

# 非線形記録回折素子による高次群遅延分散の自動補償

電気通信大学 電子工学専攻 西岡研究室 富田 仁

## 1. 超短パルス波形制御

モード同期超短パルスレーザー[1]は光エネルギーを 10 fs (光が真空中を 3 μm 進む時間) 以下の時間幅に集中することで平均出力を抑えながら高い尖頭出力を得ることができる。10 fs の光パルスは 30 THz 以上の帯域幅を持ち、ガラス数 mm もしくは空気数 m の伝播で群遅延分散(Group Delay Dispersion: GDD)によりパルスが広がる。このため、GDD の補償が必要である。

フェムト秒パルス発振器で得られるパルスエネルギーはキャビティダンピングや長い共振器構成を用いても数百 nJ[2]で、その尖頭出力は 10<sup>6</sup> W/cm<sup>2</sup> 程度である。このようなパルスを増幅する場合、チャープパルス増幅(Chirped pulse amplification: CPA)システ

ム[3]が用いられる。これにより得られる集光強度は 10<sup>20</sup> W/cm<sup>2</sup> に達する。

10 fs の CPA システムでは伸長・増幅後にパルス幅を 10 fs まで圧縮することが困難である。これは、利得狭窄と高次群遅延分散(Higher order dispersion: HOD)が原因である。特に図 1 に示すように HOD による波形歪みはサテライトパルスやペDESTALをとめない、高強度レーザー応用[4]で問題となる。

HOD の補償は精密な分散設計のもとガラスブロック、回折格子対[5]、プリズム対[6]、チャープミラー[7]を駆使する方法では限界に近づいている。これは 3 次分散及び 4 次分散の符号や割合は素子によりある程度決まっており、現実的なパラメータは限られるためである。表 1 にガラス、増幅媒質、プリズム対、回折格子対の GDD を示す。

GDD の任意補償に向け、コンピュータ制御可能な液晶空間光変調器[8]やデフォーミングミラー[9]を用いて群遅延をフィードバックする手法が見られるようになった。

筆者は GDD 補償の方法として周波数位相共役波[10]の発生に注目し、非線形過程でパルス波形を記録する回折素子の研究を行った。本研究は、10 fs の CPA システム中の HOD を自動補償することを目的として非線形記録回折素子の特性を評価し、それをもとに CPA システムへの応用を検討したものである。

表 1 光学素子の 800 nm における GDD。

	SOD (fs <sup>2</sup> )	TOD (fs <sup>3</sup> )	FOD (fs <sup>4</sup> )	SOD : TOD : FOD (fs <sup>2</sup> ) (fs <sup>3</sup> ) (fs <sup>4</sup> )
Fused Silica 10 cm	3.6 × 10 <sup>3</sup>	2.8 × 10 <sup>3</sup>	-1.1 × 10 <sup>3</sup>	1 : 0.76 : -0.32
BK7 10 cm	4.5 × 10 <sup>3</sup>	3.2 × 10 <sup>3</sup>	-1.1 × 10 <sup>3</sup>	1 : 0.71 : -0.24
SF10 10 cm	1.6 × 10 <sup>4</sup>	1.0 × 10 <sup>4</sup>	2.7 × 10 <sup>3</sup>	1 : 0.62 : 0.17
Sapphire 10 cm	5.8 × 10 <sup>3</sup>	4.2 × 10 <sup>3</sup>	-1.6 × 10 <sup>3</sup>	1 : 0.73 : -0.27
BBO (ordinary) 10 cm	7.5 × 10 <sup>3</sup>	5.1 × 10 <sup>3</sup>	-7.8 × 10 <sup>2</sup>	1 : 0.68 : -0.10
Prism pair Fused silica L = 10 cm	-3.8 × 10 <sup>2</sup>	-4.4 × 10 <sup>2</sup>	-1.0 × 10 <sup>3</sup>	-1 : -1.2 : -2.6
Grating pair 672 lp/mm G = 10 cm	-1.1 × 10 <sup>5</sup>	2.0 × 10 <sup>5</sup>	-4.8 × 10 <sup>5</sup>	-1 : 1.8 : -4.4

