

チタンサファイアチャープパルス増幅システムの移設と出力改善

Relocation and improvement of a Ti:sapphire CPA system

大石 裕 (助教)

Yu Oishi

Abstract

We report an improvement of a Ti:sapphire CPA system and a buildup of additional 2nd amplifier. The obtained pulse energy from an improved CPA system was increased to 0.8 mJ.

1 実験装置移設

2008年10月に慶應義塾大学先導研究センターに先端光波制御研究プロジェクトが発足し、新川崎タウンキャンパス内に実験室を設置した。ここでは主にフェムト秒パルスの発生とその波形整形技術の応用研究を展開する。本年度はこれまで矢上キャンパス内にて使用していたチタンサファイアチャープパルス増幅 (CPA : chirped pulse amplification) システムの移設および再起動が必要である。移設する主な装置はカーレンズモード同期チタンサファイア発振器 (Coherent 社 Mira), 発振器励起光源 (Coherent 社 Verdi), CPA システム (THALES 社 α -1000), 増幅器励起光源 (THALES 社 621-D), 中空ファイバ圧縮光学系, 液晶空間光変調器と光学除振台である。移設後には CPA システムからの出力エネルギーを増大するための2段階マルチパス増幅器の構築を行う。

本報告書では装置移設後のシステム改良点と増設した2段階増幅器の特性について報告する。

2 CPA システムの改良

移設後の光学定盤 (2400 mm×1200 mm 2台) と各レーザー配置を図1に示す。Verdi (5 W@532 nm) はシングルモード緑色レーザー光を利用した実験も行えるように配置した。Mira は移設後に調整し, cw 出力で 460 mW, モード同期発振時には 76.1 MHz の繰返しで 450 mW の平均出力, パルスエネルギー 5.9 nJ を得た。出力されるビームは回折による拡がりを抑えるために曲率半径 2 m の凹面鏡により平行光として CPA システムのパルスストレッチャーに入射した。

パルスストレッチャーは一般的な Öffner タイプ¹であり, 回折格子, 凹面鏡, 凸面鏡そして折返し鏡で構成される。THALES 社のオリジナルでは回折格子は供焦点から 190 mm に配置され, 入射パルスはス

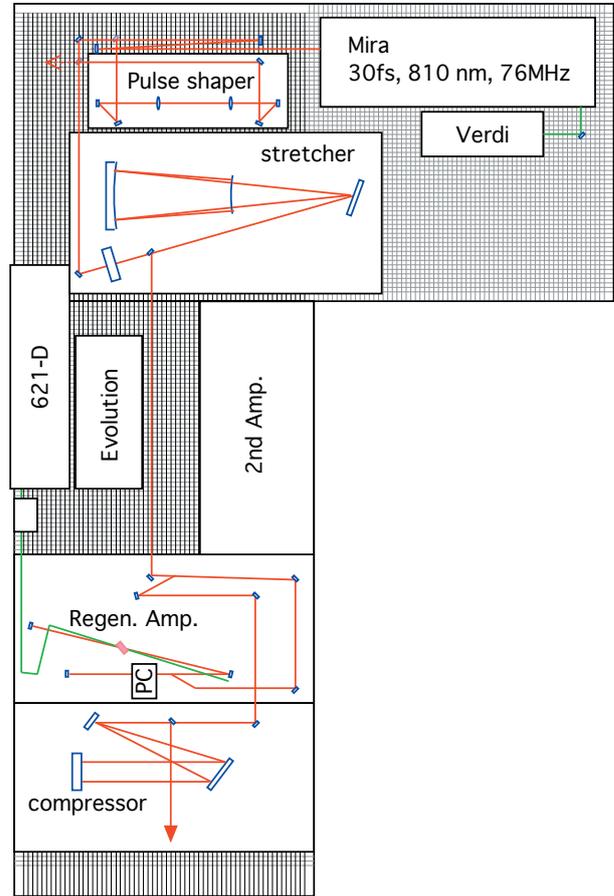


Fig. 1 Optical layout of Ti:sapphire CPA system at new experimental room.

トレッチャーを2回通すことによって約 450 ps 程度まで時間的に伸ばされていた。ところが, この配置ではストレッチャーの透過率が悪く最終的に増幅器へ入射できるパルスエネルギーが 50 pJ 程度しかないことが明らかとなった。このときストレッチャーは1回透過あたり4回の回折 (82%/diffraction) と8回の反射 (85%/reflection) があり, 全体の透過率は約 10% にとどまっている。この状態では増幅過程でシード光の増幅よりも ASE (amplified spontaneous emission) が強く増幅されてしまう問題が生じた。そこで2回透過している配置をやめて1回として, 不足する分散量は回折格子の位置を鏡焦点から 240 mm に変更して補った。最終的に増幅器へ入射するパルスは 0.5 nJ, 280 ps である。

