高強度レーザー用反射型波形整形システムと 周波数分解光ゲート法によるその特性評価

伊藤 晴康, 浦上 恒幸, 吉田 成浩, 伊ヶ崎 泰則, 細田 誠
浜松ホトニクス株式会社 中央研究所 (〒434-8601 静岡県浜北市平口5000)

Reflect-Type, Highpower-Laser Pulse Shaping System and its Operation Verified by Frequency Resolved Optical Gating

Haruyasu ITOH, Tsuneyuki URAKAMI, Narihiro YOSHIDA
Yasunori IGASAKI, and Makoto HOSODA

Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K.K., 5000 Hirakuchi, Hamakita, Shizuoka 434-8601

(Received February 14, 2000)

We demonstrated reflect-type pulse shaping of high-power femtosecond pulses from a Ti:sapphire regenerative amplification system that generates 4.0-μJ pulses of less than 70-fs pulsewidth at a 250-kHz repetition rate with an average power of 1.0 W. The PAL-SLM (Parallel Aligned nematic Liquid crystal Spatial Light Modulator) contained in our pulse shaping apparatus was evaluated and was able to modulate high peak power pulses up to 2.4×10^7 W. As a result, the pulse shaping system was used to generate high-power double pulses, as was confirmed by FROG (Frequency Resolved Optical Gating).

Key Words: Femtosecond pulses, Frequency resolved optical gating, Pulse shaping, Spatial light modulator

1. はじめに

近年, チャープパルス増幅技術の発展に伴い, 高強度フェムト秒レーザーが実現され, テラワット以上のピークパワーを持つものも可能となってきた¹⁾. このようなレーザーによる光相互作用では, 例えば, フェムト秒アブレーション²⁾, XUV光発生³⁾, レーザー航跡場による粒子加速⁴⁾, 核融合による中性子発生⁵⁾等, 種々の新しい現象が興味を引きつつある. これら現象の多くは超短光パルスの非常に強い光電場によって生起するため, 光電場自身の振幅のみならずチャープも含めた波形整形により, 現象の発生効率向上やコヒーレント制御等を行える可能性がある. しかしながら, これまで波形整形技術^{6,7)}は弱いフェムト秒パルスに対しての報告(例えば, 半導体量子井戸における励起子の生成消滅やTHz波発生をコヒーレント制御する手段として使用された報告^{8,9)})はあるが, 高強度フェムト秒パルスに対して適用された例は少ない¹⁰⁾. これは高強度レーザーに対する波形整形器の耐性や, その構成が明確にされていないためと考えられ, それに対する実際の適用例を報告することは価値があると考え. 筆者等は, 波形整形された高強度光パルスと物質との相互作用制御を目的として, 高強度光パルスの波形整形および波形観測システムの開発を行っており, 本論文では実際に試作したシステムの特性評価を行ったので報告する.

2. 実験装置

2.1 マルチショットFROG (Frequency Resolved Optical Gating)

波形整形が正常になされたことをモニターするためには超短光パルスの振幅と位相とを正確に把握する必要がある. 超短光パルスの振幅と位相を計測する手法としては, IRIS法¹¹⁾, FROG法¹²⁾, SPIDER法¹³⁾等があげられるが, 筆者等の中でも簡便かつ高感度の計測が可能なFROG法を用いた. FROG法は, 位相回復法を非線形相関計測に取り入れた手法であり, 非線形相互作用としては偏光ゲート, 自己回折, SHG, THG等が用いられる. この際, 自己相関系の遅延時間を変えながら非線形相互作用により得られる光を分光計測することにより縦軸スペクトル, 横軸遅延時間の2次元の像(以下FROG像)が得られ, この像を解析してパルス波形の再構築を行う. 筆者等は, 後述する波形整形器のモニター光計測に用いるため, 前記非線形相互作用の中で最も高感度な計測が可能なSHG-FROGを選択し, それを自作した. Fig.1に試作したSHG-FROGの概略図を示す. 前段の自己相関系では, 光学素子の分散による影響を避けるためにハーフミラー以外は全て金蒸着ミラーによる反射光学系を用いた. 集光用凹面鏡の曲率半径は150mmであり, SHG結晶には厚さ300μmのBBO(浜松ホトニクス製, X7521)を用いた. また, 分光器の構成はツェル・ターナー型とし, スリット幅を50μm, 凹面鏡の曲率半径を250mmと

Fig.1 Multi-shot SHG FROG.

