多光子記録回折素子を用いた超高速光波位相補償と増幅

西岡 一

電気通信大学 レーザー新世代研究センター (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

All-Optical Ultrafast Phase-Compensation and Amplification by A Multi-Photon-Arranged Diffractive Optics

Hajime NISHIOKA

Institute for Laser Science, the University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

(Received April 6, 2009)

This lecture highlights a frequency-domain phase-conjugation (FDPC) device based on multi-photon-arranged diffractive optics. The time-reversed replica (i.e. FDPC wave) of an ultrafast pulse train is regenerated by the index grating written by phase-sensitive multi-photon interference. Few-cycle pulse amplification as the coherent superposition of a chirped pump pulse on to a transform-limited seed pulse has been demonstrated.

Key Words: Frequency-domain phase conjugation, Time-reversed replica, Photo-refractive, Diffractive optics

1. はじめに

回折光学素子には回折格子、ホログラフィー、あるいは、回折光学レンズ¹⁾など、多くの種類がある。これらの素子は、光波に空間変調を与え、その方向を制御したり記録したりする役割を担っている。

ここでは、光パルス電場位相の時間形状をそのまま回折格子として記録する方法について紹介する。光電場波形を回折格子として記録すると光電場のフーリエ位相を記録・演算でき、周波数位相共役波による群遅延分散の全光学的自動補償やコヒーレンス合成による数サイクルパルス光の増幅が可能になる。

2. 位相敏感2光子電場記録と時間反転再生²⁾

ホログラフィー³⁾として良く知られる空間干渉型記録法では、Fig. 1 (a)に示すように参照ビームと物体からの被記録ビームとの干渉縞を記録している。記録された干渉縞は、参照光と物体光との間の角度情報に相当する空間周波数と、物体の凹凸に相当する(空間周波数の)フーリエ位相を含んでいる⁴⁾。読み出しビームを照射すると記録された空間周波数情報は、再び角度情報となって物体像を再生する。回折光には方向と波長の2つの自由度があるが、ホログラフィーでは波長を固定してその方向を再現する。一方、本方法ではFig. 1 (b)に示すように、時間変調された電場をゲート光と多光子干渉させ

その干渉縞を記録する。別の言い方をすれば、電場角周波数フーリエ成分を格子の空間周波数フーリエ成分として記録する。読み出しパルスを照射すると、記録された時間情報は時間反転して再生される。この方法では、ビームの方向を固定して光波の時間位相(周波数)を再現している。

両者は一見、相似に見えるが、本質は物理的記録方法の違いにある。ホログラフィーが時間積分型(エネルギー型)の記録素子を用いるのに対して、本方法は多光子吸収による屈折率変化など、強度依存型の物理機構を用

Fig. 1 Comparison between (a) Holography and (b) TORPEDO (see Fig. 2 for detail). The holography and the TORPEDO regenerate wave-vector and pulse shape, respectively.

Fig. 2 Phase-sensitive two-photon gated recording and time-reversed playback by TORPEDO.²⁾

いて瞬時電場位相の抽出・記録を実現している。

実際の記録再生の手順をもう少し詳しくFig. 2に示した。図では分かり易いように正のチャープ光を記録する様子を示してある。信号光(チャープ光)は多光子吸収材料中でゲート光と時間を追って多光子干渉を起こす。干渉縞は屈折率変調として記録される。ここで、ゲート光は信号光とスペクトル帯域の等しいパルスである。単純にゲート光としてフーリエ限界パルスを用い、信号光としてチャープ光を記録すれば、干渉縞も同一のチャープ構造になる。記録された位相情報は、読み出しパルス(ゲート光と同一形状のパルス)を照射する事により、時間反転して読み出される。一方、読み出しパルスに記録された信号光を用いると、信号光の位相ひずみは相殺されフーリエ限界パルス(厳密には書き込み用いたゲートパルス)が出力される。時間を追って記録・再生が行われることから本デバイスを(Time-Ordered Recording/Readout PERiodic Diffractive Optics: TORPEDO)と呼んでいる。

位相共役波の種類とその物理原理をTable 1にまとめた。再生される時間反転波は、フーリエ成分の位相(フーリエ位相)が共役となっているため、周波數位相共役波⁵⁾と呼ばれる[†]。周波數位相共役波を用いると、群遅

延分散によるパルスひずみを全光学的に自動補償することが可能である。例えば、分散媒質による正チャープしたパルスを時間反転させれば負チャープとなる。これが再び同じ分散媒質を伝播すれば初期の位相を再生する²⁾。

周波數位相共役波発生法として周波数領域干渉型記録法「光エコ」が知られるが、その時間分解能・記録時間幅は記録吸収媒質の不均一幅・均一幅に相当する。記録材料によって使用できる時間領域に制限が生ずる。たとえば、ナノ秒パルスの記録再生⁶⁾には希土類を添加した結晶などが液体ヘリウム温度で用いられる。サブピコ秒領域では、半導体量子ドット⁷⁾も盛んに研究されているが、その記録波長やデコヒーレンスにより記憶保持時間が数ナノ秒に制限されるなどの課題がある。

