

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) (研究代表者)
- 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 ((独)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) (主たる共同研究者)
- 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) (主たる共同研究者)
- ② 研究項目
 - ・光パラメトリック増幅励起レーザーの開発

(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研究部、主席研究員) (主たる共同研究者)

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

§ 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

2.1 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 μ m LMA ファイバーCPAと 100 μ 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 μ m LMA ファイバーCPA と 70 μ 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 \sim 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 μ 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 >200 mJ 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 $f\text{-}2f$ 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。

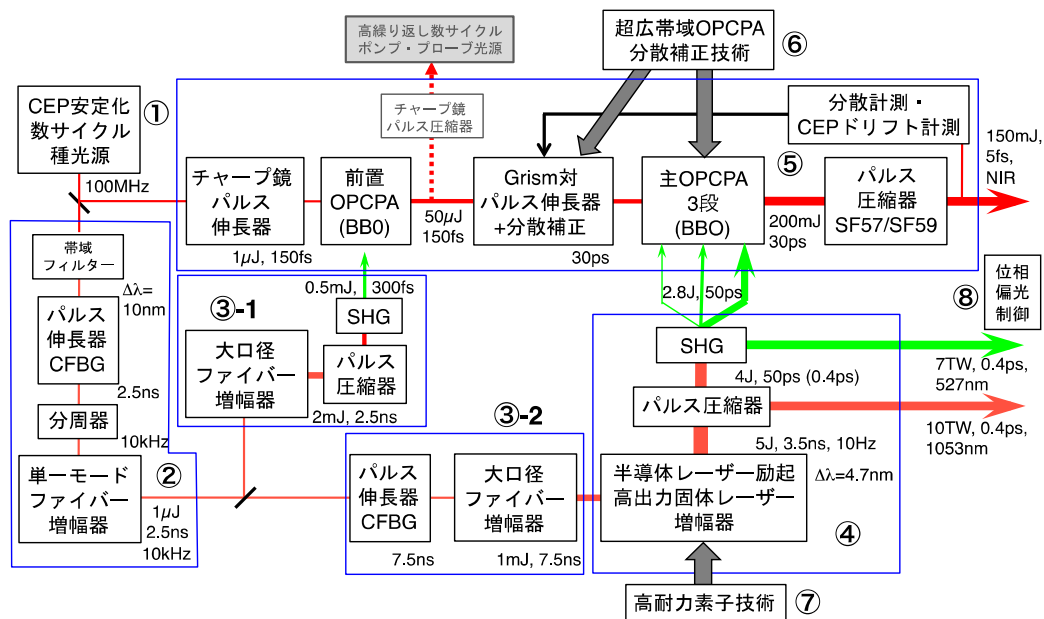


図 1. 開発中の装置の詳細構成ブロック図(上)と写真(下、手前が CPA DPSSL、奥がファイバーレーザーと OPCPA 部)

2.2 平成 23 年度の研究成果の概要

a) 受動モード同期 Yb ファイバー発振器によるフェムト秒レーザーの開発

(図 1 ①、宮永グループ、川嶋グループ)

Yb 添加ファイバーによるモード同期発振器の技術開発を行い、30fs の超短パルスレーザーが安定して出力されるようになった。図 2 に発振器の構成図を示す。共振器内の光アイソレータで一方方向リング共振器とし、モード同期はファイバー中の光カー効果を利用した偏光回転によって行っている。レーザー出力(A)は、偏光ビームスプリッターキューブ PBS から S 偏光成分を取り出す。この出力光はファイバーの分散によりチャープしているのを、外部に回折格子対を追加して分散を補償することでパルス圧縮を行った(B)。