することにより、0.5nm以下の分解能が得られている。一方、検出器には裏面入射CCD(浜松ホトニクス製、S7030-0906)を用いている。裏面入射CCDは90%以上の量子効率が得られると共に、UV域での高感度を特長とする微弱光検出用イメージセンサであるため、SHG-FROGに適した検出器である。前記検出器からのデータを遅延時間約13.3fsステップ(遅延距離 $2\mu\text{m} \times 2$ 、最小分解能 $1\mu\text{m} \times 2$)にて128回取得し、 128×128 のデータから波形を再構築する。以上より、このFROGでは例えば、CCD蓄積時間を5秒、積算回数を1回として、繰り返し周波数96MHz、パルス幅60fs、中心波長790nmの光を計測する場合に必要なとされる最小光強度は $30\mu\text{W}$ という高感度性が達成され、低強度から高強度までの広い範囲における波形整形システムの特性評価が可能となった。

2.2 高強度レーザー用平行配向ネマチック液晶空間光変調器

波形整形器では、グレーティング等を用いて入射光をフーリエ変換し、フーリエ成分が空間的に展開されたフーリエ面上で空間光変調器により変調を加え、その後逆フーリエ変換することにより整形された光パルスが得られる。この空間光変調器には、一般的には電気信号アドレス型の素子を用いられるが、電極パターンなどの画素構造による回折光が発生して位相変調パターンに歪みが生じたり、開口率による光利用効率の低下といった問題が懸念される。

これらの問題を解決するために、筆者等はFig.2に示されるPAL-SLM(Parallel Aligned nematic Liquid crystal Spatial Light Modulator, 浜松ホトニクス製、X7665)¹⁴⁾を変調素子として用いた。PAL-SLMでは、光アドレス材料である水素化アモルファスシリコン($\alpha\text{-Si}$)に照射される書き込み光(変調パターンに対応した空間パターンを有する光)の強度に応じて $\alpha\text{-Si}$ の抵抗が変化、すなわち液晶部分に印加される電圧が変化し、これに伴って読み出し光(波形整形器への入射光)が位相変調される。また、PAL-SLMと電気アドレス型の液晶ディスプレイ(LCD)を光学伝達素子で結合するモジュール(浜松ホトニクス製、X7550)¹⁵⁾を用いることにより、パソコンの画面と一対一に対応した2次元的な変調が可能となっている。このモジュールにおいては、パソコンで作製されたVGA(640×480 画素)256階調画像がLCDに

Fig.2 Structure of PAL-SLM.

表示されると共に、このLCDを透過したLDコリメート光がSLMに結像され、その結果前記画像に応じた書き込み光の強度パターンが得られる。使用したPAL-SLMでは約 $210\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の書き込み光強度、画像レベル193階調に対して 2π の位相変調量が得られる。ただし、従来のPAL-SLMは低強度の読み出し光を対象として設計されていたために、高強度の読み出し光を用いた場合には誘電体多層膜鏡からの漏れ光が書き込み光に重畳し、設定通りの変調が得られなくなり、整形が正常に行われなくなる。そこで筆者等は、空間光変調器として高強度耐性PAL-SLMを用いた波形整形器の構築を試みた。このPAL-SLMでは、高強度のレーザー光に対しても前述の問題が生じない様に誘電体多層膜鏡と $\alpha\text{-Si}$ との間に従来より吸収率の高い遮光層が配置されている。実際にTi:sapphire再生増幅システム(パルス幅約70fs)より得られる高強度のレーザー光を用いて耐光強度特性を評価した。Fig.3に示す波形整形器の出力側グレーティングの位置にグラン・トムソン偏光プリズムおよび光パワーメーターを配置した状態で、SLMの印加電圧を一定として入射光量を変化させた場合の位相変化をFig.4に示す。尚、レーザー光の偏光は紙面に対して水平と

Fig.3 Pulse Shaper.

Fig.4 Phase variation versus input power.

