

# 光書き込み型 2次元空間光変調器を用いたフェムト秒レーザーパルスの偏光波形整形

## Polarization pulse shaping of femtosecond laser pulse with a multi-pass 2D-SLM

江角禎宏(M1), MD. Masdul Kabir

Y. Esumi, and MD. Masdul Kabir

### Abstract

We demonstrate time-dependent polarization shaping for femtosecond laser pulses with less ambiguity using a reflective-type two-dimensional spatial light modulator, which can independently control the orthogonal phase and amplitude. The characterization of time-dependent polarization is done using Fourier transform analyses of dual channel spectral interferometry.

### 1 はじめに

光と物質の超高速相互作用の制御においては、フェムト秒レーザーパルスの時間波形を自由にシミュレーションできる波形整形技術が極めて重要であり、これまでに分子反応制御 [1] や高次高調波発生 [2] などの多くの研究においてその有用性が実証されてきた。光パルス電界波形は、周波数振幅、周波数位相および偏光の 3 つのパラメータで決定される。現在最も普及している波形整形手法は、1 層もしくは 2 層の液晶空間光変調器 (LC-SLM) を用いた周波数振幅と位相の変調による光パルスの整形であるが、多層の LC-SLM を用いると時間的な偏光状態をも正確に制御することが可能である [3]。この偏光整形光パルスは、偏光状態に大きく依存する近接場光学などへの応用が期待されている。

光の偏光状態を表す偏角や楕円率は次の式によって表され、直交する 2 つの偏光成分の電場振幅と位相によって定義される。

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left\{ \tan \left[ 2 \arctan \left( \frac{E_x}{E_y} \right) \right] \cos(\phi_y - \phi_x) \right\} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \arcsin \left\{ \sin \left[ 2 \arctan \left( \frac{E_x}{E_y} \right) \right] \sin(\phi_y - \phi_x) \right\}$$

振幅も含めた偏光状態の規定には直交する 2 偏光の振幅と位相の 4 つのパラメータをそれぞれ独立に決定することが必要となる。多層の SLM を用いれば直交

する 2 偏光の位相変調、振幅変調は行えるが光学系サイズは非常に大きくなってしまふ。一方、2次元空間光変調器(2D-SLM)を用いれば空間方向に周期的屈折率変化を付加することによって光が回折し、強度変調を行うことが可能[4]になる。Fig.1 に振幅変調のスキームを示す。2D-SLM の空間方向に周期的変調を付加することによってグレーティングとして作用し、光が回折を起こす。変調の深さ( $\Delta x$ )を変化させることによって自由度の高い周波数振幅変調が可能になる。さらに 0 次光の位相変調を重ねることによって振幅位相変調が可能になる。一回の反射で位相と振幅を同時に変調することによって、直交偏光の位相と振幅をあいまい度なしに整形することができ、1 台の光書き込み型 2次元空間光変調器(2D-SLM)を用い 2 回反射させることで光パルスの偏光状態を完全に決定することができる。

そこで今回我々は、空間回折型振幅位相変調を用いた 2 回反射型波形整形システムを構築し、あいまい度のない偏光波形整形システムを提案する。

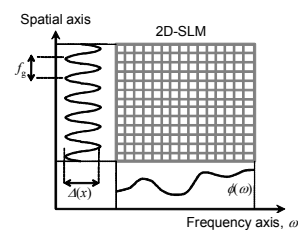


Fig.1 Spectral mask pattern along the spatial and frequency axes on 2D-SLM.

### 2 実験

#### 2.1 偏光波形整形器の構築

Fig.2 に実験セットアップを示す。光源には中心波長 800 nm,FWHM40 nm,繰り返し周波数 76 MHz の Ti:sapphire レーザを用いた。光源から発生したフェムト秒レーザーパルスを 2D-SLM(浜松ホトニクス製,768×

768pixel)の異方軸(周波数方向)に対し 45 度偏光にし、回折格子とシリンダリカルレンズによってフーリエ面を結像し、2D-SLM の上段に入射させる。このとき 45 度偏光の異方軸方向(周波数方向)のみが変調される。周波数域から時間域に戻した後、 $\lambda/4$  板を折り返し通すことで偏光を 90 度回転させさらに高さを変え、 $-45$  度偏光を 2D-SLM の下段に入射させる。偏光が 90 度回転しているため上段では空間方向だった成分が変調される。波長分解能は 0.26nm になる。これによって  $E_x, \phi_x, E_y, \phi_y$  を自由に制御することができ、時間依存偏光パルスを生成することができる。

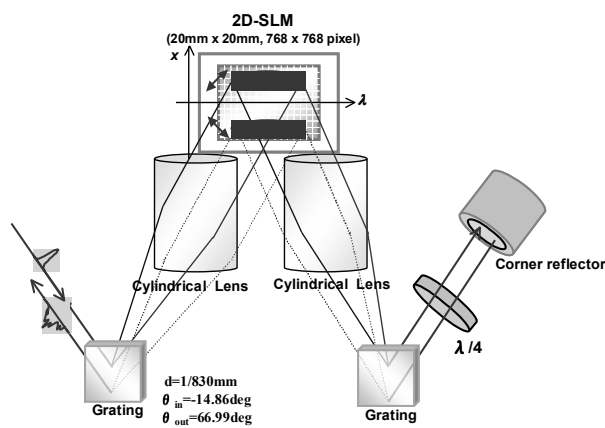


Fig.2 Setup of double reflective-type pulse shaper with a 2D-SLM.

