

2次元MEMS空間光変調器を用いた400nmフェムト秒レーザーパルスの位相・振幅波形整形

Pulse shaping by spectral phase & amplitude modulation for 400 nm with a two-dimensional MEMS SLM

阿部智明(M1), 王戈(B4), 矢澤洋紀(D2)

T. Abe, G Wang, and H. Yazawa

Abstract

We perform the application of a novel micro mirror array, which is based on a micro electro mechanical system (MEMS), as a one- and two-dimensional phase & amplitude modulating spatial light modulator (SLM) for femtosecond pulse shaping in the spectral region from the deep-ultraviolet (DUV) to the near-infrared (NIR) (200–800 nm). Using such a MEMS-SLM, we demonstrate comprehensive pulse shaping at 400 nm.

1 はじめに

近年の超短光パルス波形整形技術の発展は目覚しく、光パルスの時間波形の制御や選択的なスペクトル強度の制御を実現するために、そのスペクトル振幅・位相をシンセサイズできる波形整形技術が研究されてきた。これらの技術が発達することによって、分子化学反応の量子制御[1]や分光学[2]、光計測学[3]など幅広い分野へ超短パルスレーザーの応用が可能となった。

波形整形器として代表的なものとして、液晶空間光変調器(Liquid crystal-spatial light modulator: LC-SLM)、音響光学光変調器(Acousto-optic modulator: AOM)が挙げられる。最新の研究として、LC-SLMでは回折型2次元波形整形器による振幅位相同時波形整形[4]、1次元高分解能型LC-SLMを用いた振幅位相同時波形整形[5]、AOMでは遠紫外域での波形整形[6]が報告されている。しかし、これらの波形整形器は光変調のためにそれぞれ液晶、音響光学素子を透過させるため、その使用周波数帯域は限られる。例えば、紫外から近赤外に渡るような広帯域な光パルスへの応用は実現できない。そこで新しい波形整形器として Micro electro mechanical system -micro mirror array(MEMS-MMA) SLM[7]がある。MEMS-MMA SLMはFig.1のようにアレイ状に並べられたアルミミラーに、周波数分解させ

た光を入射し、周波数ごとに反射させる距離を変えることで直接光学長を変化させる。LC-SLM、AOMと異なり、使用帯域の制限はアルミの反射帯域となるので、理想的には遠紫外域から赤外域での非常に広帯域の範囲で波形整形が可能である。

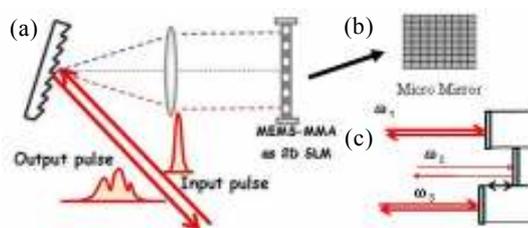


Fig.1: (a) Folded 4-f system using MEMS-MMA. (b) Front-view of micro mirror arrays. (c) Deflection pattern of mirror pixels.

MEMS-MMAは前述のように優れた性能を持ち、今まで実現できなかった高度に精密な波形整形を可能にした。MEMS-MMAの広帯域波形整形能力と2D SLMでの振幅位相同時変調能力を統合できれば、異なる波長のパルスレーザー(400 nmと800 nm)の合成電界の完全振幅位相波形整形を実現できる。近年分子コヒーレント制御において400 nmと800 nmの合成電界による、とても興味深い分子配列(molecular orientation)の実験報告がなされた[8, 9]。しかし、これらの実験で二色レーザーの制御には比較的光軸が不安定なマッハツェンダー干渉計を使っていた。それに対してこの高性能なMEMS-MMA波形整形器を使うと、より詳しく化学反応のダイナミクスを調査することができると期待される。

そこで我々は、400 nmと800 nmの合成電界波形整形の実現を目標とした上で、MEMS-MMA SLMを用いて400 nmでの振幅位相波形整形の実現を試みた。

2 実験方法

実験セットアップを Fig.2 に示す. 光源から発生した中心周波数 800 nm, スペクトル幅 40 nm(FWHM), フーリエ限界パルス幅 20 fs のフェムト秒レーザーパルスを, チャープパルス増幅器(CPA)によって約 0.35 mJ/pulse まで増幅する. 出射光パルスの繰返し周波数は 1kHz, スペクトル幅は 25 nm であり, このときフーリエ限界パルス幅にして 40 fs である. まず, 出射光パルスをレンズ対($f=150$ mm, $f=-75$ mm)で ~ 8 mm($1/e^2$)から ~ 4 mmへと変換した. 次に光チョッパーを通過させることで, 繰返し周波数を 1 kHz \sim 71 Hzへと変換した. その後 SHG 結晶(Type1-BBO 厚さ 0.5 mm)に入射し, 2 次高調波を発生させた. 波形評価には空間周波数干渉法(SFI)を行った.

