高強度ガラスレーザー用光パラメトリック過程 チャープパルス増幅法による前置増幅部の開発

吉田 英次¹, 宮地 絵理奈¹, 児玉 了祐¹, 藤田 尚徳¹, 北川 米喜²

¹大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

²光産業創生大学院大学 (〒431-1202 静岡県浜松市呉松町1955-1)

Developments of a Front-End System for High-Intense Nd:Glass Laser Used in Optical Parametric Chirped Pulse Amplification

Hidetsugu YOSHIDA,¹ Erina MIYAJI,¹ Ryosuke KODAMA,¹

Hisanori FUJITA,¹ and Yoneyoshi KITAGAWA²

¹Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

²The Graduate school for the Creation of New Photonics Industries, 1955-1 Kurematu-cho, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202

(Received July 28, 2005)

We have constructed the front-end system using a broadband high-gain OPCPA for chirped pulse amplification. This system can deliver the output energy of 65 mJ with 6-nm spectral width at a 1.053- μ m central wavelength. The stability of output energy was substantially improved compared with the Ti:Al₂O₃ regenerative amplifier. These output parameters are appropriate as a seed of PW-class Nd:glass laser system.

Key Words: PW laser, Front-end system, High peak-power laser, Optical parametric chirped pulse amplifier, BBO crystal

1. はじめに

高利得可能なレーザー核融合方式として, “高速点火”核融合は, その実現性が注目され, 基礎研究が開始された¹⁻⁴⁾. 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターでは, 圧縮プラズマへの加熱実験を目指し, 1998年に激光XII号レーザーと同期して動作する100 TW(パルス幅0.5 ps)の大型ガラスレーザーシステム(PW-モジュール)の開発後⁵⁾, 2001年, 新たに前置増幅器部と大型パルス圧縮器部の新設した後, PW級ガラスレーザーシステムが完成し, 2002年より本格的稼働を開始した^{6,7)}.

本システムの活性媒質であるNd:ガラス⁸⁻¹¹⁾は, 熱特性が劣るため高繰り返し動作には不向きであるが, 蛍光スペクトル幅約20 nm以上と比較的広く, 大口径ガラスレーザー装置による高出力化(kJ級)や高輝度化(10^{20} W/cm²以上)が容易に達成可能である. 一方, Ti:Al₂O₃極短パルスレーザーは, 高繰り返し動作(数10 Hz~数 kHz)が可能であり, 広範囲の発光スペクトル域700~1100 nmをもつことから, 数10 fsパルス幅の発生可能で, 最大出力数Jが得られている¹²⁻¹⁷⁾. しかしながら, 高出力Ti:Al₂O₃は, 上準位寿命が室温約3 msと速いため, 励起光には高出力YAGレーザーの2倍高調波が必要である. また, 飽和フルエンスが小さく, 高品質・大型結晶育成が困難であるため, レーザー出力はJ級が限界であり, kJ 級出力は困難である.

本稿では, 高出力, 高安定, 高コントラスト比が得られる極短パルスPW級ガラスレーザー用前置増幅器として, チャープパルス増幅方法として世界に先駆けて採用した光パラメトリック過程によるチャープパルス増幅器(OPCPA: Optical Parametric Chirped Pulse Amplification)のレーザー性能評価について述べる.

2. 前置増幅器の構成配置

本システムの構成配置図をFig. 1に示す. ガラスモード同期発振器により発生された極短パルス光(パルス幅約150 fs)は, 8パス第1伸長器によりパルス幅を 10^4 倍の約1.6 nsに伸長する. 伸長後のパルスエネルギーは約100 pJ(100 mW/100 MHz)と小さいので, OPCPA-Iにより数100 μ Jレベルまで増幅する. 増幅出力光は, 8パス第2伸長器により更に3 ns以上まで伸長した後, OPCPA-IIにより数10 mJまで増幅する^{18,19)}. 回折格子の空間スペースの制限と第2伸長器によるパルス幅可変機能を付加するため, 伸長器は2段構成とした.