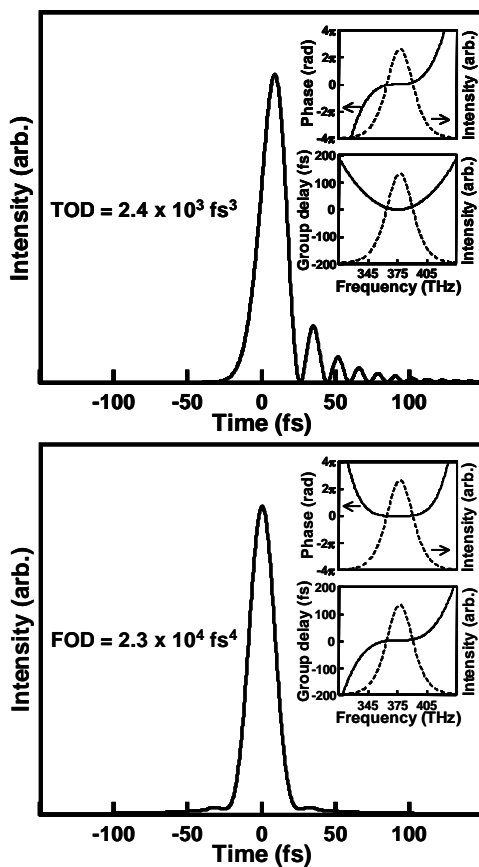


図 1 (a) 3 次分散、(b) 4 次分散で 10 fs のフーリエ限界パルスが 20 fs に広がるときの分散量、波形。挿入図はフーリエ位相、強度および群遅延。

## 2. 周波数位相共役鏡

波のコヒーレンスには空間、波動ベクトル、時間、角周波数の4つの種類がある。同様に位相共役鏡にも4つの種類があり、反転する物理量や用途が異なる。表2に位相共役鏡の分類を示す。一般的にいわれる位相共役鏡は空間の位相共役鏡のことを指し、波面歪みの補償に用いられる。一方、本研究の対象である周波数位相共役鏡はフーリエ位相の歪み、すなわちGDDの補償に用いられる。両者の違いを図2に示す。

周波数位相共役波を発生させる方法として分散素子を用いて光パルスを周波数成分ごとに分割し、それぞれの位相を反転してから合成する手法や、媒質の不均一拡がりを利用した光エコーなどが挙げられるが、ここでは非線形過程により瞬時電界波形を記録した体積回折格子による周波数位相共役波の発生を提案した。以下、その原理について述べる。

周波数位相共役波はフーリエ変換の関係から時間反転波となる。つまり、時間反転波を発生させることができればGDDを自動補償できる。

パルスの時間情報を直接反転させることは一般に困難である。そこで、時間情報を空間に記録し、空間反転して読み出すことにより間接的に時間反転波を得る方法が提案された。強度依存の非線形過程を用いてゲートをかけることにより、パルスの時間情報を非線形媒質中に記録できる。

図3に非線形記録による時間反転波発生の様子を示す。信号パルスとゲートパルスを対向して非線形媒質に入射すると、ゲートパルスと重なった部分のみに定在波が立ち、信号パルスの瞬時周波数・電界振幅に対応した格子間隔・屈折率振幅をもつ体積回折格子を書き込むことができる。このとき、信号パルスとゲートパルスの時間遅延は媒質中の位置に対応するため、逆方向から読み出しパルス

