2009 年 1 月 10-12 日)10pI05.
- 22. Keiichi Sueda (大阪大学), Takashi Kurita, Takashi Sekine, Z. Baozhen, Osamu Matsumoto, Toshiyuki Kawashima, Koichi Yamakawa, Masayuki Fujita, Junji Kawanaka, Takayoshi Kobayashi, Noriaki Miyanaga, "Chirped Pulse Amplification System Using Nd-Doped Zig-Zag Glass Slab Pumped by Laser diodes", Advanced Solid-State Photonics 2009.
- 23. J. Kawanaka (大阪大学), R. Yasuhara, S. Pearce, T. Kawashima, and H. Kan, "Efficient, High-Power, Repeatable, Cryogenic Yb:YAG MOPA System," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'09, OSA), CFD5, May, 2009.
- 24. H. Furuse (レーザー総研), T. Saiki, K. Imasaki, M. Fujita, S. Ishii, K. Takeshita, N. Miyanaga, and J. Kawanaka, "Total-Reflection Active-Mirror Laser with Directly Liquid-Nitrogen-Cooled Yb:YAG Ceramics", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'09, OSA), CThR2, May, 2009.
- 25. Jiang, Yongliang (大阪大学); Zhao, Baozhen; Sueda, Keiich; Miyanaga, Noriaki; Kobayashi, Takayoshi, "Generation of Sub-20fs Ultraviolet Pulses with Achromatic Phase-Matching Sum Frequency Mixing", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Baltimore, Maryland, May 31, 2009.
- 26. J. Kawanaka (大阪大学), R. Yasuhara, T. Kawashima, H. Kan, H. Furuse, T. Saiki, M. Fujita, and N. Miyanaga, "Recent Status of GENBU-Laser -Main Laser-," International Workshop on High-Energy-Class Diode-Pumped Solid-State Lasers (HEC-DPSSL'09, Forschungszentrum Dresden), June 1-3 (2009).

- 27. Y. Takeuchi (大阪大学), J. Kawanaka, and M. Fujita, "Temperature dependence of nonlinear refractive index of YAG crystal," International Workshop on High-Energy-Class Diode-Pumped Solid-State Lasers (HEC-DPSSL'09, Forschungszentrum Dresden), June 1-3, 2009.
- 28. J. Kawanaka (大阪大学), H. Furuse, T. Saiki, M. Fujita, K. Imasaki, S. Ishii, K. Takeshita, and N. Miyanaga, "Total-Reflection Active-Mirror (TRAM) Laser with Directly Liquid-Nitrogen-Cooled Yb:YAG Ceramics," International Workshop on High-Energy-Class Diode-Pumped Solid-State Lasers (HEC-DPSSL'09, Forschungszentrum Dresden), June, 2009
- 29. Y. Takeuchi (大阪大学), A. Yoshida, J. Kawanaka, R. Yasuhara, T. Kawashima, and H. Kan, "Regenerative Amplifier by Using TRAM at Low Temperature", International Workshop on High-Energy-Class Diode-Pumped Solid-State Lasers (HEC-DPSSL'09, Forschungszentrum Dresden), June 1-3, 2009