増幅器は 1kHz 繰返し動作の再生増幅器を 1 段目として使用した。励起光源はランプ励起 Nd:YLF レーザ (THALES 社 621-D) を使用し、パルスエネルギー 9 mJ の ns パルスでチタンサファイア結晶を励起した。増幅の過程は共振器を構成する全反射鏡の背後に配置したフォトディテクタを用いて観測し、パルス取り出しのタイミングを調整した。ストレッチャを 2 回透過させていたときはシード光の入射から取り出しまで約 120 ns (共振器長 1140 mm を考慮すると 32 パス) 要していたが、ストレッチャの透過率改善により取り出しタイミングを 80 ns (20 パス) まで減らすことができた。このときの再生増幅器からの出力は 1.0 mJ であった。

再生増幅器より出力されたパルスはファラデーアイソレータによりシード光の光軸から分離されてビーム径を拡大 ($\phi=6.0$ mm) した後、回折格子対パルスコンプレッサへと送られた。従来のコンプレッサは 2 回透過のストレッチャで与えられる大きな分散を補償するために回折格子対の距離を長くする必要があり、折返し平面鏡を挿入する配置であったが、ストレッチャの透過回数を減らしたことで再生増幅器のパス数が大幅に減ったことにより、反射率の低い平面鏡を取り除くことが可能となった。以前の圧縮後のパルスエネルギーは約 0.33 mJ であったが、本改良後は 0.45 mJ であった。依然として残るコンプレッサでの損失の主な原因は 4 回の回折 (85%/diffraction) と折返し鏡の 2 回反射 (89%/reflection) である。

3 2 段目増幅器

より高いパルスエネルギー出力のため、本年度は 2 段目増幅器の構築も行った。励起光源には新たに LD 励起 Nd:YLF レーザ (Coherent 社 Evolution15) を導入した。レーザ出力は 1kHz 繰返し動作時に 12 mJ であり、マルチパス方式を採用して飽和増幅領域でのエネルギー取り出しを行う事を目指した。はじめに利得媒質としてのチタンサファイア結晶の選択は励起光の十分な吸収 ($Abs. \geq 95\%$)、強い熱レンズ効果を抑制するための低い吸収係数 ($\alpha \leq 1.5 \text{ cm}^{-1} @ 532 \text{ nm}$) を条件として Brewstar カットの結晶 ($\phi=5.0$ mm, $L=20$ mm, Crystal System 社) を準備した。実際の結晶に入射される励起光パルスは集光レンズのフレネル反射などの損失から 7.2 mJ で、結晶を 1 パスすることでそのエネルギーの 96% が吸収された。この励起光パルスのエネルギーと結晶の条件から、Frantz-Nodvik の

解析式^{2,3}によって励起光パルスの集光スポットサイズを見積もった。励起エネルギーが一定の時、結晶透過後の増幅光パルスのエネルギーとパス数の関係を励起光パルスの集光スポットサイズ (直径) をパラメータとして図 2 に示す。励起光パルスと増幅光パルスの結晶におけるスポットサイズが 0.7 mm よりも小さい時、出力エネルギーがほぼ飽和した。このことから励起光パルスの結晶でのスポットサイズ (直径) を 0.7 mm として二段目増幅器を図 3 のようにチタンサファイア結晶を中心にして誘電体多層膜平面鏡 7 枚で構築した。励起光パルスは焦点距離 60 mm と 200 mm のレンズでビーム径を拡大した後 ($\phi=11$ mm) ビームスプリッタによって均等に 2 つに分けられ、結晶の両側から対向するように焦点距離 600 mm のレンズでそれぞれ集光された。このときチタンサファイア結晶は放熱性グリースを塗布し、水冷式銅ホルダに固定した。冷却水は再生増幅器のチタンサファイア結晶と直列に接続した約 20 °C の水で行った。増幅器の調整は 1 パス毎にパルスエネルギーが最大になるように調整し、4 パス後で最大 2.8 mJ (効率 26%) の取り出しエネルギーを得た。しかし、この状態では出力ビームに熱レンズによる強い非点収差とモード不整合が生じたため、励起光の集光レンズの位置を操作して集光スポットサイズを 0.9 mm 程度まで拡大して増幅を行った。最終的な出力は 2.1 mJ であり、依然とし

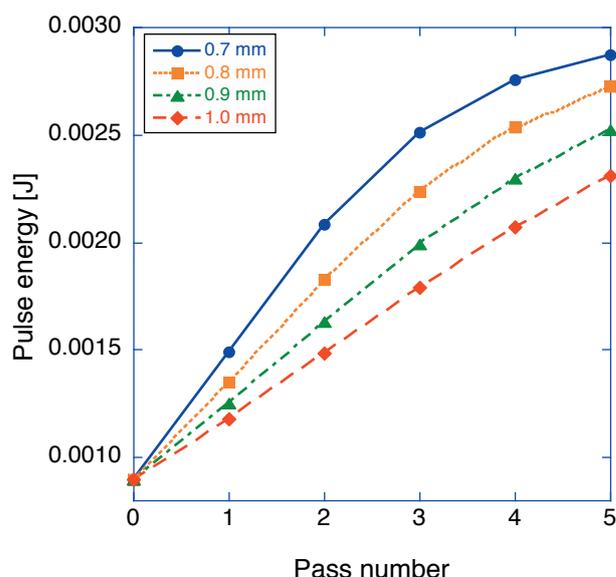


Fig. 2 Evaluation of the output pulse energy as a function of the number of passes in the second stage amplifier for various values of beam diameter at the crystal.