表2 位相共役鏡の種類。

位相共役鏡の種類	共役になる物理量	波動の変化	実現の形態 用途
空間: $r$	空間位相: $\phi(r)$	波動ベクトルの反転	フレネル・ホログラム 波面歪み補償
波動ベクトル: $k$	空間周波数のフーリエ位相: $\phi(k)$	空間位置の反転	フーリエ・ホログラム 焦点位置(収差)補償
時間: $t$	瞬時位相: $\phi(t)$	スペクトルの反転	光パラメトリック増幅器 ドップラシフトの補償
周波数: $\omega$	フーリエ位相: $\phi(\omega)$	時間波形の反転	光エコー 群遅延分散の補償

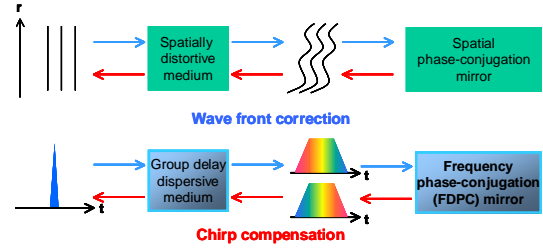


図2 空間位相共役鏡と周波数位相共役鏡の違い。

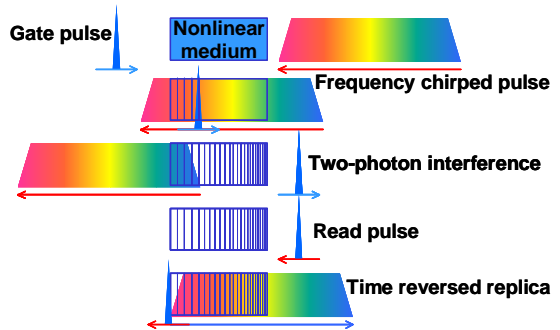


図3 非線形記録回折素子による時間反転パルス発生の様子。

を入射すると回折された光は時間反転パルスとなる。

強度依存の過程として2光子吸収を用いると、記録媒質としては1光子吸収を防ぎつつ2光子吸収が起きやすいように、パルスの持つ帯域である800 nm付近の光に対して透明で、かつ400 nm付近では大きな吸収を持つものを選ぶ必要がある。

非線形記録回折素子は読み出す方向によって信号パルスと同じ、もしくはまったく逆のGDDを与えることができ、図4に示すように屈折率変調の包絡線は滑らかになるため、原理的にGDDにおけるリップルや反射率におけるサイドバンドを生じない。

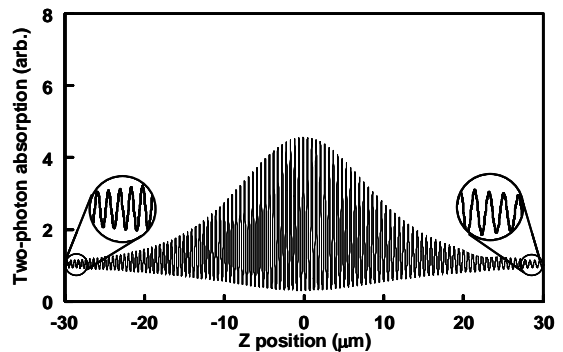


図4 記録時における2光子吸収量の空間分布。

### 3. 非線形記録回折素子の特性評価

光パルスの瞬時電界波形を記録した体積回折格子をデバイスとして用いるにあたり、書き込み時のコントラスト、回折効率を定量的に評価し、記録可能な信号パルス幅について検討した。

#### 3.1 コントラストの評価

ゲートパルスと信号パルスは同等のスペクトル幅を持つが、図 3・図 4 を見て明らかのように位置によって干渉する周波数成分が異なるため、信号パルス幅が長くなるにしたがいピーク対バックグラウンド比で定義するコントラストが低下する。

コントラストはパルスエネルギーとパルス幅の比で決まる関数で、図 5(a)のようになった。これより、最適なゲートパルスエネルギー比はパルス幅比の平方根で与えられることがわかった。この条件は、ゲートパルスと信号パルスの 2 光子吸収量が等しいときである。たとえば  $10^4$  倍の圧縮を行うとき必要なゲートパルスエネルギーは信号パルスのわずか

