

マイクロレンズアレイによる面分光手法を応用した

高光利用効率な超高速コマ撮りシングルショットイメージング手法の開発

Development of a single-shot ultrafast burst imaging method with higher light utilization efficiencies using imaging field spectroscopy with a microlens array

根本 寛史 (M2), 鈴木 敬和 (D3), 糸山 翔太(B4)

Hirofumi Nemoto, Takakazu Suzuki, and Shota Itoyama

Abstract

To increase the number of frames and improve light throughput in SF-STAMP, we applied a snapshot imaging spectroscopy method using a microlens array (MLA) and an angle dispersive element to STAMP. We obtained single-shot burst images of femtosecond laser-induced ablation process on the glass surface by this new STAMP with a frame interval of 300 ps and a 1.8-ns time window. The number of frame was limited to 7 with the present 60x60 microlens array.

1. はじめに

従来の電子的高速カメラで追従できないナノ秒領域以下の非反復現象を捉える手法として、線形周波数チャープレーザ光パルスと光学的フーリエ変換を応用した超高速コマ撮り計測法 STAMP [1], と SF-STAMP [2]がある。SF-STAMP では、回折光学素子 (DOE)によるビーム複製と波長選択フィルタ (BPF)を組み合わせた多波長同時撮影装置を利用することで、DOE のビーム複製数に対応する 25 枚連写撮影が実現している。また、回折格子とミラー対を用いて自由空間でパルス幅の伸張を行う光学系 (FACED) [3]により生成した波長掃引パルス列を照明光に用いることで、SF-STAMP の撮影時間窓をナノ秒領域まで拡大することに成功している。しかし、SF-STAMP では、ビームを複製してから波長選択を行うという特性上、撮影枚数の増加とともに、照明光の光利用効率が低下するという課題がある。また、FACED の中心波長走査型パルス列と BPF の波長選択性との整合性において課題がある。

本研究では、撮影枚数と光利用効率改善のため、マイクロレンズアレイ (MLA) と角度分散素子を利用したスナップショットイメージング分光法である面分光の手法 [4]を STAMP のスペクトル分割に応用し、高い光利用効率で画像情報の時空間分解を実現するシングルショット撮影法 (STAMP utilizing Lenslet array, LA-STAMP)を開発した。

2. LA-STAMP の設計・構築

本研究では、レーザー光源の帯域において、シングルショット撮影に十分な強度を有し、かつ、強度差が小さい 803~811 nm の帯域において、7 枚の連写撮影を実現できるように、LA-STAMP の設計・構築を行った。構築したセットアップを Fig. 1 に示す。測定対象のイメージは、結像レンズによって、MLA(60x60)上に結像し、各レンズによって空間的にサンプリングされ、焦点面にアレイ状のスポットを形成する。各レンズから出射したビームは、コリメートレンズによって平行光となり、回折格子に入射する。回折格子によって波長分散を受けた各ビームは、結像レンズを通過し、スペクトル分解されたスポットがカメラ上に結像される。

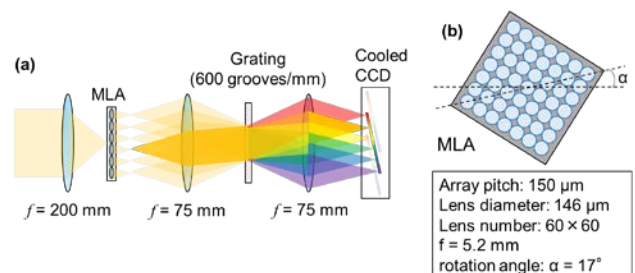


Fig.1 (a) Setup of LA-STAMP, (b) Specification of MLA

3. 波長掃引パルス列の生成

ナノ秒時間窓での単発撮影を実現するため構築した、中心波長の異なる遅延パルス列(波長掃引パルス列)を生成する FACED 光学系を Fig. 2 に示す。

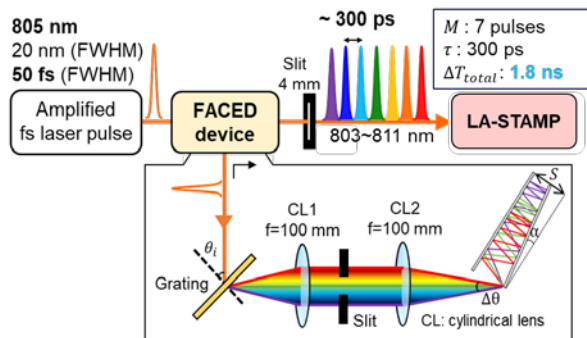


Fig. 2 Schematic setup of spectrally sweeping pulse train generating system

波長毎に異なる入射角で非平行ミラー対に入射した光は、多重反射後に異なる遅延時間をもって戻り、再び回折格子よりほぼコリメートされる。ミラー対(FACED)と4f-光学系、回折格子を含めた超高速イメージングのための波長掃引パルス列生成光学系を、4f-FACEDと呼ぶ。803~811 nmの帯域のみを抜き出すため、4f-FACEDシステムのフーリエ面にスリットを配置し、スペクトルの狭帯域化を行った。FACEDを利用した時間幅伸長では、入射光路と出射光路が一致するのは、入射角がミラー対の角度ずれの整数倍である波長成分のみであり、その他の波長成分では、完全には一致しない。Fig. 3にFACED出射後の伝搬の様子を示す。