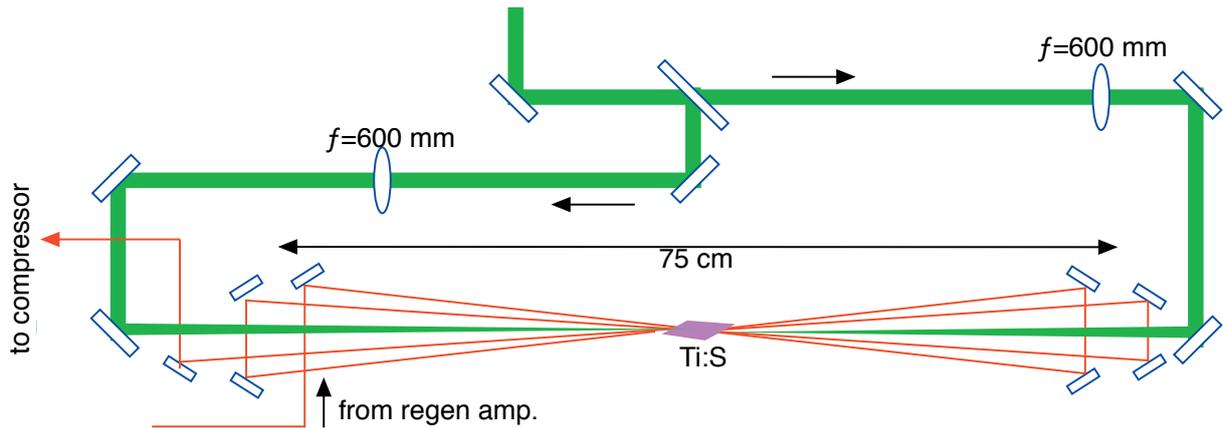


Fig. 3 Setup of the second-stage 4-pass-amplifier. The pump beams are focused to a Ti:sapphire crystal (20 mm length) placed at the center of the amplifier.

て非点収差は残るが2段目増幅器とコンプレッサの間に配置するビーム拡大レンズ対の2枚目（焦点距離750 mm）を縦方向に約 10° 傾けることによりこれを補正した。拡大後のビーム径は9 mmであり、パルス圧縮後は0.8 mJの出力となった。2段目増幅器で追加される分散量は透過光学素子がチタンサファイア結晶の80 mm (4480 fs^2)のみであり、コンプレッサの距離を1.5 mm 広げるだけで容易に分散補償が可能であった。圧縮後のパルスはPG-FROG (Polarization Gating Frequency Resolved Optical Gating) を用いて測定し、コンプレッサの距離と角度の微調整を行った。得られたパルス幅は47 fsでありあり、ほぼフーリエ変換限界であった。

4 まとめと今後の展望

本年度は矢上キャンパスで使用していたCPAシステムを新川崎キャンパスに移設した。システム内のパルスストレッチャの構成を見直すことで、シード光の強度を高めて再生増幅器で発生するASEを抑制した。さらにコンプレッサの構成を見直すことで移設前と比べて1.5倍のパルス出力を得た。一方で、発振器とパルスストレッチャの間に透過率20%の4-f波形整形器を挿入した場合にはASEの影響が出現する。この影響を完全に抑制した前置波形整形を行うにはパルスストレッチャを構成する球面鏡と折返しループ鏡の反射率を高める必要があるだろう。これによりパルスストレッチャの透過率を現在のおよそ5倍に高めることが可能となる。

さらに、出力エネルギー増大のために2段目増幅器の構築を行った。出力エネルギーは最大2.8 mJに

達し、ビーム品質を重視した状態でも2.1 mJの出力であり、パルス圧縮後では0.8 mJの出力を得た。現在よりも2段目増幅器の取出しエネルギーを高めるには励起光強度を高める必要がある。集光レンズをより損失の少ないものに交換する必要がある。これにより、増幅器出力で3.0 mJ程度の出力が見込まれる。一方で、パルスエネルギーの増加に伴ってコンプレッサに入射するビーム径を拡大する必要があるが、現時点ではコンプレッサの折返しループ鏡のサイズによってビーム径が約11 mmに制限される。コンプレッサの透過率向上と共に折返し鏡の交換が必要だろう。

謝辞

レーザの移設作業において多大なるご協力をいただいた丸勝運輸、タレスレーザ、コヒレントジャパンの各担当者様に感謝いたします。

References

- [1] G. Cheriaux, P. Rousseau, F. Salin, J. P. Chambaret, B. Walker, and L. F. Dimauro, "Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification," *Opt. Lett.* 21, 414-416 (1996).
- [2] L. M. Frantz and J. S. Nodvik, "Theory of pulse propagation in a laser amplifier," *J. Appl. Phys.* 34, 2346 (1963).
- [3] A. E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Mill Valley, CA, 1986).