- 30. J. Kawanaka (大阪大学), R. Yasuhara, Y. Takeuchi, S. Pearce, T. Kawashima, and H. Kan, "Development of High Power Yb:YAG Pump Source for Few Cycle Pulse Amplification," Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe (CLEO/Europe'09, EPS, IEEE, OSA), CA7.4 June, 2009
- 31. H. Furuse (レーザー総研), T. Saiki, M. Fujita, K. Imasaki, S. Ishii, K. Takeshita, N. Miyanaga, and J. Kawanaka, "High Efficient Cryogenically-Cooled Yb:YAG Active-Mirror Laser Using Total-Reflection Geometry," Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe (CLEO/Europe'09, EPS, IEEE, OSA), CA3.3 June, 2009.
- 32. Y. Takeuchi(大阪大学), J. Kawanaka, and M. Fujita, "Nonlinear Refractive Index of a YAG Crystal at Low Temperature," Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe (CLEO/Europe'09, EPS, IEEE, OSA), CA.P.24 June, 2009
- B-Z. Zhao(大阪大学), Y-L. Jiang, K. Sueda, N. Miyanaga, T. Kobayashi, "Sub-20fs Ultraviolet Pulses Generated by Achromatic Phase-matching Sum Frequency Mixing", Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim (CLEOPR) 2009, Shanghai, China, 30 August – 3 September, 2009.
- 34. K. Sueda (大阪大学), T. Kurita, T. Sekine, B-Z. Zhao, Y-L. Jiang, O. Matsumoto, T. Kawashima, K. Yamakawa, J. Kawanaka, M. Fujita, N. Miyanaga, "Chirped pulse amplification laser using Nd:glass zig-zag slab pumped by laser diodes", The European Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO_E) 2009, Munich, Germany, June 14, 2009.
- 35. K. Ogawa(日本原子力研究開発機構), K. Sueda, Y. Akahane, K. Tsuji, M. Aoyama, K. Fujioka, T. Kanabe, K. Yamakawa, N. Miyanaga,"Optimization for optical parametric chirped-pulse amplification bandwidth using partially deuterated KDP", CLEO-Europe 2009(Munich, Germany)2009/6/17.
- 36. J. Kawanaka (大阪大学), Y. Takeuchi, A. Yoshida, S. J. Pearce, T. Kawashima, and H. Kan, "Highly Effgicient Cryogenically-Cooled Yb:YAG Laser," 18th International Laser Physics Workshop (LPHYS'09, RFBR, International Journal Laser Physics), 4.1.3 (2009).
- 37. T. Kurita (浜松ホトニクス), K. Sueda, T Sekine, T. Kawashima, and N. Miyanaga,"2.4-J chirped pulse amplification of diode-pumped slab laser for 30-TW non-collinear OPCPA", The Sixth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2009)(San Francisco, USA) September 6-11, 2009
- 38. 小川 奏(日本原子力研究開発機構), 末田 敬一, 赤羽 温, 青山 誠, 辻 公一, 藤岡 加奈, 金邊 忠, 山川考一, 宮永 憲明, "部分置換 DKDP 結晶による広帯域