し、SLMの配向方向がレーザー光の偏光に対して45度の角度をなす構成とした。Fig.4より、改良後のSLMでは再生増幅された光程度では漏れ光の影響がほとんど観測されないため、十分に波形整形が可能であることが確認される。

2.3 反射型波形整形器

高強度フェムト秒光パルスを用いる場合、光学素子等において発生する位相分散、自己位相変調および透過型素子の損傷が問題となる。波形整形においても例外ではなく、これらの問題を避けるために反射型構成のシステムを構築した。Fig.3に示される波形整形システムでは、光学素子の分散による影響を避けると共に、装置の小型化を図るために曲率半径700mmのシリンドリカルミラー（低分散誘電体多層膜蒸着）および前述した反射型空間光変調器を用い、さらに光のロスを避けるために位相変調だけを用いて整形を試みた。オシレーターからの光を直接用いる場合には、平凹レンズ($f50$)および平凸レンズ($f200$)から構成される拡大光学系によりビーム径を拡大する。一方、後述する増幅された光を用いる場合には波形整形器に入射する段階でビーム径が拡大されているために、直接波形整形器に入射する。グレーティングへ入射する光のビーム径を拡大することにより、SLM上での波長分解能の向上が図られるとともに、入射光がSLMの有効領域(20mm×20mm, 480×480画素)の広範囲にわたって照射されるため、SLMの漏れ光の影響、および素子の損傷等が極力抑えられる。また、グレーティングは溝本数830本/mm、ブレイズ波長800nmのブレイズド・ホログラフィック・グレーティングを用いており、波形整形器入射光に対する出射光の透過率は約40%である。透過率が40%と低いのは、グレーティングの回折効率に依存しているためである。また前記構成では、20mmの領域に照射される波長範囲は約70nmであるため、被整形光パルスのスペクトルはこの範囲に制限される。

波形整形された光をFROGにより計測する場合は、FROG前段に平凹レンズ($f50$)および平凸レンズ($f200$)から構成される縮小光学系を配置し、ビーム径を縮小した状態で計測する。尚、光学系にレンズ等種々の分散媒質が含まれて

いる場合には、光パルスが分散を受けることになる。本波形整形器では、グレーティングとシリンドリカルミラーとの間隔を調整することにより前記分散を補正する。

2.4 分散媒質を用いたFROGおよび波形整形器の動作確認

BK7ガラスの屈折率は以下に示されるセルマイヤー・ヘルムホルツの式によりあらわされる*。

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{1.01237433\lambda^2}{\lambda^2 - 5.88328615 \times 10^{-3}} + \frac{2.58985218 \times 10^{-1}\lambda^2}{\lambda^2 - 1.90239921 \times 10^{-2}} + \frac{1.00021628\lambda^2}{\lambda^2 - 1.04079777 \times 10^2} \quad (1)$$

一方、光パルスの位相 $\phi(\omega)$ は中心角周波数 ω_0 を中心に

$$\begin{aligned} \phi(\omega) &= \phi(\omega_0) + \dot{\phi}(\omega_0) \Big|_{\omega=\omega_0} \\ &\quad \times (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2!} \ddot{\phi}(\omega_0) \Big|_{\omega=\omega_0} \\ &\quad \times (\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{3!} \dddot{\phi}(\omega_0) \Big|_{\omega=\omega_0} \\ &\quad \times (\omega - \omega_0)^3 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

と展開される。このうち、0次の項は単純なオフセットであり、1次微分の項は時間軸方向のシフトをあらわすものである。したがって、時間波形に変化を及ぼすのは2次微分以上の項となるが、3次微分以上の項は微々たる量でありパルス幅100fs程度の光パルスの場合にはほとんど無視できる。そこで、2次微分の項だけを用いて長さ $L = 250\text{mm}$ のBK7ガラスブロックの場合の位相遅延を計算すると、光パルスはFig.5に示す位相遅延を受けることになる。ただし、

$$\ddot{\phi}(\omega) = \frac{\lambda^3 L}{2\pi c^2} \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (3)$$

である¹⁶⁾。

この既知の位相遅延量を用いてFROGおよび波形整形器の動作確認が行える。その概念図をFig.6 (a)～(c)に示

Fig.5 Phase distortion for BK7 glass (250 mm length).

* SCHOTT Optical Glassカタログ

Fig.6 Experimental setup to evaluate the system.