## 2.2 偏光状態の計測

次に偏光状態の計測を行った。1 式から偏光状態を知るためには直交する 2 つの偏光成分に関する電場振幅比と位相差を測定する必要がある。直交する 2 偏光を分離し、それぞれの振幅位相を SI(Spectral Interferometry)を用いて計測した。この方法は Dual channel spectral interferometry と呼ばれる。Fig.3 に実験セットアップを示す。参照パルスとして波形整形器へ入射する前の光パルスをビームスプリッターで切り分けたものを用いた。パルス整形器で整形された時間依存偏光パルスの直交する 2 偏光成分を分離するために偏光ビームスプリッターキューブを用いた。CCD 上で測定した干渉スペクトルから光パルスの 2 偏光成分に対する振幅と位相を解析した。

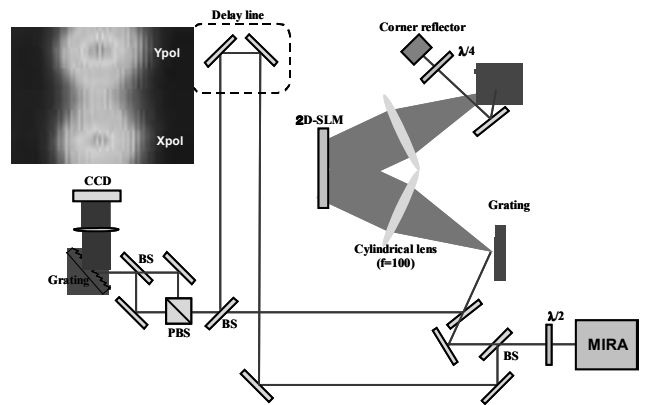


Fig.3 Setup of dual channel spectral interferometry

## 3 実験結果

### 3.1 回折型振幅変調実験

Fig.4(a)(b)に振幅および位相変調の結果を示す。変調の深さ $\Delta x$  によって最大 99%の振幅変調が可能なのことがわかる。周波数方向に振幅 $\pi$ のサイン変調を、さらに 805-810nm において 50%の振幅変調を行った。計測には SSI(Spatial Spectral Interferometry)を用いて行った。振幅、位相ともに精度良く整形できていることがわかる。

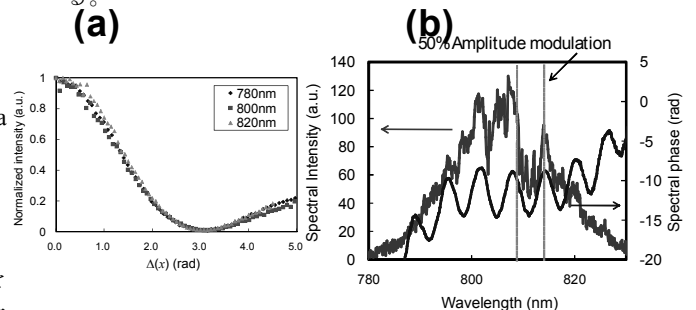


Fig.4 (a) Spectral amplitude modulation at each frequency component when sinusoidal function pattern was applied along spatial axis. (b) Sinusoidal spectral phase modulation together with 50 % spectral amplitude modulation by one-time reflective-type pulse shaper with a 2D-SLM.

### 3.2 偏光状態の計測

偏光整形のデモンストレーションとして Xpol を FTL, Ypol を 60%振幅変調の場合と Xpol を 0.01ps, Ypol を  $-0.01$ ps の遅延をつけたときの偏光状態を計測した。

Fig.5(a), (b)はそれぞれのスペクトル、時間波形、偏光状態である。偏光状態では理論計算結果も合わせて載せた。偏光状態において理論値と実験値に誤差が生じ

ているがこれは実験系に含まれる多くの光学素子が偏光依存性を持つためである。さらにミラーへの入射角のわずかな違いも偏光依存性に大きく影響する場合がある。光学素子の反射率や位相特性を補償することはできるが、わずかな条件の変更に伴う偏光状態の変化を即座に補償することはきわめて困難である。そのため完全に理論どおりの整形を行うことは難しく、フィードバック制御と組み合わせることによって偏光状態を最適化することが理想的である。