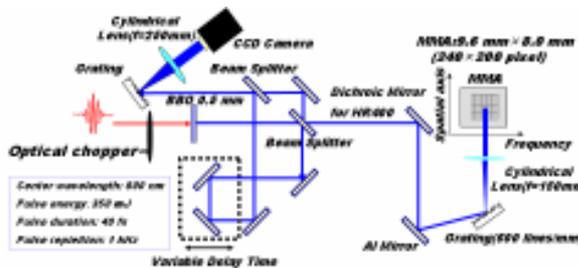


Fig.2: Schematic diagram of experiment setup for 400 nm pulse shaping

3 MEMS-MMA と光パルス同期実験

MEMS-MMAの最大の弱点は, その動作サイクルが最大で200Hz程度であるということである. 我々の CPA からの出射パルスは繰返し周波数1kHz で, MEMS-MMA の最大動作周波数より高く, レーザ繰返し周波数を変換する必要がある. また, MMA は1サイクルの中で最大約5% の時間しか動作できないため, パルスがMMA 面に到達する時にMMAが動作するように同期を取らなければならない. そこで我々はこの2つのタスクを位相ロック光チョッパーによって達成した. 実験セットアップをFig.3に示す. CPAの1 kHzの信号を光チョッパーの電気ドライバに入力し, 1 kHzの1/14でチョッピングすることで1 kHzの光パルスを71 Hzに間引いた. その後, 光チョッパードライバからの出力信号(71 Hz)をパルスの遅延を調整できるパルス発生器(pulse generator)に入力し, 光パルスと光チ

ョッパーからの電気信号のディレイを調整した. 71 Hzの信号をMEMS基盤に入力し, 最終的にMMA に到達する際にトリガーがかかるようにした. Fig.3の① \sim ④の信号をオシロスコープによって同時に測定した結果をFig.4に示した. 信号が立ち上がっている時間が動作Onとなっている時間であり, パルスとMMAの同期が取れていることが確認できた.

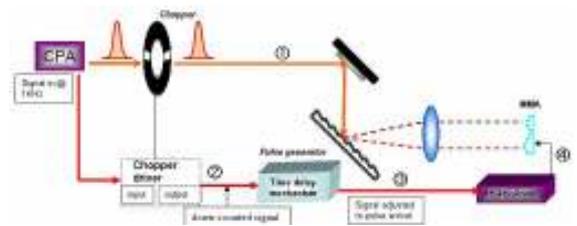


Fig.3: Experimental setup for the synchronization of devices.

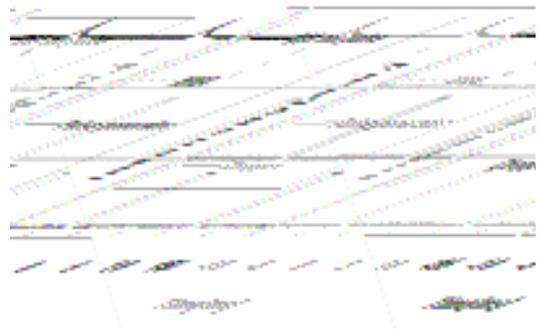


Fig.4: Experimental measurements of timing correlation between a laser pulse and MMA

4 400 nm 域フェムト秒光パルス振幅・位相波形整形実験

4.1 400 nm 域振幅変調

2次元波形整形器による位相変調はスペクトル成分の回折効果を利用することで達成される[4, 5]. 振幅の変調項 A_n はフーリエ面上空間方向に正弦関数型のパターンをかけた場合,

$$A_n = \exp(i\Delta(y) \sin(2\pi f_s y)) \quad (1)$$

で与えられる. $\Delta(y)$ は正弦関数の振幅, つまり変調の大きさを表す. ここで正弦関数の周期 f_s が十分高いとすると, (1)式は,

$$A_n = A_{\Delta(y)} = \sin c \left[\pi - \frac{\alpha}{2} C(\omega) \right] \quad (2)$$

のように近似できる。C(ω)は周波数 ω における0~1の定数である。このように振幅変調において正弦型関数を利用する場合、その周期 f_s を高くする必要がある。そのため本実験では、空間軸方向に30周期の正弦関数型パターン(MEMSピクセルにして1周期あたり6 pixel)を加えた。また(2)式によると、変調の深さが振幅の変調に比例するため、正弦関数の振幅を0~ 2π の範囲で $1/4\pi$ ずつ変化させた。実験結果をFig.5に示す。