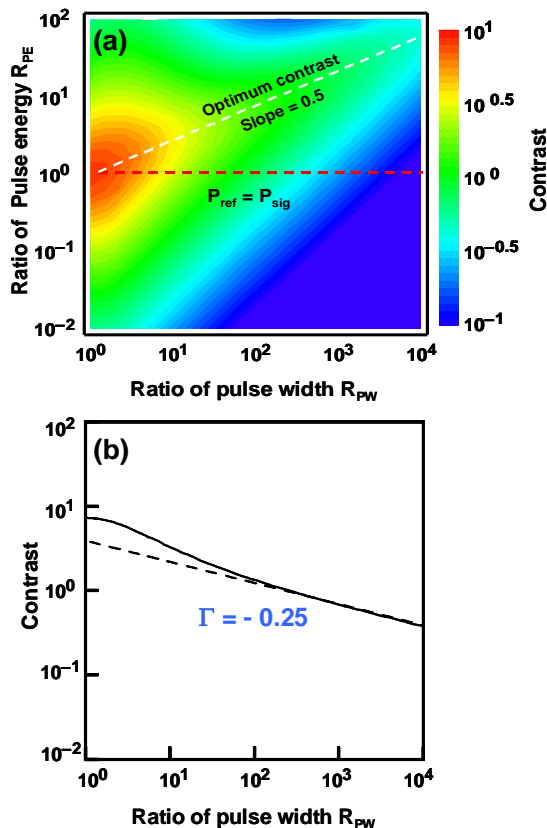


図 5 (a)パルスエネルギー比、パルス幅比とコントラストの関係。(b)最適なパルスエネルギー比のときのパルス幅比とコントラストの関係。

1%である。また、そのときのコントラストの低下はパルス幅比の-1/4 乗に抑えられ、パルス幅比  $10^4$  でのコントラストは0.4であった。

#### 3.2 回折効率の評価

体積回折格子の回折効率は屈折率変調  $\Delta n$  と回折格子のコヒーレンス長  $L_{coherent}$  の 2 乗に比例する。GDD によりパルス幅が  $M$  倍に広がったチャープパルスを記録した体積回折格子の場合、 $L_{coherent}$  は  $\sqrt{M}$  倍となるため、チャープ回折格子の回折効率  $\eta_{chirped\ pulse}$  は式 1 のようになる。

$$\eta_{chirped\ pulse} \propto (\Delta n L_{coherent})^2 = \Delta n^2 T_{TL}^2 M \quad \text{式 1}$$

ここで、 $T_{TL}$  はフーリエ限界におけるパルス幅を示す。

たとえば、10 fs と 100 fs 相当の帯域幅を持つパルスをフーリエ限界まで圧縮する場合の回折効率は、同じ圧縮比でも 100 fs の方が 2 桁高くなる。

屈折率変化量が 2 光子吸収量に比例するとして特性マトリックス法[11]により計算した非線形記録回折素子の回折効率を図 6 に示す。これより、3.1 で評価したコントラストの低下を考慮しても圧縮比、すなわち溝本数を増やすにしたがい回折効率は高くなり、時間分解能 10 fs、屈折率変化の絶対値 0.01、圧縮比 2000 のとき得られる回折効率は 44% と見積もられた。