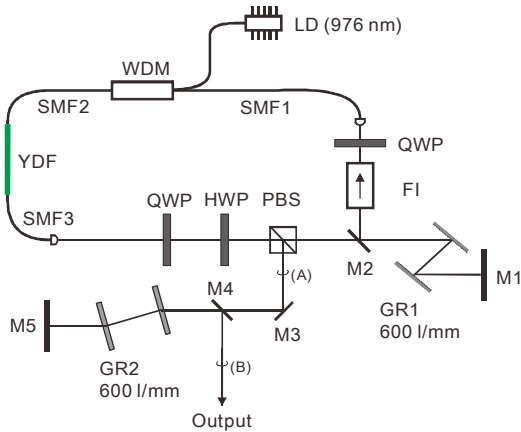


図 2. モード同期 Yb ファイバー発振器の構成図

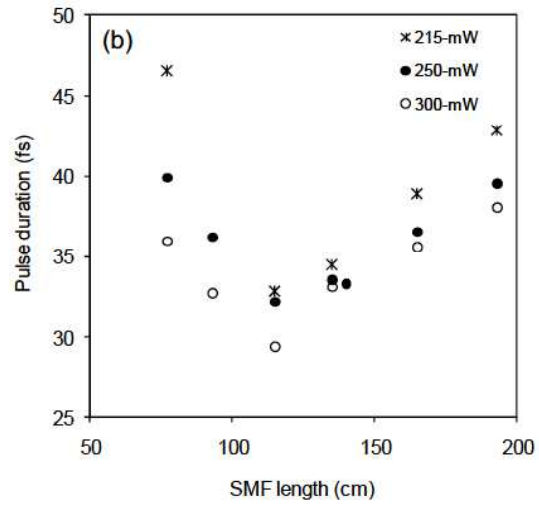


図 3. SMF の長さを変えた時のパルス幅の変化

圧縮前後のパルス幅は半値全幅 (FWHM) でそれぞれ、 $\sim 800\text{fs}$ 、 30fs 前後であり、圧縮パルス幅はほぼフーリエ限界に達していた。また、圧縮後のビームサイズ径は 2.1mm ($1/e^2$) であった。パルス繰返し率 107.1MHz のとき、パルス圧縮後の平均出力は 57mW (パルスエネルギー 0.53nJ) であり、光-光変換効率は 21% であった。出力安定性は、励起パワー 265mW のときの 1 時間の出力変動は 0.14% (rms) であり、実用上問題のないレベルである。

次に、パルスの時間および位相特性を、周波数分解光ゲート (FROG: Frequency Resolved Optical Gating) 法により特性を詳細に評価した。共振器の正味の GDD は単一モードファイバー (SMF₁₋₃) によってほぼ決まり、発振波長 1050nm において $\text{GDD} = 2.48 \times 10^3 \text{fs}^2$ であった。一般的に、広範囲の波長領域にわたって GVD が小さい方が広帯域のスペクトルが得られることが知られているので、GDD のスロープが小さい方が望ましい。そこで、SMF の長さを変えた場合のパルス幅を測定した。図 3 に、励起パワーを 215mW 、 250mW 、および 300mW とした場合のパルス幅を示す。SMF 長が短くなるにつれて GVD スロープが小さくなるためスペクトル幅が広くなり、その結果パルス幅が狭くなるのが分かる。しかし、SMF 長が 100cm よりも短くなると逆にパルス幅が広がった。これはファイバー中の自己位相変調 (SPM: self phase modulation) によりスペクトル広がり効果が減少したためである。したがって、GVD と SPM のスペクトル広がり効果とのバランスで決まる最適ファイバー長で最小のパルス幅 (29.4fs 、世界最短レベル) が得られた。

図 4 に励起パワー 250mW のときのスペクトルとパルス特性を示す。SMF が 77cm のときのパルス形状 (図 4(b)) を見るとウィング構造が現れているのが分かる。このウィング構造は三次分散 (TOD) によるものである。SPM が TOD を相殺することがこれまでにいくつか報告されている。これらの事から推測すると、ファイバー長が短くなり SPM 効果が減少することによって、TOD との相殺が減少しその結果、ウィング構造が現れたものと考えられる。