OPCPA における位相整合条件の最適化",第 70 回応用物理学会学術講演会(富山大),2009.9.10.

- 39. 赤羽 温(日本原子力研究開発機構),小川 奏, 辻 公一, 青山 誠, 山川考一, "同一の正分散媒質をパルス伸張・圧縮に用いた光パラメトリックチャープパルス増幅 法", 第 70 回応用物理学会学術講演会(富山大), 2009.9.10.
- 40. 三上勝大(大阪大学),本越伸二,實野孝久,藤田雅之,河仲準二,安原亮,"異なる温度条件下における光学素子の損傷閾値",第 70 回応用物理学会,富山大学, 2009.9.8-11.
- 41. 本越伸二(レーザー総研), "高強度レーザー用光学薄膜の現状", 第3回超高速エレクトロニクス研究会, 産総研つくば、2009.11.10.
- S. Motokoshi (レーザー総研), T. Higashizawa, T. Jitsuno, M. Yoshida, "Control of laser damage and stimulated Brillouin scattering for multimode optical fibers", Boulder Damage Symposium 2009, Boulder, USA, 2009.9.21-23
- 43. K. Mikami(大阪大学), S. Motokoshi, T. Jitsuno, M. Fujita, J. Kawanaka, R. Yasuhara, "Laser-induced damage thresholds in silica glasses at different temperature", Boulder Damage Symposium 2009, Boulder, USA, 2009.9.21-23
- 44. Y. Akahane(日本原子力研究開発機構), K. Ogawa, K. Tsuji, M. Aoyama, K. Yamakawa, "Compression of idler pulses with an identical positive dispersive media to signal pulse stretcher in ultrafast optical-parametric chirped-pulse amplification", Photonics West 2010(San Francisco, USA), 2010.1.25
- 45. K. Yamakawa (日本原子力研究開発機構), "Ultrafast, High Power Laser Technologies: Challenges and Perspectives", Advanced Solid State Photonics 2010 (San Diego, USA) 2010/2/3 (invited).
- 46. Y. Akahane(日本原子力研究開発機構), K. Ogawa, K. Tsuji, M. Aoyama, K. Yamakawa, "Idler pulse compression with an identical positive dispersive media to signal pulse stretcher in ultrafast optical-parametric chirped-pulse amplification", Advanced Solid State Photonics 2010 (San Diego, USA) 2010/2/3
- 47. 三上勝大(大阪大学),本越伸二,實野孝久,藤田雅之,河仲準二,安原亮,"光学 素子レーザー損傷耐力の温度依存性",レーザー学会学術講演会第30回年次大会, 千里ライフサイエンスセンター,2010.2.2-4
- 48. 三上勝大(大阪大学),本越伸二,藤田雅之,實野孝久,河仲準二,山村史彦,"異 なる温度条件下における光学素子の損傷閾値(2)",第57回応用物理学関係連合講 演会,東海大学,2010.3.17-20
- 49. 荻野純平(大阪大学),末田敬一,荒木良,栗田隆史,川嶋利幸,藤田雅之,山川 考一,宮永憲明,"数サイクル高出力レーザー用励起光源開発",第71回応用物理 学会学術講演会,長崎大学,2010年9月16日.
- 50. 赤羽 温(日本原子力研究開発機構), 冨田 仁, 小川 奏, 西岡 一, 山川考一, "アイドラー光パルス圧縮における高次分散補償(1)-OPA 相互作用光の位相計測・"、 第71回応用物理学会学術講演会, 長崎大学, 2010年9月16日.
- 51. 小川 奏(日本原子力研究開発機構), 赤羽 温, 山川 考一, "低温冷却型 100-mJ Yb:YLF チャープパルス再生増幅システム", 第71回応用物理学会学術講演会, 長 崎大学, 2010 年 9 月 16 日.
- 52. 栗田隆史(浜松ホトニクス),末田敬一,椿本孝治,宮永憲明, "光パラメトリック増幅 によるコヒーレントビーム結合実験",第71回 応用物理学会学術講演会,長崎大学, 2010年9月16日.
- 53. 三上勝大(大阪大学),本越伸二,藤田雅之,實野孝久,"金属薄膜のレーザー損傷 閾値温度依存性",第 71 回応用物理学会学術講演会,長崎大学,2010 年 9 月

14-17 日.