OPCPA-IIの出力は, ディスク型ガラス増幅器(口径350 mm)により十分なエネルギーを得た後, 大型パルス圧縮器により再圧縮され, ピーク強度1 PWレベル(500 J, 500 fs)を達成できる. また, 本システムには, 大型パルス圧縮器と同等の小型パルス圧縮器部を設置し, 大型パルス

Fig. 1 Front-end system for PW glass laser.

圧縮器に対応したパルス幅測定を行う。

2.1 LD励起CWモード同期Nd：ガラスレーザー発振器部

短パルス発振器部は²⁰⁾、半導体可飽和吸収体を高速変調素子として用いたLD励起モード同期ガラスレーザー (Time-Bandwidth社製) を採用した。Nd添加ガラス材料は、蛍光スペクトル幅が20～30 nmと広いため、100 fs以下のパルス発生^{21,22)}には優れたレーザー媒質の一つであり、Nd³⁺の800 nm付近の強い吸収バンドは高出力LD励起に最適である²³⁾。大型ガラスレーザーのシード用に開発されたLD励起モード同期ガラスレーザーは、ArレーザーやLD励起YAG・YVO₄の2倍高調波励起の波長1 μm動作のTi:Al₂O₃レーザーと比較すると、低コスト、コンパクト、取り扱いが容易であり、長寿命動作が可能である。

共振器長調整は、基準RF信号99.9800 MHzとレーザー光の一部を受光した高速pinダイオード出力を高速時間アンド回路 (Time to clock) により、PZT素子 (高速) およびピエゾモーター (低速) によってフィードバック制御を行うことにより、数ps精度での同期動作が可能である。レーザー性能は、ピーク波長1056.5 nmの時、auto-correlatorにより測定したパルス幅 (FWHM) 150 fsはsech²関数によく一致し、スペクトル幅 (FWHM) 8.5 nmとの積は、ほぼフーリエ限界に近いパルス列が得られている²⁴⁻²⁶⁾。半導体可飽和吸収素子を使用せず通常の高反射鏡によるCW動作では、最大LD励起入力2.6 Wの時レーザー出力200 mWが得られた。受動モード同期発振は、励起入力2.4 Wの時レーザー出力120 mW以上が得られた。モード同期可能な波長可変範囲は、1052 nmから1067 nmである。

2.2 第1, 2パルス伸長器部

第1および第2伸長器の基本構成は、回折格子と転送光学素子からなる。回折格子はフォログラフィック法により製作しAu蒸着したもので、溝本数は1480本/mmである。発振器出力光は、1パルス抽出用ポッケルスセルとFR回転子を通過後、回折格子面に対して47度で入射した。本システムでは、パルス伸長器は1枚の回折格子によるquadruple type (回折格子表面を8回反射) を使用した。回折格子と球面レンズを所定の長さ2100 mmに配置することにより、パルスの伸長度 (パルス幅) が決まる。折り返し用誘電体多層膜反射鏡は、レンズの焦点距離 $f = 3200$ mmに配置することで、空間チャープを補償する。高反射鏡に

より反射された光は再びレンズと回折格子によって反射された後、2枚組の45度入射高反射鏡によって再び反射される。回折格子表面上でのレーザー光は、上下一直線上に等間隔で8点が並ぶように配置した。同一光路を4回往復したパルス光は、入射パルス幅150 fsから約10⁴倍の約1.6 nsまで伸長した後、45度入射高反射鏡によって取り出し、OPCPA-Iに入射した。入射パワー100 mWの時、回折格子の回折損失 (回折効率0.95の場合、8パス後の反射率0.66) や他の光学素子の反射損失 (レンズの全反射防止膜透過率0.9、誘電体多層膜のクリッピング損失約0.7) 等により、伸長後のレーザー出力は約40 mW (最大出力エネルギー400 pJ) であった。第1伸長器後のスペクトル幅は、折り返し高反射鏡のクリッピング損失により、8.2 nmから7 nmとなった。