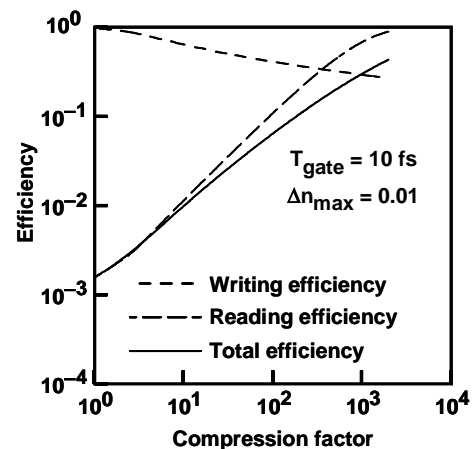


図 6 非線形記録回折素子の書き込み効率(破線)、読み出し効率(跳び破線)及び得られる回折効率(実線)と圧縮比の関係。

### 3.3 記録時間幅の評価

記録可能な時間幅は、主に記録媒質そのものが持つ GDD で制限される。たとえば 10 fs のフーリエ限界パルスは固体媒質を 1 mm 程度伝播することでパルス幅が 2 倍に広がってしまうため、記録媒質中の伝播距離を 300  $\mu\text{m}$  程度に抑える必要がある。これは反射型の体積回折格子の場合、記録時間にして 3 ps である。100 fs のフーリエ限界パルスの場合、記録媒質中を 3 cm 程度伝播してもよいから、同様に記録可能な時間幅は 300 ps となる。すなわち、パルス伸長比と扱う圧縮後のパルス幅（帯域幅）はトレードオフの関係にある。

また、記録時間幅が長くなると書き込みパルスエネルギー（記録媒質の感度）やビーム幅（記録媒質の面積）・コンフォーカル長（記録媒質の厚さ）などの制限も受ける。ピコ秒パルスを扱う場合はフォトセンシティブファイバーなどを用いることも考えられる。

## 4. CPA システムへの応用

周波数位相共役鏡を CPA システムに応用できればパルス圧縮時における高次群遅延分散の問題を解決することができる。ここでは、いくつかの機構について検討を行った。

### 4.1 GDD が対称な CPA システム

周波数位相共役鏡を用いた CPA システムとして図 7 に示すような GDD が対称な CPA システムを提案した。これは、パルス伸長器および増幅器のもつ GDD を自動補償する配置であるため、伸長器と同一の素子でフーリエ限界まで圧縮可能な配置である。

CPA システムでは 3~5 桁のパルス伸長比が一般的である。3.3 の結果より、3 桁程度のパルス伸長比を想定するとパルス幅 100 fs で CPA システムについて有効であることがわかった。

このとき、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$  の  $\Delta n$  で数十%~数%の回折効率を得られる。非線形記録回折素子の後にも増幅器があるため、回折効率は数%あれば十分である。

この機構で 10 fs の CPA システムを扱うには、GDD の小さい記録媒質を用いるか、配置を工夫して記録媒質のもつ GDD の影響を緩和する必要がある。

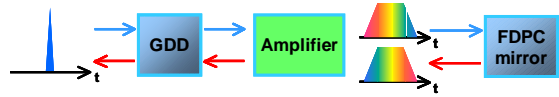


図 7 周波数位相共役鏡を用いた GDD が対称な CPA システム。

### 4.2 HOD を独立補償する CPA システム

非線形記録回折素子を 10 fs の CPA システムに用いる場合、3 桁以上の伸長比を直接扱うのは難しい。そこで、補償の簡単な SOD の補償は既存の素子に任せ、補償の困難な HOD を非線形記録回折素子で補償することを提案した。図 8 に CPA システム中の HOD を周波数位相共役鏡で自動補償する様子を示す。パルス伸長幅は主に SOD によって決まるため、HOD を前置補償しても伸長比を変えることはない。また、増幅器の前に非線形記録回折素子を配置することで回折効率や耐久性の問題も回避できる。

HOD によりパルスが分裂し、瞬時位相が不連続となるような場合でも、本方法が適応可能かを確かめた。一般的にはガラスブロックを伸長器に使用した場合は圧縮器にプリズム対を用いることで、表 3 に示すように圧縮後に残る HOD をおさえているが、ここではあえてガラスブロック伸長器に回折格子対の圧縮器を用いて圧縮後のパルスに大きな HOD を与えることで図 8 に示す配置の有効性を確かめた。