- 54. 荻野純平(大阪大学),末田敬一,荒木 良,栗田隆史,川嶋利幸,藤田雅之,山 川考一,宮永憲明,"数サイクル高出力レーザー用励起光源の開発",レーザー学会 学術講演会第 31 会年次大会,電気通信大学,2011 年 1 月 9 日.
- 55. 赤羽 温(日本原子力研究開発機構),小川 奏,冨田 仁,西岡 一,山川考一,"パ ルス伸長・圧縮に正分散媒質を用いた高強度フェムト秒レーザー装置の開発",レー ザー学会学術講演会第 31 会年次大会,電気通信大学,2011 年 1 月 9 日.
- 56. 小川 奏(日本原子力研究開発機構),赤羽 温,山川考一,"100mJ 出力 LD 励起 低温冷却Yb:YLF 再生増幅器",レーザー学会学術講演会第31会年次大会,電気 通信大学,2011年1月9日.
- 57. 荻野純平(大阪大学),末田敬一,栗田隆史,川嶋利幸,宮永憲明、"数サイクル高 出力レーザー用励起光源の開発",第 58 回 応用物理学関係連合講演会,神奈川 工科大学,2011年3月26日.
- 58. K. Sueda (大阪大学), T. Kurita, Y. JIANG, T. Kawashima and N. Miyanaga, "Chirped pulse amplification laser using Nd:glass zig-zag slab pumped by laser diodes", International Symposium on Ultra-fast Phenomena and Terahertz Waves 2010 (ISUPTW 2010), Xi'an, China, 2010.9.12.
- 59. 荻野純平(大阪大学),末田敬一,栗田隆史,川嶋利幸,宮永憲明,数サイクル高 出力レーザー励起用 CPA ファイバーシステムの開発,2011 年秋季 第72回 応用 物理学会学術講演会,山形大学小白川キャンパス,2011 年8月30日.
- 60. 三上勝大(大阪大学),本越伸二,藤田雅之,實野孝久,田中和夫,"金属薄膜のレーザー損傷閾値温度依存性(3)",第72回応用物理学会学術講演会,山形大学,2011年8月29日・9月2日.
- 61. 黒田耕平(大阪大学),三上勝大,本越伸二,實野孝久,染川智弘,藤田雅之,"超 短パルスレーザーによる光学薄膜のレーザー損傷(2)",第72回応用物理学会学術 講演会,山形大学,2011年8月29日-9月2日.
- 62. 三上勝大(大阪大学),本越伸二,藤田雅之,實野孝久,田中和夫,"誘電体薄膜および金属薄膜のレーザー耐力温度依存性",平成23年電気関係学会関西連合大会, 兵庫県立大学,2011年10月29日-30日.
- 63. 三上勝大(大阪大学),本越伸二,藤田雅之,染川智弘,實野孝久,田中和夫,"レ ーザー損傷機構に与える光学素子温度の影響",レーザー学会学術講演会第32回 年次大会,TKP 仙台カンファレンスセンター,2012年1月30日-2月1日.
- 64. 黒田耕平(大阪大学),三上勝大,本越伸二,實野孝久,染川智弘,藤田雅之,"超 短パルスレーザー用高耐力光学素子の開発",レーザー学会学術講演会第32回年 次大会,TKP 仙台カンファレンスセンター,2012年1月30日-2月1日.
- 65. 荻野純平(大阪大学),末田敬一,栗田隆史,川嶋利幸,宮永憲明,"数サイクル高 出レーザー用チャープパルスファイバー増幅器の開発",2012 年レーザー学会学術 講演会第 32 回年次大会,TKP 仙台カンファレンスセンター,2012 年1月 31 日.
- 66. 荻野純平(大阪大学),末田敬一,栗田隆史,川嶋利幸,宮永憲明,"数サイクルレ ーザー励起用 mJ 級 CPA ファイバーシステムの開発",2012 年春季 第59回 応用 物理学関係連合講演会,早稲田大学 早稲田キャンパス,2012 年3月16日.
- 67. 赤羽温(日本原子力研究開発機構),小川奏,冨田仁,西岡一,山川考一,"アイド ラー光パルス圧縮における高次分散補償(2)-ポンプ光位相制御によるアイドラー光 残留分散補償・",第59回応用物理学関係連合講演会,早稲田大学(東京都新宿 区),平成24年3月17日.
- 68 三上勝大(大阪大学),本越伸二,染川智弘,實野孝久,藤田雅之,田中和夫,神村 共住,"超短パルスによるレーザー損傷閾値の温度依存性",第 59 回応用物理学関 係連合講演会,早稲田大学,2012 年3月 15 日-18 日.
- 69. K. Ogawa (日本原子力研究開発機構), Y. Akahane, and K. Yamakawa, "100-mJ diode-pumped, cryogenically- cooled Yb:YLF chirped-pulse regenerative amplifier", Conference on Lasers and Electro-Optics 2011,

Baltimore (USA), May 2, 2011.