第2伸長器は第1伸長器と同一配置であり、OPCPA-Iの増幅出力パルス幅1.6 nsを3.2 nsまで伸長した。第2伸長器出口のスペクトル幅は、約6.5 nmであった。第2伸長器は、折り返し高反射鏡とレンズを同一光学軸上で±10 cm移動可能であり、最終の大型圧縮器部でのパルス幅を約500 fsから数100 psまで可変できる。

2.3 OPCPA-I, II増幅器部

2.3.1 OPCPA技術

非線形光学結晶を用いた光パラメトリック増幅 (OPA) とチャープパルス光増幅 (CPA) を合わせもつOPCPA技術による超短パルス光発生²⁷⁻³⁰⁾の研究は、広帯域波長 (紫外から近赤外域) において、高い利得が得られることから、白色光シード光とOPAによって、波長可変、約10フェムト秒レーザーを実現できる^{31,32)}。また、結晶の熱蓄積が少ないことから、現在市販されているTi:Al₂O₃レーザーよりも高品質、高繰り返し、高平均出力テーブルトップTW級レーザーとなる可能性を秘めている。また、大型非線形光学結晶 (例えばKDP結晶) によるPW級OPCPAレーザーとして、0.35 PW (パルス幅85 fs) も報告されている³³⁾。

前置増幅器部に採用したOPCPAシステムの主な長所を列挙する。

- (1) 利得狭帯化の影響が少なく、広帯域スペクトル約100 nm以上 (約20 fsパルス幅) での増幅が可能である。
- (2) 入射レーザー電界強度による位相差の影響 (B積分値) が少ない。
- (3) ASE光やプリパルスが小さいため、高いコントラスト比 (10⁸以上) が得られる。
- (4) 構成の簡易性から、レーザーの信頼性が高い。
- (5) 小さな利得長にもかかわらず、1段当たり10³以上の高利得が容易に得られる。
- (6) 直接、光から光へのエネルギー変換であり、利得媒質内への熱蓄積が小さいことから、高品質ビームが得られる。

短所として、増幅後のチャープパルス光のレーザー特性は、励起光のレーザー性能に大きく依存する。空間ビーム品質は励起光ビームの空間分布に依存し、増幅光の出力変動は励起光のパルス波形の時間的強度と変動に依存する。このため、励起レーザーには、横モードは

TEM₀₀モード、励起パルス波形は単一縦モードQスイッチパルスを採用し、パルス幅はチャープパルス光より長くしなければならない。また、励起光に対する増幅光の光変換効率は、空間分布および時間波形の重複度に大きく依存する。最大変換効率は、信号光とアイドラー光それぞれ30%程度と報告されている²⁸⁾。

OPCPA増幅器は、第1伸長器後のチャープパルス光1.6 nsを前置増幅するOPCPA-Iと、第2伸長器後のチャープパルス光3 nsを飽和増幅するOPCPA-IIの2段構成である。

2.3.2 高利得増幅器OPCPA-Iのレーザー特性

OPCPA-Iは、Ti:Al₂O₃再生増幅器に代わる高利得増幅器として採用した。Fig. 2にBBO結晶を用いたOPCPA-Iの実験配置図を示す。非線形光学結晶BBO (type-I)は、LBOやKDP結晶に比べ非線形光学定数が大きいため、高利得が得られることから採用した。BBO結晶は位相整合角22.8度にカットされ、各結晶寸法は、1段目5×5×15 mm³と2段目5×5×18 mm³である。励起用レーザーには、単一縦モードQスイッチYAGレーザーの2倍高調波532 nmを用い、最大出力200 mJ、パルス幅6 ns、繰り返し数6 Hzで動作させた。各結晶への励起エネルギーは、λ/2板と偏光子の組み合わせによって調整した。励起光の口径7 mm (1/e)は、2枚の凸レンズの光学系(焦点距離f = 500 mmとf = 150 mm)によって1/3.3倍の口径約2.2 mm (1/e)まで縮小した。BBO結晶表面のレーザー損傷を考慮し、最大励起強度を700 MW/cm²とした。シード光であるチャープパルス光は、1パルス当たりの最大エネルギー約400 pJ、パルス幅1.8 ns、中心波長1053 nm、スペクトル幅7.2 nmである。ビーム径は、ガリレオ光学系によって約1.3 mmまで縮小した。