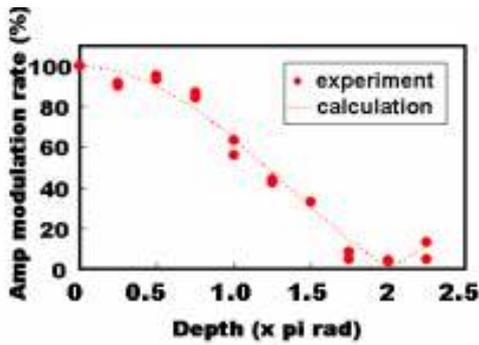


Fig.5: Amplitude modulation of the pulse laser. The dotted curve represents calculation, and the solid circles represent experimental measurement

Fig.5の結果を見ると、 $\phi=2\pi$ において約96%の強度変調が実現できていることが確かめられた。また振幅変調の変化曲線はsech関数型の理論曲線と比較するとよく一致する。回折効果による振幅変調が実験により確認できた。

4.2 400 nm 域位相変調

MEMS-MMA SLMの波形整形器としての基本的な性能である位相変調性能を確認した。本実験では、パルス列を生成する正弦関数パターンと、線形チャープを加える二次分散の位相変調を行った。使用したpixel数は約24 pixelでスペクトル幅にして~10 nmである。実験結果、結果から再構築されたスペクトル位相とその理論値をFig.6に示す。正弦関数パターンは一周期8 pixelで振幅が 2π に対応する電圧で行った。これらの結果より、400 nmでの位相変調が可能であることを確認できた。

4.3 400 nm 域振幅・位相変調

前述のように、MEMS-MMA SLMによって位相、振

幅のそれぞれの制御が可能であることがわかった。そこで、MEMS-MMAに400 nmパルスの位相・振幅を同時に変調するようなマスクをかけた。周波数方向に

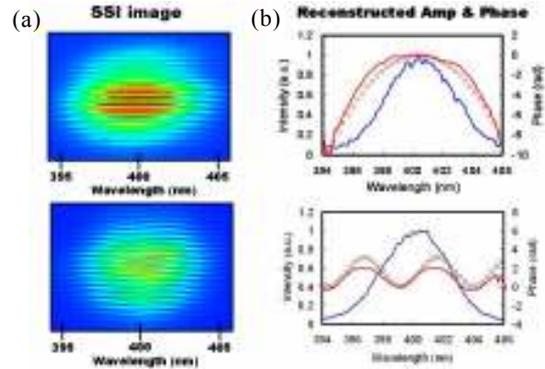


Fig.6: The experimental result of Fourier transform limited pulse applied with sinusoidal and quadratic function mask (a) SSI images and (b) reconstructed spectral phase and spectrogram. The curve signifies spectrum, the solid curve is the applied mask, and the dotted shows the phase mask reconstructed from the SSI image.

振幅 π の正弦型のマスクをかけ、空間方向には400 nmパルスの中心波長に対応するマイクロミラーのpixel numberの1列にのみ振幅 2π の正弦型のマスクをかけた。我々が用いたMEMS MMAは、変調できる最大の光学長差は800 nmで、400 nm中心のパルスにとって 4π の変調が出来ることに対応する。一方で800 nmの場合、最大 2π の変調に対応する。本実験では、 2π を位相変調に使い、もう 2π を振幅変調に用いた。この位相・振幅同時変調を行う場合、400 nmパルスは変調が可能であるが、800 nmの場合、位相ジャンプ (Fig.7) が起こる条件下で変調をかけることに対応する。そこで、400 nmパルスで 4π 全てを変調に使う場合と、 2π で位相ジャンプを生じさせ、マスクを折り返す場合(800 nmを想定した場合)と比較した。結果をFig.8に示す。

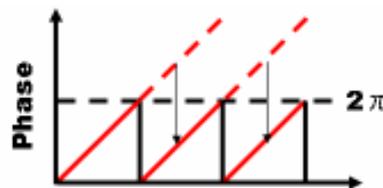


Fig.7: Schematic view of a phase wrapping at 2π .