- 70. K. Mikami (大阪大学), S. Motokoshi, M. Fujita, T. Jitsuno, K.A. Tanaka, and H. Azechi, "Temperature Dependence of Laser-Induced Damage Tresholds for Dielectric and Metal Coatings", CLEO-Europe 2011, Munich, Germany, May 22-26, 2011.
- 71. N. Miyanaga(大阪大学), "Present status of LFEX PW laser and its prospect for sub EW technology", Inertial Fusion Sciences and Applications, Bordeaux, September 12, 2011.
- 72. K. Mikami(大阪大学), S. Motokoshi, M. Fujita, T. Jitsuno, K.A. Tanaka, "Laser-induced damage thresholds of optical coatings at different temperature", Boulder damage symposium 2011, Boulder, US, September 18-21, 2011.
- 73. K. Yamakawa (日本原子力研究開発機構), K. Ogawa and Y. Akahane, "100-mJ diode-pumped, cryogenically- cooled Yb:YLF chirped-pulse regenerative amplifier," IEEE Photonics 2011 Conference, Arlington, Virginia, (USA), October 11, 2011.
- 74. N. Miyanaga (大阪大学), "High-average-power lasers for industrial and scientific applications", 2011 Workshop on SBS and Phase Conjugation, KAIST, Daejon, Korea, October 25-26, 2011.
- 75. N. Miyanaga(大阪大学), "Concept of sub EW laser based on few cycle OPCPA and Nd: glass laser", China-Japan Mini-Workshop on Optical Science of Extreme Conditions and Applications, Shanghai Jiao-Tong University, Shanghai, February 21, 2012.
- 76. 栗田隆史(浜松ホトニクス)、吉田英次(大阪大学)、川嶋利幸(浜松ホトニクス)、宮永 憲明(大阪大学)、, "LD 励起 Nd:ガラス増幅器による時空間チャープパルス増幅", 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛大学・松山大学, 9 月 12 日(2012 年).
- 77. 三上勝大(阪大レーザー研),本越伸二(レーザー総研),染川智弘(レーザー総研),實野孝久(阪大レーザー研),藤田雅之(レーザー総研),田中和夫(阪大工),神 村共住(大工大),"超短パルスによるレーザー損傷閾値の温度依存性(2)",応用物理 学会,愛媛大学,9月12日(2012).
- 78. 本越伸二(レーザー総研),三上勝大(阪大レーザー研),實野孝久(阪大レーザー研),染川智弘(レーザー総研),藤田雅之(レーザー総研), "超短パルスレーザーによる光学薄膜のレーザー損傷(3)",応用物理学会,山形大学,愛媛大学,9月12日(2012).
- 79. K. Mikami(大阪大学), S. Motokoshi, T. Somekawa, T. Jitsuno, M. Fujita, K.A. Tanaka(阪大工), "Temperature dependence of laser-induced damage thresholds by short pulse laser", SPIE Boulder Damage Symposium 2012, USA, Sep. 24 (2012).
- ③ ポスター発表(国内会議 1件、国際会議 9件)
 - Y. Akahane(日本原子力研究開発機構), K. Ogawa, and K. Yamakawa, "Ultrafast Chirped-pulse Amplification using an Identical Positive Dispersive Media for Both Pulse Stretching and Compression", 9th International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (ISUILS9) P-17, Maui (USA), 12.11 (2010).
 - K. Ogawa (日本原子力研究開発機構), Y. Akahane, and K. Yamakawa, "100-mJ, Diode-pumped, cryogenically-cooled Yb:YLF Chirped-pulse Regenerative Amplifier", 9th International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (ISUILS9) P-18, Maui (USA), 12.13 (2010).
 - 3. 三上勝大(大阪大学)、本越伸二、藤田雅之、實野孝久、誘電体薄膜および金属薄 膜のレーザー耐力温度依存性、電気関係学会関西連合大会、立命館大学、2010年

11月13-14日.

- 4. S. Motokoshi (レーザー総研), K. Mikami, T.J itsuno, K. Kato, "Competition of Damage thresholds for HR and AR coatings at 1064nm in Japan", Asia Pacific Laser Symposium 2010, Jeju-do, Korea, 2010.5.11-15.
- 5. K. Mikami (大阪大学), M. Motokoshi, M. Fujita, T.J itsuno, M. Murakami, "Temperature dependence of nonlinear optical phenomena in silica glasses", Laser Damage Symposium XLII, CO. USA, 2010.9.27-29.
- 6. S. Motokoshi (レーザー総研), K. Mikami, T. Jitsuno, K. Kato, "Database on Laser-Induced Damage Thresholds for AR and HR Coatings in Japan", Laser Damage Symposium XLII, CO. USA, 2010.9.27-29.
- Y. Akahane(日本原子力研究開発機構), K. Ogawa, and K. Yamakawa, "Generation of intense femtosecond laser pulse by compression of an idler pulse with an identical positive dispersive media as signal pulse stretcher", Conference on Lasers and Electro-Optics 2011, Baltimore (USA), May 4, 2011.
- 8. J. Ogino(大阪大学), K. Sueda, T. Kurita, T. Kawashima and N. Miyanaga, Development of high energy fiber CPA system, IFSA 2011, Palais des Congrès de Bordeaux-Lac(France), September 12, 2011.
- S. Motokoshi (レーザー総研), K. Mikami, E. Sato, K. Kato, T. Somekawa, T. Jitsuno, "Database on damage thresholds of picoseconds pulse for AR and HR coatings", Boulder damage symposium 2011, Boulder, US, September 18-21, 2011.
- 10. J. Ogino(大阪大学), K. Sueda, T. Kurita, T. Kawashima and N. Miyanaga, Development of 10kHz mJ class fiber CPA system, ALPS'12, Yokohama, Japan, 2012.4.26