OPCPA-Iの1段目および2段目の励起強度に対する全利得特性をFig. 3に示す。各段の小信号利得は10³~10⁴であり、飽和は観測されていない。1段目の励起強度430 MW/cm²の時約80 nJ (利得2×10²)が得られ、2段目の最大励起強度620 MW/cm²の時、最大出力約400 μJ (全利得約10⁶)が得られた。1段目の励起光とシード光は同軸上に入射し、2段目の励起光は約1度ずらして入射し、信号光とアイドラー光を分離した。

励起パルス、チャープパルスおよび増幅出力パルスの空間強度分布および近視野像をFig. 4に示す。励起ビームの空間強度分布は、ガウス型分布であり口径約2.2 mm (1/e)である。励起光の空間強度分布による利得狭帯化により、シード光口径1.8 mmに対し、増幅光口径1.3 mmまで

Fig. 2 Optical layout of OPCPA-I system.

Fig. 3 Total gain results from the operation of stage 1 and 2 BBO crystals (OPCPA-I).

Fig. 4 Beam profiles of seed, pump and output pulse for OPCPA-I.

縮小した。励起光空間分布のピーク部の変調は、僅かな利得飽和により緩和された結果、励起光分布を反映したガウス型のTEM₀₀モードが得られた。

増幅利得に対するスペクトル幅およびパルス幅の関係をFig. 5に示す。入射パルス幅1.8 ns、スペクトル幅7.3 nmに対し、利得の増加と共に緩やかに利得狭帯化が観測され、利得10⁵の時、パルス幅は1.55 ns、スペクトル幅は6.2 nmまで低下した。チャープパルス光(1.8 ns)と励起パルス光(擬ガウス型6 ns)の時間ピーク値が合致した場合、励起パルス波形の時間的強度変化により、チャープパルス光の利得も変化する。励起光の時間ジッター±1.8 nsは、増幅光のピーク強度変化では約±20%まで低下するため、緩な利得狭帯化が見られ、本実験結果は、計算結果とほぼ合致した。利得狭帯化現象は、OPCPA-IIの利得飽和による広帯化により無視できる。狭帯化を抑制するには、励起パルス波形のピーク強度を一定(台形波)にする必要がある。

2.3.3 主増幅器OPCPA-IIのレーザー特性

OPCPA-IIは、第2伸長器後のチャープパルス光の主増幅器として採用した。Fig. 6にBBO結晶を用いたOPCPA-IIの実験配置図を示す。基本配置はOPCPA-Iと同じであるが、

Fig. 5 Gain narrowing by pumping pulse shape for OPCPA-I.

Fig. 6 Optical layout of OPCPA-II.

2つの結晶を直列に配置した。各結晶寸法は、 $8 \times 8 \times 15 \text{ mm}^3$ である。励起用レーザーには、単一縦モードQスイッチYAGレーザーの2倍高調波532 nmを用いた。励起光は最大出力エネルギー500 mJ、パルス幅10 ns、繰り返し数6 Hz動作である。チャープパルス光は、パルス幅3 ns以上であるため、励起光のパルス幅を10 nsとした。励起ビームの口径8 mm (1/e)は、5.5 mm口径のハードアパーチャーと像転送光学系によって1/1.5倍の口径2 mm (1/e)まで縮小した。結像点は2個の結晶間に置いた。最大励起強度は、 800 MW/cm^2 である。入射パルス性能は、最大エネルギー約600 μJ 、パルス幅3.2 ns以上、中心波長1053 nm、スペクトル幅7 nm以上である。入射ビーム径は、約1.3 mmから2 mm (1/e)である。