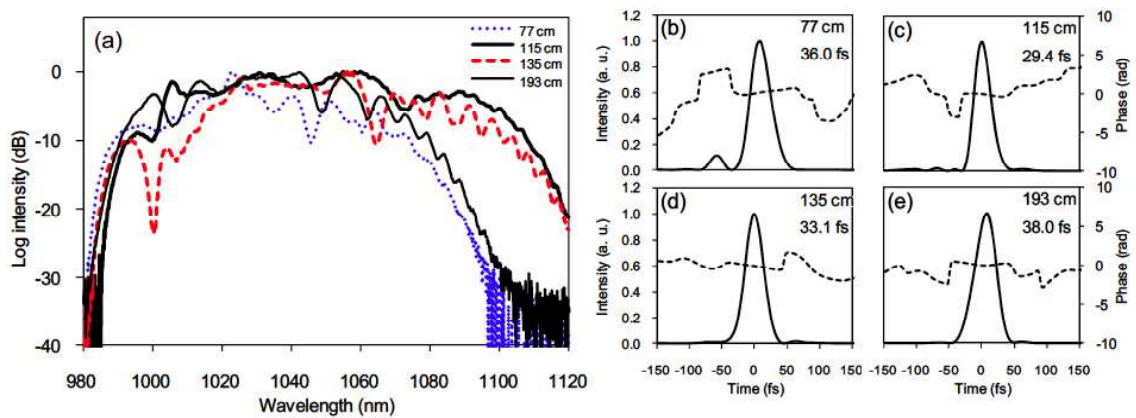


図 4. SMF 長の違いによるスペクトル(a)とパルス特性の変化(b-e)

b) ファイバー増幅器の開発 (図 1 ③、宮永グループ)

中心波長 1053nm で動作するファイバー主増幅器は次のように構成した。単一モードファイバー増幅器((図1②))の出力をファイバー分波器で 2 分岐し、一方を大口径ファイバー増幅器(図 1、③-1。偏波保持型 Yb 添加 LMA ファイバー(コア径 30 μm)とフォトニック結晶ロッド型ファイバー(コア径 100 μm)で構成)により増幅して、OPCPA 前置増幅器に入力するためにパルス圧縮・波長変換する。もう一方は、CFBG(chirped fiber Bragg grating)の追加により 7.5ns までのパルス伸張を経て、同じく大口径ファイバー増幅器(図1③-2。LMA ファイバー(コア径 30 μm)とフォトニック結晶ロッド型ファイバー(コア径 70 μm)で構成)により増幅して、半導体レーザー励起固体レーザー部(図1、④)へ入力する。

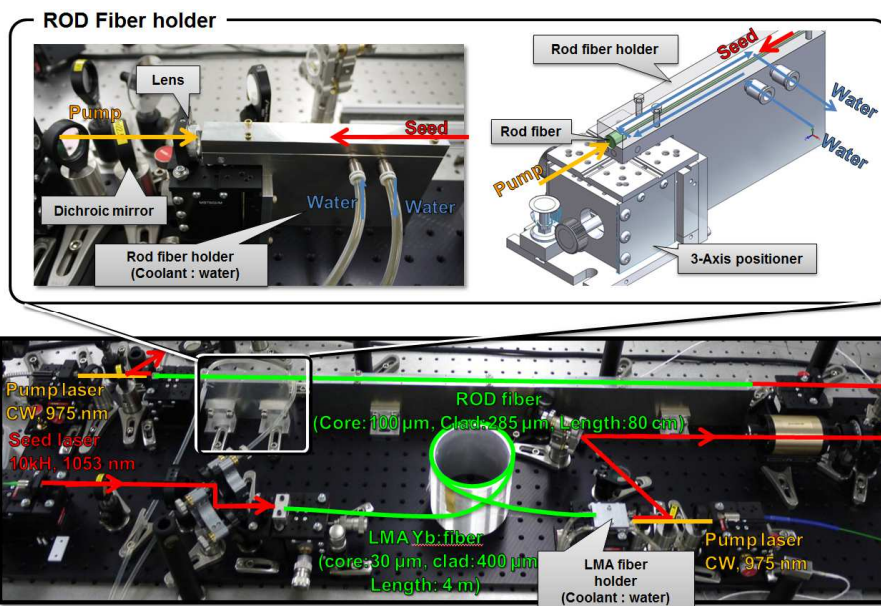


図 5. LMA ファイバー及びロッドファイバー増幅器の写真(下)とロッドファイバー増幅器の冷却構造(上)