す。まず(a)波形整形器の設定を無変調状態として再生増幅をしない通常のTi:sapphireレーザー(Clark-MXR, NJA-4)光がFig.3に示される波形整形器を伝搬した後の光パルス、および(b)波形整形器の設定を無変調状態として波形整形器伝搬後に長さ250mmのBK7ガラスブロックを伝搬した後の光パルスの状態をFROGにて計測した結果をそれぞれFig.7 (a)~(c), およびFig.8 (a)~(c)に示す。図中の(a)がFROG像, (b)および(c)が解析後のスペクトル波形ならびに時間波形である。Fig.5に示される理論値とFig.8 (b)に示される実測値とが概ね一致している様子が確認され, FROGが正しく動作していることがわかる。さらに, 波形整形器を用いてFig.5に示されるBK7ガラスブロックの位相遅延の理論値と符号が逆の分散を与えて元のパルス波形に整形し直したときに得られる光パルスの状態(Fig.6 (c))を計測した結果をFig.9 (a)~(c)に示す。Fig.7とFig.9とが概ね一致していることから, 波形整形器によってほぼ設計通りの位相変調が行われている様子が確認される。

3. 高強度光パルスを用いた実験および結果

Ti:sapphire再生増幅器システム(COHERENT, RegA 9000)から得られる高強度光パルスをダブルパルスに波形整形

Fig.7 (a): SHG FROG trace of a pulse from a Ti:sapphire oscillator, (b): retrieved spectrum, and (c) temporal waveform and phase.

Fig.8 (a): SHG FROG trace of a chirped pulse from a Ti:sapphire oscillator, (b): retrieved spectrum, and (c) temporal waveform and phase.

Fig.9 (a): SHG FROG trace of a compensated pulse from a Ti:sapphire oscillator, (b): retrieved spectrum, and (c): temporal waveform and phase.

した例を以下に示す。前記システムより得られる光パルスのビーム径は, グレーティングに入射する時点で直径11mmである。また, システムの繰返し周波数は250kHz, パルス幅は65fs, SLMに照射される平均光強度は394mWであり, ピークパワーにして 2.4×10^7 Wである。

3.1 高強度レーザー光使用時における波形整形器の動作確認

長さ250mmのBK7のガラスブロックを用いてシステムの動作確認の際に行った実験と同様な実験を行った。各条件の下で得られる光パルスの状態をFROGを用いて計測した際に得られたFROG像をFig.10 (a)~(c)に示す。尚, Fig.10 (b)に示される波形整形器の設定を無変調とした状態でガラスブロックを伝播させた後の光パルスの状態がFig.8 (a)に示される結果と異なるが, これは光学系に配置されたレンズあるいはBK7ガラスブロック中において自己位相変調が生じたことが原因と考えられる。

ガラスブロックによって生じる線形なチャープと同等量の逆分散を与えたことで, 再度パルスが圧縮されているので, 高強度光パルスに対してもSLMによる位相変調はかけられていることは確認される。ただし, 自己位相変調によって生じたスペクトル歪みや広帯域化を正しく補正しているわけではないので, 完全にTi:sapphire再生増幅器システムを出射した直後の状態に戻っているわけではない。

3.2 高強度レーザーのダブルパルスへの整形

次に, 高強度光パルスのダブルパルスへの整形を試みた。前記再生増幅システムより得られるほぼトランスフォーム限界な光パルスを, パルス幅100fs, パルス間隔500fsのダブルパルス(sech²)に整形するための位相変調フィルタをFig.11 (a)に示す。位相フィルタの決定は, 簡易

Fig.10 Experimental result for evaluation. (a): no phase modulation, (b): no phase modulation + BK7 (250 mm), and (c): dispersion compensation + BK7 (250 mm).

Fig.11 (a): Phase filter for double pulse.

的な決め方として以下の手順で決定している。まず、変調される光パルスの時間波形、スペクトル波形はあらかじめFROGによって求めておく。通常Gerchberg-Saxton法¹⁷⁾は、時間波形とスペクトル波形におけるそれぞれの振幅が既知かつ位相が未知の場合に位相回復に用いられる方法であるが、ここでは位相フィルタとスペクトル波形における位相が未知であるとして、スペクトル波形と目的の時間波形(ここではダブルパルス波形)の振幅を拘束条件として同様に繰り返し演算を行い、収束値をフィルタに用いている。図中(b)が得られたFROG像、(c)および(d)が解析結果である。概ね設計通りの位相変調が行われているが、自己位相変調に起因すると見られるスペクトルや時間波形のビートが確認される。