Fig. 7は、励起強度に対するエネルギー利得を示す。励起強度 500 MW/cm^2 の時、小信号利得7000倍以上が得られた。しかしながら、シード光エネルギー約20 μJ (入射強度 0.2 MW/cm^2)では、励起強度 450 MW/cm^2 の時利得は約500倍まで低下した。入射エネルギーを580 μJ (入射強度 6.2 MW/cm^2)まで増加した場合、励起強度 950 MW/cm^2 での利得は90倍となった。シード光強度の増加と共にBBO結晶の利得飽和を観測した。OPCPA-IIの2段結晶の全励起入力に対する出力特性をFig. 8に示す。最大シード光エネルギー約580 μJ の場合、励起エネルギー約300 mJの時最大出力65 mJが得られ、総合効率約23 %を達成した。アイドラー光と合わせると、総合効率は約45 %であった。励起

Fig. 7 Energy gain as a function of pumping intensity at three incident intensities.

Fig. 8 Output energy as a function of pumping energy for OPCPA-II.

およびシードビームの空間分布の重複度約65 %と最大出力時のパルス幅重複度84 %から求めた最大効率は約54 %である。理論上の最大変換効率は約60 %であり、比較的良好一致をみた。

Fig. 9は、(a)励起パルスおよび入射パルス光、と(b)各増幅出力での空間パターンと強度分布を示す。励起ビームおよびシード光の空間強度分布は擬ガウス型分布であり、口径約2 mm (1/e)と1.7 mm (1/e)である。増幅光の空間強度分布は、出力エネルギーによって大きく変化した。利得狭帯化により、出力4.6 mJ時の口径は入射パルス光に比べ、縮小された。出力28 mJでは入射パルスとほぼ同じ強度分布となったが、出力エネルギーが増加すると、シード光空間分布のピーク強度の利得が飽和するのに対し、口径周辺部の利得増加する結果、スーパーガウス型分布の TEM_{00} モードとなった。出力56 mJ時、中央付近に窪んだ空間強度分布は、利得飽和の逆変換結果と予想される。最大エネルギー出力時の口径は、励起光口径とほぼ同じである。増幅光の出力変動率は、線形増幅時は励起強度に依存するため $\pm 8 \%$ 程度であったが、利得飽和に伴い安定し、最大出力時 $\pm 3 \%$ 程度である。

エネルギー利得に対するスペクトル幅(パルス幅)の変化と代表的なパルス波形をFig. 10に示す。入射エネルギー580 μJ の時、入射スペクトル幅7 nm (パルス幅3.5 ns)は、緩やかに増加し、最大利得約90でのスペクトル幅は16.8

Fig. 9 (a) Beam profiles of seed and pumping pulse, and (b) amplified pulses for OPCPA-II.

Fig. 10 Spectral width as a function of energy gain. Temporal profile recorded after saturated amplification.

nm(パルス幅8.4 ns)となった。利得飽和によるスペクトル幅の広帯域化は、空間分布と同様に見られた。最大スペクトル幅は、第2伸長器光学部品のクリッピングと励起パルス幅により制限され、約20 nmである。入射エネルギー20 μ Jの時、OPCPA-Iと同様に、利得10程度では僅かな利得狭帯化が見られたが、利得100からスペクトル幅は増加し、利得500ではスペクトル幅は約10.5 nmとなった。増幅時のパルス波形は、空間強度分布結果と同様に、パルス波形のピーク波長1053 nmの利得飽和により、パルス波形の立ち上がりおよび立ち下がり時間の利得が増加するた

め、台形波となった。OPCPAは、小信号増幅領域では緩やかな狭帯化が見られるが、利得飽和増幅過程になると、緩やかなスペクトル幅の広帯化が見られた。計算結果から、飽和増幅が進行すると、中心波長付近の逆変換過程によりスペクトル歪みが発生し、台形型のスペクトル波形となる事が分かった。通常のCPA増幅では、反転分布スペクトルによる増幅過程での帯域制限から利得狭帯化が見られるが、OPCPAではこれらの問題がなく、むしろ入射スペクトルに比べ広帯域化増幅が可能である。