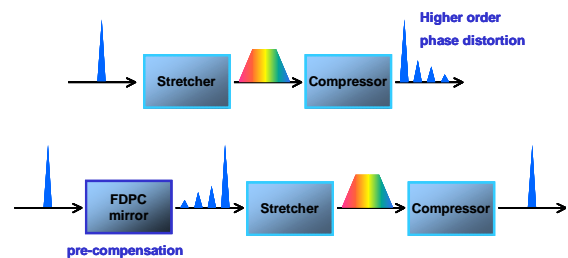


図 8 周波数位相共役鏡を CPA システム中の高次群遅延分散の分離補償。

表 3 残留高次群遅延分散と強度が 1 割となるパルス幅の関係。

	SOD(fs <sup>2</sup> )	TOD(fs <sup>3</sup> )	FOD(fs <sup>4</sup> )	Pulse broadening (fs)
SF10 250 mm	$4.0 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4$	$6.8 \times 10^3$	$1.6 \times 10^4$
Prism sequence Fused silica, L = 4.8 m	$-4.0 \times 10^4$	$-4.5 \times 10^4$	$-1.0 \times 10^5$	
	0	$-2.0 \times 10^4$	$-1.1 \times 10^5$	240
Grating pair 672 lp/mm, G = 35.5 mm	$-4.0 \times 10^4$	$7.2 \times 10^4$	$-1.7 \times 10^5$	
	0	$9.7 \times 10^4$	$-1.8 \times 10^5$	750

図 10 に屈折率 1.4、厚さ 300  $\mu\text{m}$  (記録時間幅 2.8 ps) の薄膜を記録媒質とした非線形記録回折素子により HOD を補償する前後の波形とフーリエ位相を示す。フーリエ位相が補償される帯域幅は 75 THz と見積もられた。

信号パルスのうち、記録時間幅を超える成分は記録されない。図 10 (b)の挿入図にみられるリップルや急峻なフーリエ位相の不確定さは、記録の際に信号パルスのテールを切断した影響によるものである。圧縮後のパルス幅が 10 fs に戻らないのはフーリエ位相が補

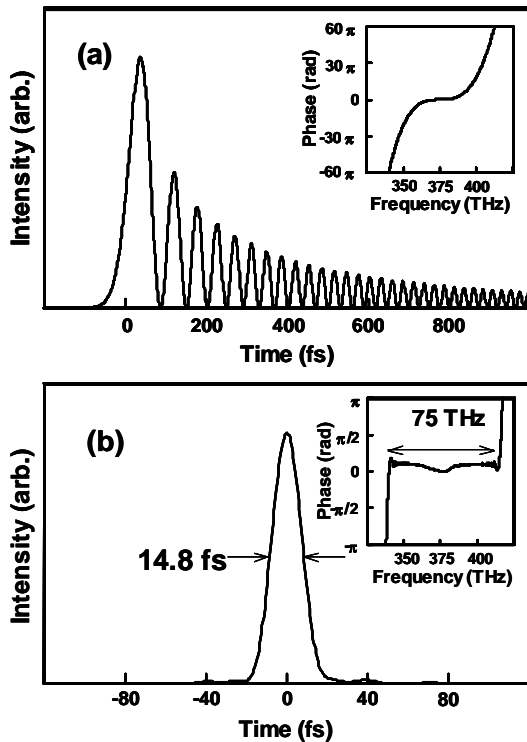


図 10 非線形記録回折素子による HOD の自動補償の様子。(a)圧縮前及び(b)圧縮後のパルス波形。挿入図はフーリエ位相。時間とフーリエ位相のスケールが異なることに注意。