(4)知財出願

①国内出願(5件)

- 発明の名称:「固体レーザー装置」
 発明者:赤羽 温、杉山僚、山川考一
 出願人:日本原子力研究開発機構
 出願日:2008年5月2日
 出願等番号:特願 2008-120278号
- 発明の名称:「レーザ増幅装置及びレーザ増幅方法」
 発明者:宮永憲明、末田敬一、栗田隆史、川嶋利幸 出願人:大阪大学、浜松ホトニクス(株)
 出願日:2010年3月26日
 出願等番号:特願2010-072862(特開2011-203648)
- 発明の名称:「レーザ装置」
 発明者:宮永憲明、藤田雅之、栗田隆史、川嶋利幸
 出願人:大阪大学、(財)レーザー技術総合研究所、浜松ホトニクス(株)
 出願日:2010年9月6日、国内優先権出願:2011年9月5日
 出願等番号:特願 2011-192951 (特開 2012-078812, 2012/04/19)
- 4. 発明の名称:「レーザ装置」
 発明者:宮永憲明、藤田雅之、栗田隆史、川嶋利幸
 出願人:大阪大学、(財)レーザー技術総合研究所、浜松ホトニクス(株)
 出願日:2010年9月5日、国内優先権出願:2011年9月5日
 出願等番号:特願 2011-192954 (特開 2012-078813, 2012/04/19)

(5)受賞·報道等

①受賞

1. 赤羽 温, "低温冷却 Yb:YLF 結晶を用いたマルチ mJ、2波長ピコ再生チャープパルス 増幅", レーザー学会優秀論文発表賞, 2009 年 5 月 29 日

②マスコミ(新聞・TV等)報道

該当無し

(6)成果展開事例

 得られたレーザー損傷耐性に関するデータベースは、レーザー総研のホームページ上 に公開するとともに、レーザーEXPO展示会などで広く情報を発信している。(レーザー 総研藤田グループ)

| 年日日 | 夕玧 | 相示 | 参加 | 推击 |
|------------|----------------|-------|----------|------------------|
| 中方口 | つか | 物内 | 人数 | 风安 |
| 2007.9.27, | NOPA 励起レーザー開 | 阪大レーザ | 15 | 半導体レーザー励起 CPA 固体 |
| 2007.12.27 | 発打合せ | 一研 | 18 | レーザー及びその高調波変換 |
| 2008.1.23 | 全体推進会議 | 阪大レーザ | 7 | 各機関の進捗状況と研究計画 |
| 2008.12.22 | | 一研 | | |
| 2008.6.5 | LD 励起 CPA レーザー | 阪大レーザ | 12 | 半導体レーザー励起 CPA 固体 |
| 2008.9.25 | 技術検討会 | 一研 | 10 | レーザーの開発状況の把握と |
| 2008.11.27 | | | 13 | 検討 |
| 2008.8.20 | 文部科学省光科学ネッ | 阪大レーザ | 16 | 固体レーザー及び超短パルス |
| | トワーク拠点光源開発と | 一研 | | レーザー開発に関する意見交 |
| | の連携作業会 | | | 換ならびに連携に関する検討 |
| 2008.9.30 | ファーバーレーザー技 | 阪大レーザ | 8 | ファイバー発振器及び増幅器開 |
| | 術検討会 | 一研 | | 発の関する検討 |
| 2009.7.2 | ファイバー増幅器システ | 阪大レーザ | 10 | ファイバーフロントエンドの進捗 |
| 2009.12.17 | ム仕様検討会 | 一研 | 5 | 状況と今後の計画の検討 |
| 2009 9 17 | 数サイクル分散計測検 | 阪大レーザ | 9 | 公費計測に関する議論 |
| 2005.5.17 | 討会 | 一研 | 0 | 万限市限に医疗る酸喘 |
| 2010.6.10 | チーム内ミーティング | 阪大レーザ | 14 | 研究進捗状況の把握と課題解 |
| 2010.8.5 | | 一研 | 12 | 決方策の議論のためのミーティ |
| 2010.10.7 | | | 12 | ング |
| 2010.12.15 | | | 10 | |
| 2011.1.27 | チーム内ミーティング | 阪大レーザ | 12 | 研究進捗状況の把握と課題解 |
| 2011.6.9 | | 一研 | 14 | 決方策の議論のためのミーティ |
| 2011.8.4 | | | 13 | ング |
| 2011.10.6 | | | 12 | |
| 2011.11.24 | | | 13 | |
| 2012.7.25 | チーム内ミーティング | 阪大レーザ | 8 | 研究進捗状況の把握と課題解 |
| 2012.8.2 | | 一研 | 8 | 決方策の議論のためのミーティ |
| | | | | ング |