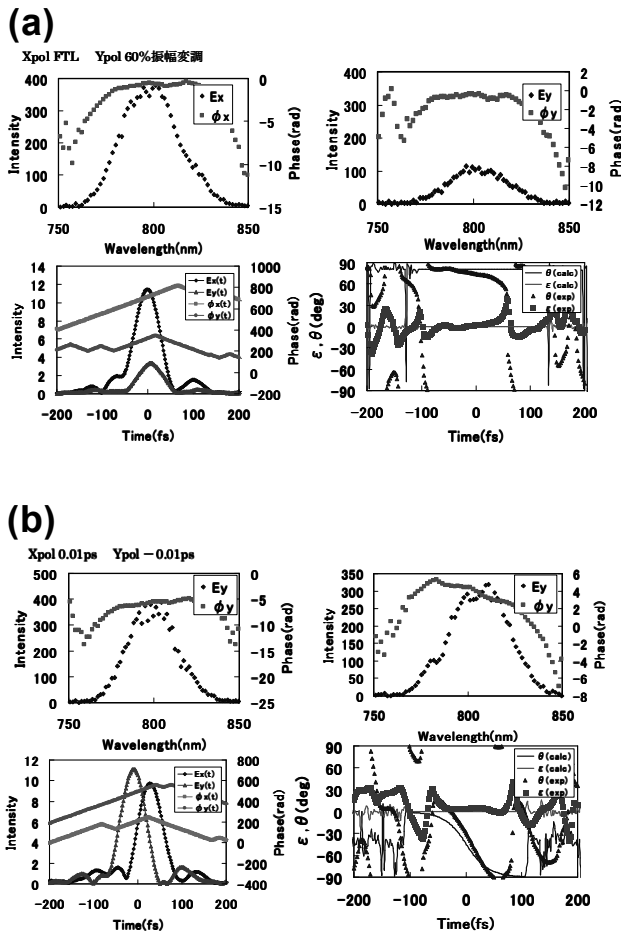


Fig.5 Demonstrated of polarization pulse shaping

(a)Xpol: FTL, Ypol: 60% amplitude modulation. (b) Xpol: +0.01 ps delay, Ypol: -0.01 ps delay.

### 3.3 回折型振幅変調における $2\pi$ 折り返しの影響

従来の波形整形器では $2\pi$ 以上の変調を付加することができないため、折り返すことによってマスクを生成している。この折り返しが回折型振幅変調においても有効であるかを調査しなくてはならない。

Fig.6(a)に $2\pi$ 折り返しを行わない場合の振幅変調をFig.6(b)に $2\pi$ 折り返しを行った場合の振幅変調の結果を示す。

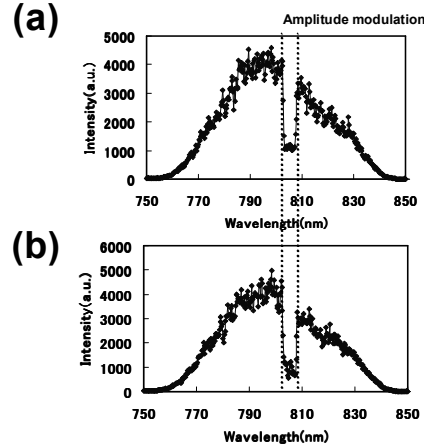


Fig.6 Amplitude modulation when (a) smooth phase (b) wrapped phase.

折り返しを行った場合のほうがスペクトルが乱れていて精度良く振幅変調できていないことがわかる。さらに空間的に周波數位相が変わるという問題もあると考えられる。これらの問題は0次光を用いているために起こる現象である。回折型振幅変調における1次光を用いればこれらの現象を回避することができる。

## 4 結論

2D-SLM を用い、振幅位相変調を行うことで、偏光整形パルス整形可能であることを示した。

今回用いた回折型振幅変調は0次光を用いる場合、 $2\pi$ 折り返しを行うと振幅変調が理論どおりにいかないことを示した。さらに空間的な位相にも悪影響を与えられられる。そこで1次回折光を用いることでこれらの悪影響を回避することができるため、1次回折光を用いた偏光波形整形器を構築することによってより完全なあいまい度のない偏光整形が可能となる。

多くの光学素子に偏光依存性を持つため目的とした偏光状態を理論的に導出することには限界がある。しかし、この偏光波形整形器ではあいまい度のない偏光を整形することができるため、フィードバック制御と組み合わせることによってどんな複雑な時間依存偏光パルスでも生成できると考えられる。

## References

- [1]H. Rabitz, et.al., “Selective Bond Dissociation and Rearrangement with Optimally Tailored, Strong-Field Laser Pulses,” *Science*, **292**, 709 (2001).
- [2]H. Rabitz, et.al., “Learning from learning algorithms: Application to attosecond dynamics of high-harmonic generation,” *Phys. Rev. A*, **70**, 043404 (2004).
- [3]Y. Silberberg, et.al., “Full control of the spectral polarization of ultrashort pulses,” *Opt. Lett.*, **31**, 631 (2006).
- [4]K. A, Nelson, et.al., “Diffraction-based femtosecond pulse shaping with a two-dimensional spatial light modulator,” *Opt. Lett.*, **30**, 323 (2005).