励起方式をこれまでのCW方式からパルス励起方式(1kHz、10kHz)に変更することで、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(図5)。その結果、図6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。また、出力パワーの変動は、図7に示すようにLMAファイバーとロッド型ファイバーにおいて、それぞれ0.3%rms、0.4%rmsであり、ファイバー本来の高安定性が高パルスエネルギーでも実現されている。次に、LMAファイバーとロッド型ファイバー(コア径100 μm)の増幅特性を図8に示す。1kHz励起において1.4mJ/パルス(ナノ秒パルスCPAでは最高レベル)を達成し、それを回折格子対でパルス幅430fs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30%(出力安定性1.5%rms)を達成した。

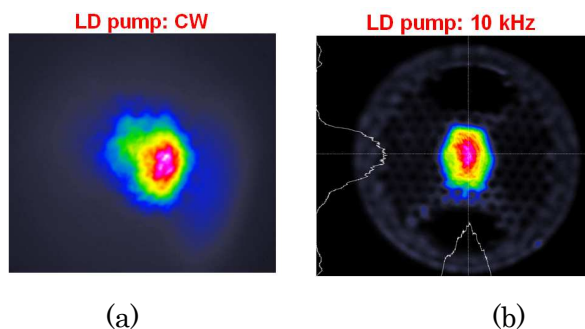


図6. ファイバー増幅器出力の近視野像 (a): CW励起、(b): 10kHzパルス励起

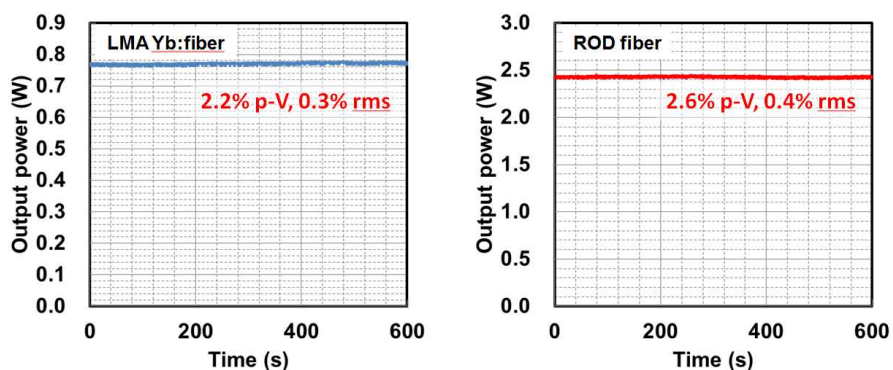


図7. LMAファイバー(右)とロッドファイバー増幅器(左)の出力安定性

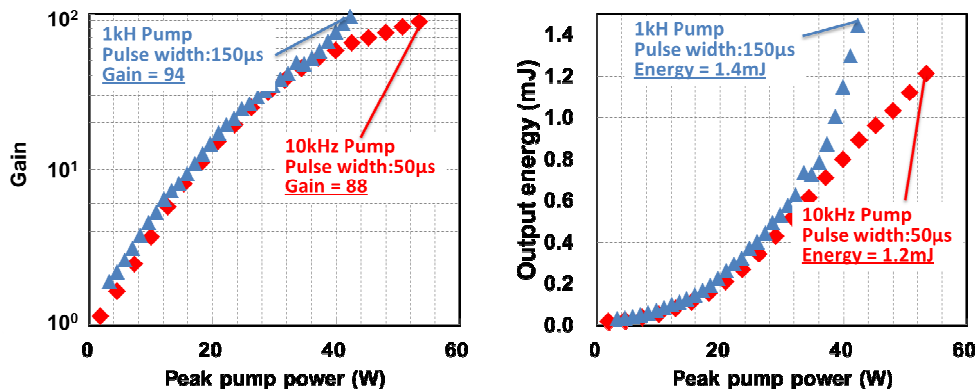


図8. ファイバー増幅器の増幅特性

c) 数 fs パルスの分散補正 (図 1 ⑥、宮永グループ)