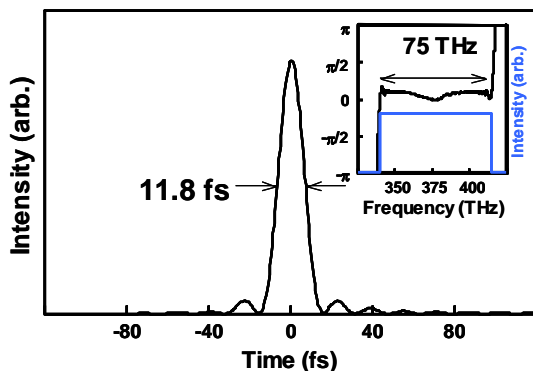


図 9 75 THz の帯域幅を全て使った場合の波形。

償される帯域幅が 75 THz までであるため、図 9 に示すように、帯域幅全てを使えばパルス幅は 11.8 fs になるが、サイドローブが波形に現れてしまう。フーリエ限界 10 fs の Sech 型パルスが持つ帯域幅は FWHM で 31.5 THz であるが、パルス幅 10 fs まで圧縮するには 150 THz にわたってフーリエ位相の補償を行う必要がある。

プリズム対と回折格子対により TOD までの補償は可能であるが、10 fs のシステムでは表 4 に示すように、FOD の影響によるパルス広がりも無視できない。図 11 は周波数位相共役鏡により HOD を補償した場合の波形とプリズム対・回折格子対により TOD まで補償した場合のパルス波形の違いを示す。周波数位相共役鏡を用いた場合には記録時間の範囲外にある周波数成分がカットされたことによるサイドローブが見られるが、プリズム対と回折格子対により TOD まで補償した場合のパルス波形と比べると、ペダスタルの強度は 1 桁~2 桁小さくなることがわかった。

表 4 プリズム対と回折格子対により TOD まで補償した場合の残留 4 次分散と強度が 1 割となるパルス幅の関係。

	SOD(fs <sup>2</sup> )	TOD(fs <sup>3</sup> )	FOD(fs <sup>4</sup> )	Pulse broadening (fs)
SF10 250 mm	$4.0 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4$	$6.8 \times 10^3$	$1.6 \times 10^4$
Prism sequence Fused silica, L = 4.0 m	$-3.3 \times 10^4$	$-3.7 \times 10^4$	$-8.4 \times 10^4$	
Grating pair 672 lp/mm, G = 6.0 mm	$-6.8 \times 10^3$	$1.2 \times 10^4$	$-2.9 \times 10^4$	
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b><math>-1.1 \times 10^5</math></b>	<b>51</b>

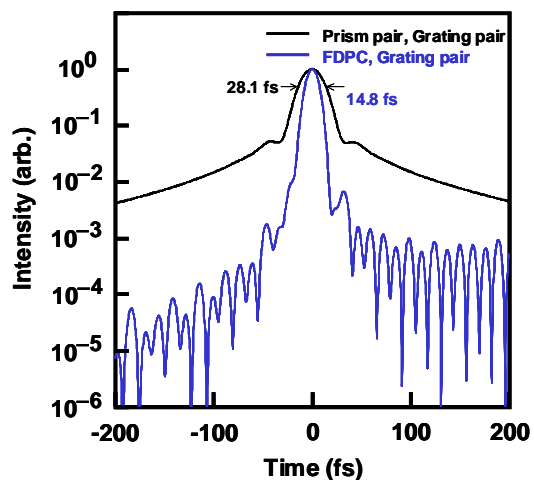


図 11 非線形記録回折素子を用いた場合とプリズム対・回折格子対を組み合わせさせた場合の波形。

## 5. 結論

非線形記録回折素子の回折効率時間分解能 10 fs、屈折率変化の絶対値 0.01、圧縮比 2000 で 44%と見積もられた。

非線形記録回折素子による周波数位相共役鏡を CPA システムに応用することを提案し、GDD の対称な CPA システムではパルス幅 100 fs、伸長比  $10^3$  程度で有効であることを示した。