2.3.4 OPCPAによるスペクトル制御性

シード光を時間原点とし、励起光の遅延時間による増幅光のピーク強度とピーク波長変化をFig. 11に示す。ピーク強度特性は、励起パルス幅に依存するため、ピーク強度の時間幅は約10 nsである。また、シード光の中心波長を線形に変化するため、励起パルス光の遅延時間によって要求される中心波長に設定できる。

よって、励起パルスの波形整形技術によって、任意の増幅パルス波形を整成できる。また、増幅パルス光の出力安定度は、励起パルス波形の時間ジッターや波形振幅度によって、大きく依存していることを意味している。

また、利得の増加とスペクトル幅の広帯域化の方法として、多段結晶による増幅を行った。4段直列配置のBBO結晶による増幅実験を行い、スペクトルを測定した結果をFig. 12に示す。入射スペクトル幅約7 nmに対し、各結晶の位相整合角を任意の増幅波長(1046, 1050, 1056, 1061 nm)に合致させることにより、18.5 nmの広帯域(回折格子のクリッピングにより制限)まで増幅することができた。1個のBBO結晶を用いた場合でも、利得帯域幅100 nmが可能であり、数個のBBO結晶による数100 nmの広帯域高利得増幅が可能である。

2.4 小型パルス圧縮器部(パルス幅測定器部)

小型パルス圧縮器は、PW級レーザー用大型パルス圧縮器(ビーム口径500 mm, 回折格子寸法950 mm)と同等の光学配置で構成した。PWレーザーは、第2伸長器部のレン

Fig. 11 Wavelength turning by pumping laser timing.

Fig. 12 Spectral broadening of amplified pulse using four BBO crystals.

ズと高反射鏡の移動距離によって、最終圧縮後のパルス幅を500 fsから数100 psまで可変可能であり、大型パルス圧縮後のパルス幅モニターとして設置した。

OPCPA-IIによって増幅されたチャープパルス光は、口径15 mmに拡大された後、対称に配置された2枚の回折格子によって圧縮した。レーザー光は、回折格子面に対して47度で入射した。回折格子間隔は大型圧縮器9.6 mに対し、小型圧縮器の回折格子間隔は4.8 mとし、2枚組の45度入射高反射鏡によって2往復した後、圧縮パルス光はクリップ用反射鏡によって取り出した。圧縮パルス光は、auto-correlatorによるパルス幅およびスペクトル幅測定を行った。

ピーク波長1054 nmの時、auto-correlatorにより測定したパルス幅(FWHM)およびスペクトル特性をFig. 13に示す。パルス幅350 fsはsech²関数によく一致し、スペクトル幅(FWHM) 5.3 nmとの積は、ほぼフーリエ限界に近いパルス幅が得られている。入射スペクトル幅7 nmに対し、2番目の回折格子のスペクトルクリッピングによって5.3 nmに制限された。スペクトル幅5.3 nmは、ガラス増幅器の利得狭帯化により、大型圧縮器部でのスペクトル幅~3.5 nmに比べ広い。圧縮パルスのペダスタルパルスは、スペクトル

Fig. 13 Recompressed pulse intensity by single-shot autocorrelation.

ルクリッピングによる成分である。OPCPAを用いた増幅後の圧縮パルスのプリパルス比測定では、OPCPAの総合利得と同じ 10^{-8} 以下であることを確認した³⁴⁾。一方、Ti:Al₂O₃再生増幅器の場合、切り出し用ポッケルスセルのSN比により制限され、 10^{-3} 程度であった。

3. まとめ

高出力、高安定、高コントラスト比が得られる極短パルスPW級ガラスレーザー用前置増幅器の開発を行った。

発振器出力光は、2段構成のパルス伸長器により、発振器パルス幅の約2万倍の3.2 nsまで伸長し、チャープパルス光とした。増幅器には、世界に先駆けてOPCPA技術を採用し、利得の狭帯化なしで所定のチャープパルス増幅(スペクトル幅6 nm以上、パルス幅3 ns以上)が可能となった。出力パルス光のプリパルス比は 10^{-8} 以下であり、TEM₀₀モード、高効率23%で最大出力65 mJが安定に得られた。