結び

自己評価

- 基幹装置(~5fs, ~30TW)については、本報告書提出時点では光パラメトリック主増幅器の調整 段階であり、未完成である。残りの期間はこれに集中して、できるだけ早期に完成させたい。
- ・超短パルスの精密制御を融合させて高出力レーザーの質の転換を図るという当初目標は大変チャレンジングであったが、一定の成果を上げたと考えている。
- ・超短パルスのアダプティブ制御の観点では、発振器の CEP 安定化と非線形過程を用いた CEP 自己安定化、分散計測・制御のフィードバックシステム、光パラメトリック過程のアイドラー光を用 いた偶数次高次分散の自動補正などで成果が上がった。
- ・高出力化に不可欠な多層膜素子のレーザー耐力に関しては、フェムト秒領域で有効な材料とその
 膜設計について
 目途が立った。
- 本研究は高出力数サイクルレーザーの学術応用を念頭に研究開発を始めたが、Ybファイバー モード同期の数サイクル発振器、光パラメトリック過程を用いた自動的コヒーレントビーム結合や 時間空間分散超短パルスの増幅手法、高出力ファイバーチャープパルス増幅・パルス圧縮など、 産業用にも極めて有用な技術的進展があった。

今後の展開

- ・基幹装置については、数サイクル高強度の特徴を活かしたプラズマ相互作用の実験装置として、 関連研究者とともに広く活用していきたい。
- ・また、本研究に参加した企業等との連携を継続して、本研究の成果を産業用レーザーとしての実 用化に繋げるよう取り組んでいきたい。

プロジェクト運営

- ・4研究機関の課題共有と分担ならびに技術集約に関する連携は、順調であったと考えられる。
- ・そして、本研究の成果は、参加各機関の今後の研究展開にも資することが可能と考えられる。例 えば、原研機構関西研では、Yb:YLFの特徴を活かし、正分散媒質と負分散アイドラー光を組み 合わせた高繰り返しコンパクトな高出力超短パルスレーザー技術への展開が期待される。浜松ホ トニクスには、半導体レーザー励起高出力ガラスレーザーの CPA・パルス圧縮・波長変換の技術 だけでなく、数サイクル発振器やファイバー増幅器などを含めて、超短パルスレーザーの総合的 技術が蓄積された。レーザー総研では、フェムト秒用高耐力素子の開発に繋がることが期待され る。

装置写真(参考)



半導体レーザー励起 Nd:ガラス CPA. 左:装置全景. 右:増幅器ヘッド(浜松ホトニクス)



半導体レーザー励起 Yb:YAG CPA と光パラメトリック増幅実験(原研機構関西研)



レーザー損傷試験装置(レーザー総研)



22fsファイバー発振器(阪大レーザー研、浜松ホトニクス)



社会還元で製造したファイバー増幅器プロトタイプ(浜松ホトニクス)