HOD の独立補償を提案し、10 fs の CPA システムにおける有効性を示した。300  $\mu\text{m}$  の薄膜中に波形を記録することにより  $9.7 \times 10^4 \text{ fs}^3$ 、 $-1.6 \times 10^5 \text{ fs}^4$  の HOD を 75 THz にわたって補償できることが示された。このとき、ペDESTALの強度はプリズム対と回折格子対の組み合わせと比べて 1~2 桁小さくなり、パルス幅も半分程度となった。

本方法は全光学的に GDD を自動補償できるので、パルス伸長器・圧縮器が単純な構造ですみ、CPA システムの小型化・高安定・低コスト化が望める。

さらに、1ショットでの記録・再生を行うことで動的な GDD の変化に対しても自動的に補償することができるため、1ショットごとに GDD がゆらぐようなシステムへの応用も期待される。

## 謝辞

本研究にあたり直接の御指導をいただいた西岡先生に深謝する。実験に協力頂いた同じ研究室の同期である椴谷君、後輩の早坂君と上久保君に感謝する。本研究はレーザー新世代研究センターの協力で行われた。

## 参考文献

- [1] L. Xu, G. Tempea, A. Poppe, M. Lenzner, Ch. Spielmann, F. Krausz, A. Stingl, and K. Ferencz, *Appl. Phys. B* **65**, 151(1997).
- [2] M. Ramaswamy, M. Ulman, J. Paye, and J. G. Fujimoto, *Opt. Lett.* **18**, 1882(1993).
- [3] M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane, J. Ma, N. Inoue, H. Ueda, and H. Kiriya, *Opt. Lett.* **28**, 1594(2003).
- [4] G. Cheng, F. Shan, A. Freyer, and T. Guo, *Appl. Opt.* **41**, 5148(2002).
- [5] E. B. Treacy, *IEEE J. of Quantum*

*Electron.* **5**, 454(1969).

- [6] R. L. Fork, O. E. Martinez, and J. P. Gordon, *Opt. Lett.* **9**, 150(1984).
- [7] E. J. Mayer, J. Mobius, A. Euteneuer, W. W. Ruhle, and R. Szipocs, *Opt. Lett.* **22**, 528(1997).
- [8] A. M. Weiner, D. E. Leaird, D. H. Reitze, and E. G. Peak, *IEEE J. of Quantum Electron* **28**, 2251(1992).
- [9] E. Zeek, K. Maginnis, S. Backus, U. Russek, M. Murnane, G. Mourou, H. Kapteyn, and G. Vdovin, *Opt. Lett.* **24**, 493(1999).
- [10] A. M. Weiner, *Opt. Lett.* **25**, 1207(2000).
- [11] H. A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters*, 2nd edition, Macmillan, New York (1986).

## 発表実績

- (1) 富田 仁, 西岡 一, “体積回折格子を用いたフェムト秒パルスの記録と再生”, レーザー学会東京支部 研究会, P2, 2004 年.
- (2) 富田 仁, 西岡 一, “体積回折格子を用いたフェムト秒パルスの記録と時間反転再生”, 第 65 回応用物理学会学術講演会, 4a-P12-7/, 2004 年.
- (3) 富田 仁, 西岡 一, “周波数位相共役波の発生”, 東京農工大学・電気通信大学合同 COE シンポジウム, P72, 2004 年.
- (4) Hitoshi Tomita, and Hajime Nishioka, “Optimization of compression factor and diffraction efficiency in the two-photon-gated diffractive optics,” *International Symposium on Coherent Optical Science*, Paper PS-14, Tokyo, Japan (2005).
- (5) 富田 仁, 早坂 圭介, 上久保 貴史, 西岡 一, 植田 憲一, “2 光子ゲート波形記録の記録時間と回折効率の評価” 秋季第 66 回応用物理学会学術講演会, 11a-B-10, 2005 年.
- (6) 富田 仁, 西岡 一, “チャープパルス増幅システム中の高次群遅延分散の自動補償”, 東京農工大学・電気通信大学合同 COE シンポジウム, P41, 2005 年.