今回、採用したOPCPA技術は、簡易で高利得、高いコントラスト比が得られることから、Ti:Al₂O₃再生増幅器より優れている。また、高利得大型非線形結晶(例えばKDP結晶)を用いたOPCPA装置により、現状のTi:Al₂O₃レーザーでは不可能な高品質ビーム、数10フェムト秒、数PW級の出現が可能となる。このため、高速点火慣性核融合用高強度レーザー、超高密度プラズマ生成による高輝度X線発生やX線レーザー励起、中性子源が比較的小型システムで実現可能である。

謝 辞

詳細にわたる御指導、御助言を賜りました大阪大学レーザーエネルギー学研究センター中塚 正大教授、宮永憲明教授、三間 罔興センター長、井澤 靖和前センター長、山中 龍彦元センター長に深く感謝致します。

参考文献

- 1) M. Tabak, J. Hammer, M. E. Glinsky, W. L. Kruer, S. C. Wilks, J. Woodworth, E. M. Campbell, and M. D. Perry: Phys. Plasmas **1** (1994) 1626.
- 2) R. Kodama, K. Takahashi, K. A. Tanaka, M. Tsukamoto, H. Hashimoto, Y. Kato, and K. Mima: Phy. Rev. Letts. **77** (1996) 4906.
- 3) R. Kodama, P. A. Norreys, K. Mima, A. E. Dangor, R. G. Evans, H. Fujita, Y. Kitagawa, K. Krushelnick, T. Miyakoshi, N. Miyanaga, T. Norimatsu, S. J. Rose, T. Shozaki, K. Shigemori, A. Sunahara, M. Tambo, K. T. Tanaka, Y. Toyama, T. Yamanaka, and M. Zepf: Nature **412** (2001) 798.
- 4) R. Kodama, H. Shiraga, Y. Toyama, S. Fujioka, H. Azechi, H. Fujita, H. Habara, T. Hall, Y. Izawa, T. Jitsuno, Y. Kitagawa, K. M. Krushelnick, K. L. Lancaster, K. Mima, K. Nagai, M. Nakai, H. Nishimura, T. Norimatsu, P. A. Norreys, S. Sakabe, K. T. Tanaka, A. Youssef, M. Zepf, and T. Yamanaka: Nature **418** (2002) 933.
- 5) Y. Kato, Y. Kitagawa, K. A. Tanaka, R. Kodama, H. Fujita, T. Kanabe, T. Jitsuno, H. Shiraga, H. Takabe, M. Murakami, H. Nishimura, and K. Mima: Plasma Phys. Control. Fusion **39** (1997) A145.
- 6) Y. Kitagawa, H. Fujita, R. Kodama, H. Yoshida, T. Jitsuno, S. Sakabe, K. A. Tanaka, H. Nishimura, Y. Izawa, K. Mima, and T. Yamanaka: CLEO Pacific Rim 2001 Tech. Digest MC2-1 (2001)