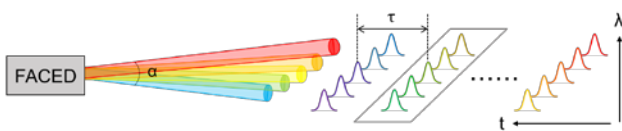


Fig. 3 Schematic diagram of propagation of spectrally sweeping pulses

FACED出射後の伝搬方向は波長成分ごとに僅かに異なるため、伝搬するにつれて空間的に分離する

とともに、伝搬経路の違いによる光路長の違いから、サンプル面において時間的なずれが生じる。このFACEDの特性によって生じる、反射回数が同じ波長成分間での時間的なずれが、各パルスの実効的なパルス幅となり、シングルショット撮影における時間分解能となる。FACEDから出射したパルスの空間的にずれた成分をカットするため、回折格子から200 mmの位置に開口4 mmのスリットを配置し、波長選択を行った。波長選択した後のFACED出射パルスのスペクトルをFig. 4に示す。

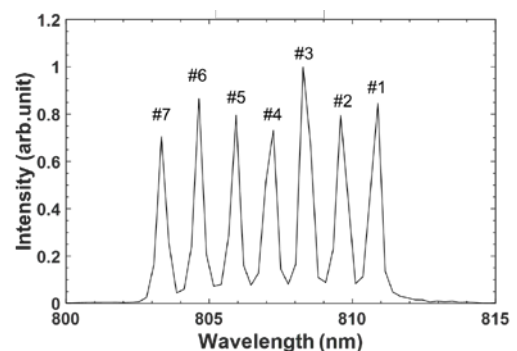


Fig. 4 Spectrum of spectrally sweeping pulse train

2枚のスリットにより、狭帯域化、離散化したスペクトルを得た。番号を示したスペクトルが、波長掃引パルス列の中心スペクトルに対応し、各パルスのパルス間隔が、シングルショット撮影のフレーム間隔に対応する。光線追跡シミュレーション(codeV)によって、照明光に用いた波長掃引パルス列のパルス幅、LA-STAMP計測の露光時間、フレーム間隔を求めた結果をTable 1に示す。XFROGを用いた計測からも約20 psが露光時間であることがわかった。

Pulse number	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th
Pulse width	26.3 ps	27.4 ps	28.5 ps	29.0 ps	30.1 ps	31.1 ps	31.6 ps
Exposure time	18.7 ps	18.8 ps	19.0 ps	18.8 ps	19.0 ps	19.1 ps	19.0 ps
Frame interval		303.6 ps	303.6 ps	303.7 ps	304.0 ps	303.4 ps	303.4 ps

Table 1 Characteristics of probe laser pulses generated by 4f-FACED optics.

4. LA-STAMP 光学系によるシングルショット 2

次元バーストイメージング

4.1. マルチスペクトラルイメージング

生成した波長掃引パルス列を照明光に用いて、USAF-1951 テストターゲット (Newport 社製, RES-1) を撮影, マルチスペクトラルイメージを再構成した結果を Fig. 5 に示す. イメージは顕微光学系で 50 倍に拡大して取得した. また, 全ての画像は, CCD カメラで取得できる分光されたスポットのイメージから, 各波長のスポットにおいて, 中心を含む, 5×5 pixel の光強度を積算して同じ波長成分の本研究では, スポットを MLA の 60×60 空間に配列することによって, 画像の再構成を行った.

撮影したテストターゲットは $4.4 \mu\text{m}$ 間隔の構造であり, 縦方向, 横方向共にターゲットの構造を分離できたため, 空間分解能は $4.4 \mu\text{m}$ 以下と評価できた.

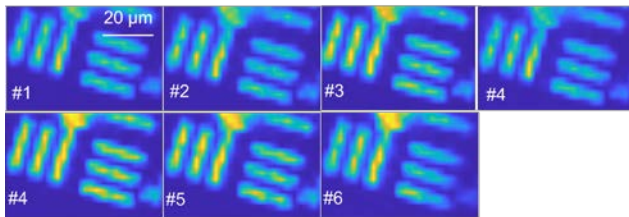


Fig. 5 A multi-spectral image captured by SF-STAMP system with spectrally sweeping pulse train

Fig. 5 内に示した番号は, Fig. 4 のスペクトルに示した番号に対応している.

4.2. シングルショットバーストイメージング

LA-STAMP によるシングルショットイメージングの実験セットアップを Fig. 6 に示す. 光源には増幅した Ti:Sapphire レーザパルスを用いた. 励起光

にはその 2 倍波を使用し, プローブ光には 4f-FACED で生成した波長掃引パルス列を用いた. Fig. 7 に薄膜ガラス表面におけるアブレーション過程を 300 ps のフレーム間隔で 1.8 ns にわたってシングルショット撮影した結果を示す. アブレーションルームの過渡イメージが所得できており, LA-STAMP の原理実証ができた. MLA のレンズサイズを小さくしアレイ数を増加させることで分解能は $1 \mu\text{m}$ まで改善できる予定である.