本システムでは負分散でパルス幅を伸張・増幅後に正分散媒質で圧縮する構成であるが、10fs 秒以下までパルスを圧縮するため、残留分散が大きな問題となる。これを解決するために、負分散特性を有するチャープミラー対を用いる。導入予定のチャープミラーの評価を行った結果を図9 に(設計 GDD が 100fs^2)、得られるパルス波形の数値計算を図 10 に示す。このように、目標である 5fs に近いパルス幅まで圧縮可能であるが、形状の非対称性等の問題があるため、さらなる最適化を行う予定である。

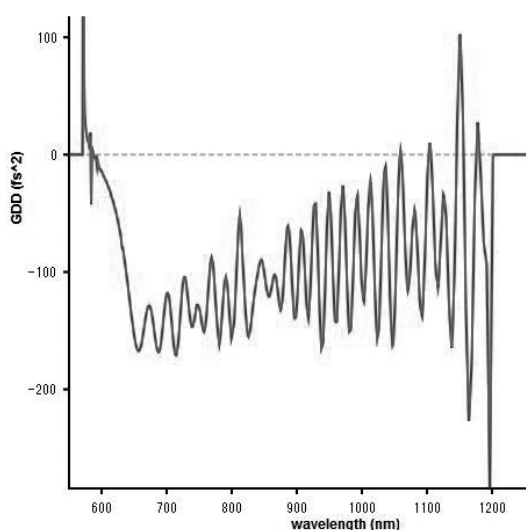


図 9. チャープミラーの分散評価

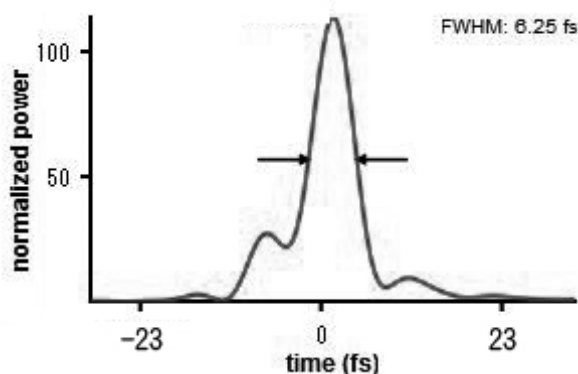


図 10. 予想されるパルス波形

d) OPCPA 主増幅器用ピコ秒パルス発生と2倍高調波変換 (図 1 ④、川嶋グループ)

OPCPA 主増幅器用ピコ秒パルス発生では、繰り返し率 1Hz で多重パス増幅を行い、出力エネルギー2.38J、パルス幅 2.5ns、スペクトル幅 3.7nm、低エネルギー領域の圧縮パルス幅 1.9ps (FWHM) が得られており、NOPA 増幅列への供給に向けて励起レーザーパラメータの最適化を進めている。

2 倍高調波変換では、大口径化が可能で適度な有効非線形定数を有し、スペクトル許容幅が広い DKDP(リン酸重水素カリウム) 非線形光学結晶を用いることで、スペクトル幅 4nm (FWHM) の入射パルスに対して 50%以上の変換効率が得られる見通しである。チャープパルス光による波長変換試験に先だて、CLBO 結晶による波長変換試験を行った。図 11 に波長変換特性結果を示す。基本波 12.1W (12J, 1Hz) の入力に対して、2 倍高調波出力として 7.4 W (7.4J, 1Hz)、変換効率 61.2%が得られた。

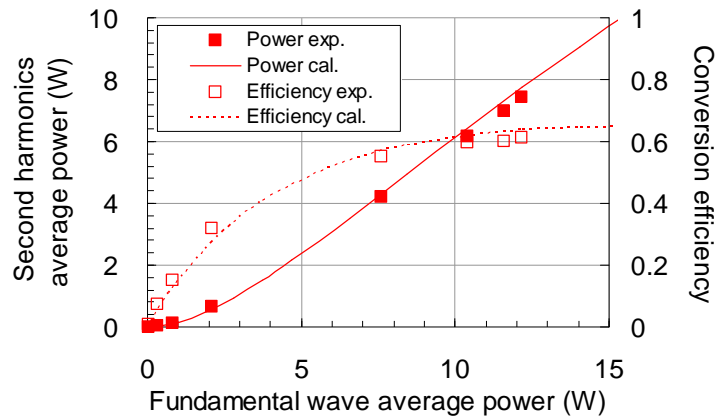


図 11. CLBO 結晶による 2 倍高調波変換特性

e) OPCPA 励起用 Yb:YLF チャープパルス再生増幅システムの高繰り返し化

(図1④、山川グループ)