まずFig.8(a)の結果を見ると、中心1 pixelに対応する

振幅が約90%の変調が達成されているのがわかる。次に位相を見てみると、Fig.6の結果とほぼ同じであるこ

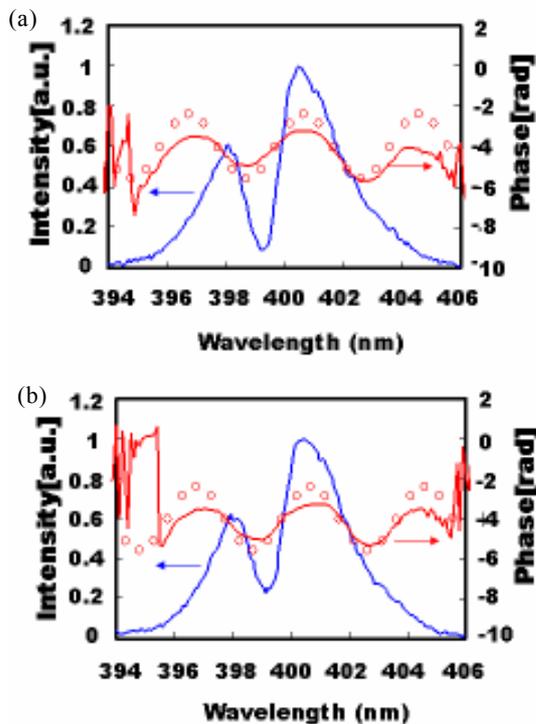


Fig.8: 100% amplitude modulation and a 8-pixel-cycle sinusoidal phase mask are applied here under (a) no phase wrapped (b) phase wrapped condition. The curve signifies spectrum, the solid curve is the applied mask, and the dotted shows the phase mask reconstructed from the SSI measurements.

とがわかる。この結果より、400 nm の振幅位相同時波形整形は高精度で可能と言える。一方で、Fig.8(b)の結果を見ると、振幅変調の結果が約75%と位相ジャンプが無いFig.8(a)の結果と異なる。しかし、位相変調の結果はほぼ同じである。これらを踏まえてまず振幅変調において 2π wrapping 位相ジャンプは非常にクリティカルな要素であると考えられる。振幅変調では、MMA上の空間軸方向に正弦型の関数のマスクをかけ、その振幅を変化させることで回折効率を変化させている。今回のように、位相ジャンプが起こる条件下ではジャンプが起こっている位置で、新たに回折格子の溝が出来たり、溝の深さ、つまり正弦型関数の振幅が小さくなってしまっている。このように回折格子の溝の形が崩れてしまうことで、期待される振幅変調の効果が得られないと考えられる。次に位相変調であるが、これ

は中心波長に対応する pixel 上でしか、振幅と位相変調の重なりが起こっていないために余り差が見られないことも考えられる。位相への影響は振幅ほどクリティカルではないかもしれないが、振幅位相同時変調マスクがかけられるスペクトル域を広げ、振幅変調の割合を変えたときに影響が出ることも考えられる。これらの結果より、800 nm での波形整形において振幅位相同時波形整形を高精度に達成できるかどうか更なる調査が必要である。

5 まとめ

MEMS-MMA SLM による中心波長が400 nm の超短パルスレーザの同時振幅位相変調ができることを確認した。MEMS-MMA SLM はさらに短波長領域での波形整形も可能なので、これからMEMS-MMA SLM の更なる波形整形で応用が見込まれる。しかし、特に位相ジャンプが起こる場合において、その広帯域な変調能力の限界を求めるには更なる調査が必要である。ただし、2色レーザの電界重ね合わせの制御において、位相ジャンプが起こらない条件下での時間遅延、CEP制御等は可能で合成電界波形整形への応用が期待される。

References

- [1] P. Brumer and M. Shapiro, *Chem. Phys. Lett.*, vol. 126, no. 6, pp. 541–546, 1986.
- [2] M. M. Wefers and K. A. Nelson, *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 12, no. 7, p. 1343, 1995.
- [3] F. Huang, *Opt. Lett.*, vol. 26, pp. 382–384, 2001.
- [4] J. C. Vaughan, T. Hornung, T. Feurer, and K. A. Nelson, *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 3, pp. 323–325, 2005.
- [5] J. W. Wilson, P. Schlup, and R. A. Bartels, *Opt. Express*, vol. 15, pp. 8979–8987, 2007.
- [6] Brett J. Pearson and Thomas C. Weinacht, *Opt. Express*, vol. 15, pp. 4385–4388, 2007
- [7] M. Hacker, G. Stobrawa, R. Sauerbrey, T. Buckup, M. Motzkus, M. Wildenhain, and A. Gehner, *Appl. Phys. B*, vol. 76, no. 6, pp. 711–714, 2003.
- [8] H. Ohmura and T. Nakanaga, *J. Chem. Phys.*, vol. 120, no. 11, pp. 5176–5180, 2004.
- [9] H. Sakai, S. Minemoto, H. Nanjo, H. Tanji, and T. Suzuki, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 90, no. 8, pp. 83001–83005, Feb 2003.