5. まとめ

マイクロレンズアレイと角度分散素子を利用したスナップショットイメージング分光法である面分光の手法をシングルショット超高速 2 次元バーストイメージング手法である STAMP のスペクトル分割に応用することによって, 高い光利用効率でサブナノ秒現象をシングルショット撮影可能な装置 (LA-STAMP)を開発した.

References

1. K. Nakagawa, A. Iwasaki, Y. Oishi, R. Horisaki, A. Tsukamoto, A. Nakamura, K. Hirose, H. Liao, T. Ushida, K. Goda, F. Kannari, and I. Sakuma, "Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)," *Nat. Photonics* **8**, 695–700 (2014).
2. T. Suzuki, F. Isa, L. Fujii, K. Hirose, K. Nakagawa, K. Goda, I. Sakuma, and F. Kannari, "Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) utilizing spectral filtering," *Opt. Express* **23**, 30512 (2015).
3. J.-L. Wu, Y.-Q. Xu, J.-J. Xu, X.-M. Wei, A. C. Chan, A. H. Tang, A. K. Lau, B. M. Chung, H. Cheung Shum, E. Y. Lam, K. K. Wong, and K. K. Tsia, "Ultrafast laser-scanning time-stretch imaging at visible wavelengths," *Light Sci. Appl.* **6**, e16196–e16196 (2017).
4. A. Boniface, I. Gusachenko, K. Dholakia, and S. Gigan, "Rapid broadband characterization of scattering medium using hyperspectral imaging," *Optica* **6**, 274 (2019).

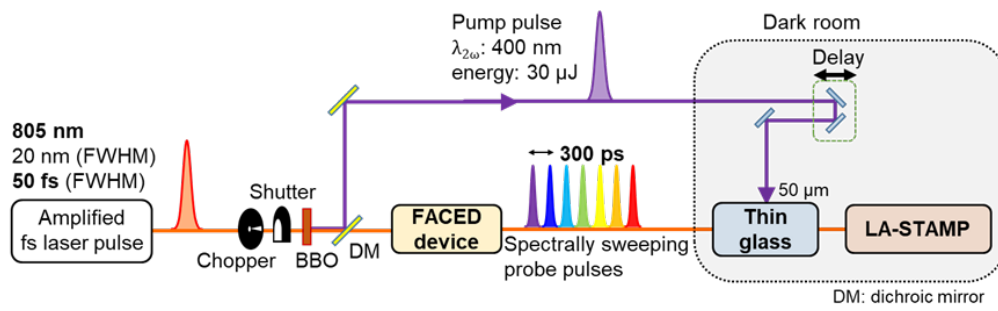


Fig. 6 Experimental setup of single shot imaging by LA-STAMP

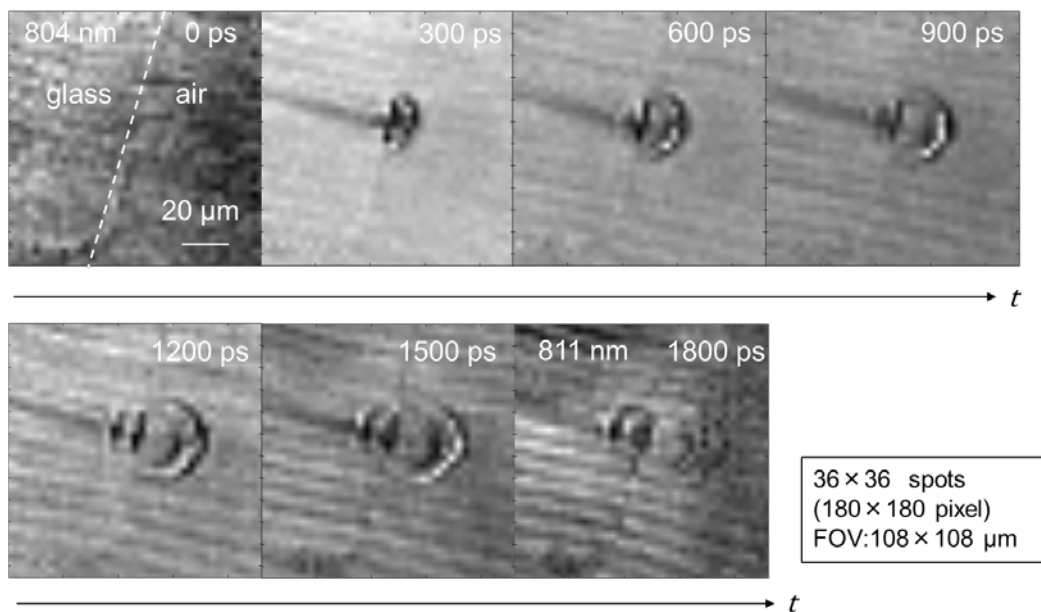


Fig. 7 Measured images of femtosecond laser-induced ablation process on the glass surface