本原理は光波のフーリエ位相を格子のフーリエ位相として記録するので任意波形の光パルスを記録・再生できる。記録できるパルス幅の最小値は原理的にはモノサイクル、実際には記録媒質の多光子吸収帯域で制限される。パルス幅の上限は記録媒質中における光伝搬時間の2倍である。本方法は光エコと同じ機能を持ちながら、記録保持時間は半永久で、100 THzを超える帯域を実現できる利点がある。

読み出しはどうであろうか。記録される干渉縞の周期数は光電場と等しい。回折光は単純な光電場の重ね合わせであるから、その光強度はコヒーレントな格子数の2乗に比例する。回折効率 $\eta_{\text{diffraction}}$ は屈折率変調を Δn 、格子のコヒーレンス長(周期数)を N_{coherent} として

$$\eta_{\text{diffraction}} \propto (\Delta n N_{\text{coherent}})^2 \quad (1)$$

と与えられる。一般の回折光学素子は、1 cmの大きさがあれば 10^4 程度の周期数を持つが、本方法では記録されるパルスが数サイクルパルスならば、その数は1桁以下である。概算でも回折効率は 10^{-6} に低下する。実用的な回折効率を得るには屈折率変調を3桁大きくする($\Delta n > 0.01$)必要がある。DVD-R等に用いられる有機色

Table 1 Phase-conjugation mirrors and their physical principles.

Domain	Conjugate parameter	Inversive parameter	System and applications
Space $\mathbf{r}$	Gradient of wave front: $\phi(\mathbf{r})$ (Spatial phase)	Wave vector (direction)	Fresnel holography (wave front correction)
Spatial frequency $\mathbf{k}$	Spherical phase shift: $\phi(\mathbf{k})$ (Spatial Fourier phase)	Position (mirror image or perspective)	Fourier holography (aberration correction)
Time t	Instantaneous phase: $\phi(t)$	Spectra (spectral mirror placed at degenerate frequency)	Optical parametric amplifier (Doppler correction)
Angular frequency ω	Fourier phase: $\phi(\omega)$	Time (time-reversed replica)	Photon echo (GDD correction)

[†] 空間位相共役波を時間反転波と記述している文献を多く見かけるが、これらは誤解である。フーリエ関係から空間位相共役は波動ベクトル反転であり、時間反転ではない。

Fig. 3 Index modulation $\Delta n(\omega_0)$ due to two-photon absorption bleaching $\Delta\alpha(2\omega_0)$. ω_0 : laser frequency.

素やフォトリフラクティブ材料などがこの要求を満たす。

Fig. 3に示すように紫外域に大きな吸収を持つ材料を用い、2光子吸収によりこの吸収を透明化させる。分散関係から、基本波波長において吸収変化に応じた大きな屈折率変化が得られる。

3. コヒーレントビーム合成による 超短パルス光の増幅^{8,9)}

2本のビームをFig. 4のようにビームスプリッター上で重ね合わせる時、境界条件を満たすと入射ビームは完全に透過し、他方のビームは完全に反射されて2つのビームは1本に合成される。見方を変えると、入射ビームは形を変えずに2倍の光強度となって出力されており、光励起コヒーレント光増幅器として動作していることも分かる。合成の境界条件は、他方の透過電場強度が入射電場強度と等しく逆位相である時である。縦横ともにシングルモードの連続波レーザー光では境界条件を満たすことは比較的容易であるが、数サイクルの光パルスでは、時刻(群遅延)と時間的な位相変化(群遅延分散)を含めて位相を同期させる必要がある。

2光子形成回折素子を用いたコヒーレントビーム合成の概念図をFig. 5に示す。励起光と超短パルスの種光は、

Fig. 4 A coherent beam splitter/combiner: coherent-light amplification based on beam combining. The π -phase shift is required for the pump to seed energy flow.

Fig. 5 Schematic illustration of the two-photon arranged photo-refractive amplifier (beam combiner): TAPA. Spatially chirped grating is formed in a PR (photo-refractive) medium as a second order cross correlation function between the seed and pump pulses. The first order diffraction of the pump pulse has the same phase structure of the seed. The unidirectional energy flow, the pump to seed, is produced by the $\pi/2$ grating phase-shift via PR effect.