- 7) Y. Kitagawa, H. Fujita, R. Kodama, H. Yoshida, T. Jitsuno, S. Sakabe, K. A. Tanaka, H. Nishimura, Y. Izawa, K. Mima, and T. Yamanaka: IFSA 2001 Tech. Digest. **IFSA1272** (2001) 71.
- 8) Y. Beaudoin, C. Y. Chien, J. S. Coe, J. L. Tapie, and G. Mourou: Opt. Lett. **17** (1992) 865.
- 9) C. Rouyer, E. Mazataud, I. Allais, A. Perry, S. Seznec, C. Sauteret, G. Mourou, and A. Migus: Opt. Lett. **18** (1993) 214.
- 10) K. Yamakawa, H. Shiraga, Y. Kato, and C. P. Barty: Opt. Lett. **16** (1991) 1593.
- 11) K. Yamakawa, H. Sugio, H. Daido, M. Nakatsuka, Y. Kato, and S. Nakai: Opt. Commun. **112** (1994) 37.
- 12) K. Yamakawa, M. Aoyama, Y. Akahane, J. Ma, N. Inoue, H. Ueda, and H. Kiriya: レーザー研究 **30** (2002) 747.
- 13) V. Babnoud and F. Salin: Appl. Phys. B **70** (2000) 165.
- 14) J. K. Kmetec, J. J. Macklin, and J. F. Young: Opt. Lett. **16** (1991) 1001.
- 15) A. Sullivan, H. Hamster, H. C. Kapteyn, S. Gordon, W. White, H. Nathel, R. J. Blair, and R. W. Falcone: Opt. Lett. **16** (1991) 1406.
- 16) C. Le. Blanc, G. Grillon, and J. P. Chambaret: Opt. Lett. **18** (1993) 140.
- 17) K. Yamakawa and C. P. J. Barty: IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **6** (2000) 658.
- 18) H. Yoshida, E. Ishii, K. Sawai, R. Kodama, H. Fujita, Y. Kitagawa, S. Sakabe, Y. Izawa, T. Yamanaka, and M. Fujita: CLEO 2001 Tech. Digest. CMT7 (2001) 99.
- 19) H. Yoshida, E. Ishii, K. Sawai, R. Kodama, H. Fujita, Y. Kitagawa, S. Sakabe, Y. Izawa, T. Yamanaka, and M. Fujita: CLEO Pacific Rim 2001 Tech. Digest MC3-2 (2001) I-80.
- 20) 吉田 英次, 児玉 了祐, 藤田 尚徳, 加藤 義章, 三間 圀興: レーザー研究 **27** (1999) 291.
- 21) C. Spielmann, F. Krausz, T. Brabec, E. Wintner, and A. J. Schmidt: Appl. Phys. Lett. **58** (1991) 2470.
- 22) F. X. Kartner, D. Kopf, and U. Keller: *Ultrafast Phenomena IX* (Springer-Verlag, Berlin) (1994) 458.
- 23) S. Basu and R. L. Byer: Opt. Lett. **13** (1988) 458.
- 24) U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd, T. H. Chiu, J. F. Ferguson, and M. T. Asom: Opt. Lett. **17** (1992) 505.
- 25) U. Keller: Appl. Phys. Lett. **B58** (1991) 2470.
- 26) D. Kopf, F. X. Kartner, U. Keller, and K. J. Weingarten: Opt. Lett. **20** (1995) 1169.
- 27) A. Dubietis, G. Jonusauskas, and A. Piskarskas: Opt. Commun. **88** (1992) 437.
- 28) I. N. Ross, P. Matousek, M. Towrie, A. J. Langley, and J. L. Collier: Opt. Comm. **144** (1997) 125.
- 29) J. Collier, C. Hernandez-Gomez, I. N. Ross, P. Matousek, C. N. Danson, and J. Walczak: Appl. Opt. **38** (1999) 4786.
- 30) I. N. Ross, J. Collier, P. Matousek, C. N. Danson, D. Neely, R. M. Allott, D. A. Pepler, C. Hernandez-Gomez, and K. Osvay: Appl. Opt. **39** (2000) 2422.
- 31) T. Wilhelm, J. Piel, and E. Riedle: Opt. Lett. **22** (1997) 1494.
- 32) A. Shirakawa, I. Sakane, and T. Kobayashi: Opt. Lett. **23** (1998) 1292.
- 33) O. Chekhlov, J. L. Collier, I. N. Ross, P. Bates, M. Notley, W. Shaikh, C. N. Danson, D. Neely, P. Matousek, and S. Hancock: CLEO Europe 2005 Tech. Digest CG1-6 (2005) 42.
- 34) H. Yoshida, E. Ishii, R. Kodama, H. Fujita, Y. Kitagawa, Y. Izawa, and T. Yamanaka: Opt. Lett. **28** (2003) 257.