繰り返し周波数を 10Hz から 100Hz 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 (6mm×2.3mm×3mm 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收容されて液体窒素で冷却される。この時、結晶は光軸に対してブリュスター角になるよう設置した。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 1.49mm ϕ 以下のモードサイズで発振することが確認できた。

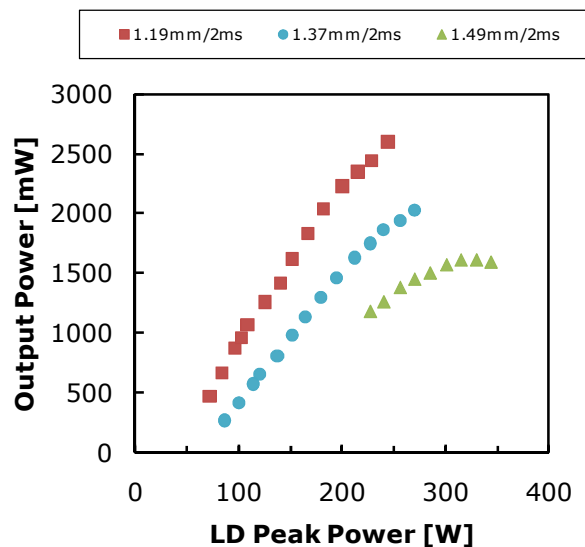


図 12. LD 入力パワーに対する平均出力特性のモードサイズ依存性

この結果から、LD 励起時間 2ms、繰り返し数 100Hz 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 1.19mm ϕ 、1.37mm ϕ 、1.49mm ϕ に設定し Q-switch 発振を行ったところ図 12 に示す結果が得られた。モードサイズ 1.4mm ϕ では、平均出力 1.6W で出力の飽和が見られ、また 1.37mm ϕ では 2W の最大平均出力が得られた。そして 1.19mm ϕ では 2.6W (出力エネルギー 26mJ) の最大平均出力が得られた。これは 10Hz 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た。

f) 誘電体材料薄膜のフェムト秒レーザー損傷閾値 (図 1 ⑦、藤田グループ)

これまでに、ナノ秒およびピコ秒パルスに対する種々の光学素子のレーザー損傷閾値を評価、比較し、損傷閾値を決定する要素が異なることを示してきた。平成 23 年度は、更にパルス幅の短い 100fs パルスを用いて、異なった誘電体材料薄膜のレーザー損傷閾値を評価し、短パルス高強度レーザー用高耐力光学素子の設計に必要となるデータベースを構築することを進めた。レーザー損傷の測定には、チタンサファイアレーザー装置(中心波長 800nm、パルス幅 100fs)を用いた。発振器から出力されたレーザー光のパルス幅を 200ps まで広げた後、増幅器段により数 mJ まで増幅する。その後、回折格子対を用いてパルス幅を 100fs に圧縮し、測定試料に照射した。回折格子対を通す場合と通さない場合により、異なったパルス幅により比較評価を行った。測定試料には、異なった誘電体材料単層膜を石英ガラス基板上に波長 800nm に対して $\lambda/4$ の光学膜厚(屈折率 \times 物理膜厚)になるように製膜した。

図 13 にパルス幅 100fs、200ps の場合の単層膜材料レーザー損傷閾値を示す。横軸には、各材料のバンドギャップエネルギーを示す。パルス幅 100fs の場合の単層膜の損傷閾値は、材料のバンドギャップエネルギーに比例し、原点を通ることからバンドギャップエネルギーのみに依存すると言える。一方、200ps の場合では、5種類の酸化物はバンドギャップエネルギーの大きさに依存し、損傷閾値も増加しているが、MgF₂ 単層膜だけはバンドギャップエネルギーに比べて低い閾値となった。