フォトリフラクティブ材料中で2光子干渉を起こし励起光の位相構造を回折格子として書き込む。吸収により生じた電荷は拡散し、空間電荷は干渉縞と $\pi/2$ の位相シフトを起こす。このため、ポッケルス効果による屈折率回折格子は同様に $\pi/2$ の位相差を持つ¹⁰⁾。この格子によりブラッグ回折される光は π の位相差を生じ、上記の境界条件を自動的に満たす。励起光ビームの時間的位相ひずみ(群遅延分散)は内部に形成された周波數位相共役鏡により補償され、出力ビームには励起光の位相情報は現れない。このため位相ひずみを持つ励起光によってもフーリエ限界パルスの増幅が可能である。

格子形成には2光子吸収を用いるために、記録材料はレーザー基本波に対して透明であり広い増幅帯域を確保することができる。2光子エネルギー帯にのみ吸収が存在する理想的な媒質を利用できれば、モノサイクル波の増幅も可能である。実験ではFe添加ニオブ酸リチウム結晶(Fe:LiNbO_3)を用いた。パルス幅9 fs、中心波長800 nmのモード同期チタンサファイヤレーザー光(4サイクル光)を種光とし、励起光にはガラスブロックにより伸長したパルス幅400 fsのチャープ光を用いた。Fig. 6 (a)のように露光時間と共に空間電荷が蓄積し、格子が形成される。帯域幅32 THzに渡り増幅が観測され、同時に回折効率27%を得た。このときスペクトルシアリング干渉計¹¹⁾により観測したフーリエ位相の時間変化はFig. 6 (b)に示すように $\pm\pi/2$ の範囲であり、増幅後のパルスは初期位相を保存していることが分かる。

4. まとめ

回折光学素子に瞬時光強度依存型記録を用いることにより光電場の記録、位相補償、増幅に応用できる事を示した。この非線形記録は、光メモリ¹²⁾や光増幅器に留まらず、ゲートパルスとして時間波形の畳み込みや相関性抽出など、全光学システムによる符号化(暗号化)、復号

Fig. 6 Gain (a) and Fourier-phase (b) as a function of exposure time. The parameters in (b) are the exposure time in seconds. An intrinsic group-delay-dispersion in the medium has been subtracted in this figure. The energy ratio of the pump and seed pulses is 8 : 1.

化を含む超高速コヒーレント信号処理¹³⁾に広く用いることが可能である。本稿は原理の解説に主眼を置き、定量的な議論や実験の詳細は割愛した。他の原著論文も併せて参照されたい。

本論文の主な内容は、原著論文として参考文献^{2,8,9)}に公表済みである。本研究はその一部を文部科学省「科学研究費補助金」および「21世紀COEプログラム」の補助を得て行われた。

参考文献

- 1) たとえば「回折光学素子の現状と将来」特集号, レーザー研究 **35** (2007) No. 5.
- 2) H. Nishioka, H. Tomita, K. Hayakawa, and K. Ueda: Opt. Express **14** (2006) 7447.
- 3) D. Gabor: Nature **161** (1948) 777.
- 4) E. Leith and J. Upatnieks: J. Opt. Soc. Am. **52** (1962) 1123.
- 5) H. Nishioka, S. Ichihashi, and K. Ueda: Opt. Express **10** (2002) 920.
- 6) M. Mitsunaga and N. Uesugi: Opt. Lett. **15** (1990) 195.
- 7) K. Kral, Z. Khas, CY. Lin, and S. H. Lin: Opt. Commun. **180** (2000) 271.
- 8) H. Nishioka, K. Hayasaka, S. Ohta, H. Tomita, and K. Ueda: Opt. Express **15** (2007) 5018.
- 9) H. Nishioka, S. Ohta, and H. Tomita: Proc. APLS'08, Nagoya, Rev. Laser Eng. **10** (2008) Suppl. p.1113.
- 10) I. McMichael and P. Yeh: Opt. Lett. **12** (1987) 48.
- 11) H. Nishioka and H. Tomita: Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO), Baltimore, May 31-June 5, 2009, paper CWB3.
- 12) T. W. Mossberg: Opt. Lett. **7** (1982) 77.
- 13) たとえば「コヒーレント光通信技術の最新動向」特集号, レーザー研究 **37** (2009) No. 3.

レーザーワード

フォトリフラクティブ効果(photo-refractive effect)

光を照射することにより局所的に屈折率変化が生ずる現象で、発見当初は“Optical Damage”と呼ばれていた。不純物や欠陥を含む材料に光を照射すると、不純物が光吸収を起こしてイオン化し、生じた電子は伝導帯に励起される。この電子群は密度勾配により拡散・移動を起こした後、周辺の不純物に捕捉される。こうして、光明部では正の電荷、その周囲の暗部では相対的に負の電荷が空間に蓄積されてゆく。この空間電場によってポッケルス効果(屈折率変化)を起こす現象である。その応答は時間積分型で、典型的には1 W/cm²の光強度で数十ミリ秒

から秒程度の時間を要する。

2光束間の光干渉により干渉縞を発生させると、縞明部で発生した電子は隣接する暗部に拡散して、明暗部間に空間電場が生ずる。したがって、干渉縞の位相と空間電場は位相差を伴い、誘起される屈折率変調は光干渉縞と空間的に $\pi/2$ の位相差を持つ。この体積屈折率格子により回折、反射させる光は π の位相差を持つことになり、2光束間で光エネルギーの流れ(光増幅)を生ずる。

(西岡 一)