3.3 考察

上記2つの実験結果より、透過型光学素子を含む光学系内で生じた自己位相変調は、波形整形器の性能を著しく低下させることがわかり、これを防ぐ意味でも反射型は有利である。尚、その他の外部要素による自己位相変調の問題を解決するためには、FROG像から光パルス波形を再構成した結果をフィルタにフィードバックする方法、理想的に波形整形が行われた場合のFROG像と実験結果のFROG像の差分をフィルタにフィードバックする方法などを用いるという対応が必要であると考えられる^{10,18-20)}。

4. まとめ

本研究では、高強度レーザー用波形整形器および光パルス波形計測システムを構築し、Ti:sapphire再生増幅システムから得られる繰り返し周波数250kHz、パルス幅65fs、SLMに照射される平均光強度0.4W、ピークパワー $2.4 \times 10^7\text{W}$ 程度の光強度レベルまでは十分に波形整形に供する位相変調をかけることができることを確認した。今後は、さらに高強度のTWレーザー等の波形整形を行うためにシステムの改良を行い、構築したシステムを用いて高強度光パルスと物質との相互作用の研究を行う予定である。

参考文献

- 1) G. A. Mourou, C. P. J. Barty, and M. D. Perry: Phys. Today **51** (1998) 22.
- 2) 熊谷 寛: 応用物理学会誌 **67** (1998) 1051.
- 3) B. Pirauz, A. L. L'Huillier, and K. Rzazewski (ed): *Super-Intense Laser-Atom Physics* (Series B: Physics Vol.316, Plenum, New York, 1993).
- 4) D. Umstadter, S.-Y. Chen, A. Maksimchuk, G. Mourou, and R. Wagner: Science **273** (1996) 472.
- 5) T. Ditmire, J. Zweiback, V. P. Yanovsky, T. E. Cowan, G. Hays, and K. B. Wharton: Nature **398** (1999) 489.
- 6) M. M. Wefers and K. A. Nelson: Opt. Lett. **20** (1995) 1047.
- 7) A. M. Weiner, D. E. Learid, J. S. Patel, and J. R. Wullert: IEEE J. Quantum. Electron. **28** (1992) 908.
- 8) K. Komori, T. Asahara, T. Sugaya, M. Watanabe, and T. Hidaka: Proc. LEOS'98 **1** (1998) p.59.
- 9) I. Brener, P. C. M. Planken, M. C. Nuss, M. S. C. Luo, S. L. Chuang, L. Pfeiffer, D. E. Leaird, and A. M. Weiner: J. Opt. Soc. Am. **B 11** (1994) 2457.
- 10) T. Brixner, M. Strehle, and G. Gerber: Appl. Phys. **B 68** (1999) 281.
- 11) K. Naganuma, K. Mogi, and H. Yamada: IEEE J. Quantum Electron. **QE-25** (1989) 1201.
- 12) R. Trebino, K. W. DeLong, D. N. Fittinghoff, J. N. Sweetser, M. A. Krumbugel, and B. A. Richman: Rev. Sci. Instrum. **68** (1997) 3277.
- 13) L. Gallmann, D. H. Sutter, N. Matuschek, G. Steinmeyer, and U. Keller: Opt. Lett. **24** (1999) 1314.
- 14) N. Mukohzaka, N. Yoshida, H. Toyoda, Y. Kobayashi, and Tsutomu Hara: Appl. Opt. **33** (1994) 2804.
- 15) Y. Igasaki, F. Li, N. Yoshida, H. Toyoda, T. Inoue, N. Mukohzaka, Y. Kobayashi, and T. Hara: Opt. Rev. **6** (1999) 339.
- 16) R. L. Fork, C. H. Brito Cruz, P. C. Becker, and C. V. Shank: Opt. Lett. **12** (1987) 483.
- 17) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton: Optik **35** (1972) 237.
- 18) F. G. Omenetto, B. P. Luce, and A. J. Taylor: J. Opt. Soc. Am. **B 16** (1999) 2005.
- 19) D. Yelin, D. Meshulach, and Y. Silberberg: Opt. Lett. **22** (1997) 1793.
- 20) M. Shiozawa, M. Suzuki, M. Sato, K. Takasago, and F. Kannari: Technical Digest of CLEO/Pacific Rim '99, Seoul, 30 Aug.-3 Sep. (1999) p.670.