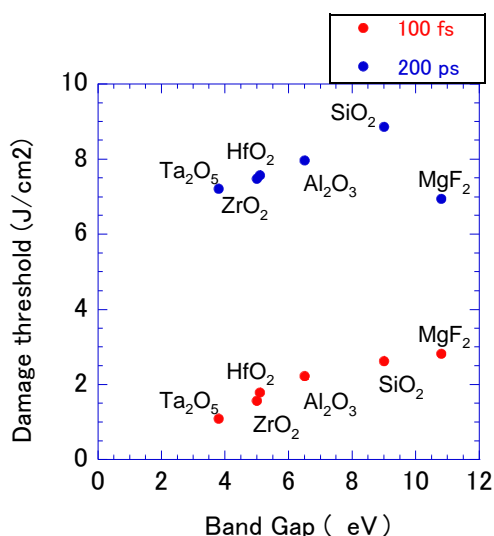


図 13. 各種単層膜材料のレーザー損傷閾値

図 14 に ZrO_2 膜の損傷形状の顕微鏡像を示す。図中(a)はパルス幅 100fs の場合、(b)はパルス幅 200ps の場合を示す。図より、100fs の場合では、集光照射されたレーザーパルスの空間強度分布に従い、尖塔部の膜全体が剥離されていることが判る。一方、200ps の場合では、尖塔部を中心に局所的な破壊が起こっていることが確認できる。つまり、100fs パルスの場合では、膜自身のバンドギャップエネルギーを超えて自由電子を生成するのに十分なレーザーエネルギー密度の部分では全て破壊するのに対して、200ps パルスでは、局所的に電子を生成する部分のみが破壊すると言える。

今後、高強度レーザー用光学材料として、大きなバンドギャップエネルギーを持つ材料に集中して、高耐力化素子へのデータを蓄積する。

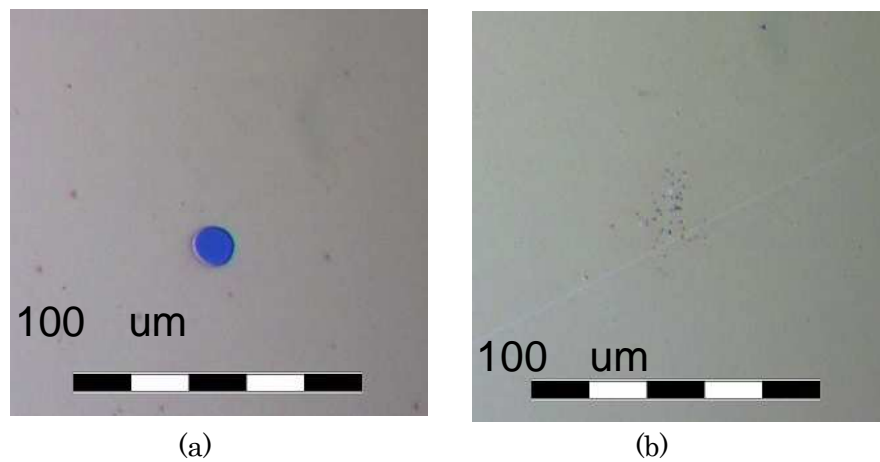


図 14. ZrO_2 単層膜のレーザー損傷形状. (a): パルス幅 100fs、(b): 200ps

§ 3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. 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*, Vol. 19, Issue 25, pp. 25199-25205 (2011) (DOI:10.1364/OE.19.025199). (§2.2 a))
2. 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*, Proc. of SPIE Vol. 8190, pp.81900I-1 – I-5, (2012) (DOI: 10.1117/12.899275). (§2.2 f))
3. 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*, Proc. of SPIE Vol. 8190, pp.81900A-1 – A-7, (2012) (DOI: 10.1117/12.899033). (§2.2 f))
4. 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」、レーザー研究、Vol. 39, No.12, pp.923-926, 2011 (DOI: なし). (§2.2 f))
5. 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) (DOI: なし). (§2.2 f))

(3-2) 知財出願

- ① 平成 23 年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 5 件)