

LA-STAMP (STAMP utilizing Lenslet Array) におけるフレーム数増加による

計測可能時間窓の拡大

Expanding measurable time window of LA-STAMP (STAMP utilizing Lens Array)

by increasing the number of frames

糸山 翔太(M1), 高澤 一輝(M2), 高橋和輝(M1), 葉 京武(B4)

Shota Itoyama, Kazuki Takasawa, Kazuki Takahashi, Keibu Yo

Abstract

To increase the number of frames of a single-shot burst imaging scheme LA-STAMP (STAMP utilizing Lens Array), we introduced a micro lens array with a large NA. The number of frames increased from 7 to 13. The aberration generated by the new optical setup was partially corrected.

1. はじめに

フェムト秒レーザが有するパルス幅の短さと高ピークパワーは長パルスでは困難な光と物質の相互作用（多光子吸収過程や熱拡散を防ぐ電子-フォノン非平衡状態、クーロン爆発による非熱的加工など）を誘起し、高品質・高精度な加工を実現するツールとして期待されている。レーザ加工のメカニズムを理解する上では初期のエネルギー励起過渡現象の観察をすることが超高速変化する現象の物理を解明する上で重要となる。相転移やレーザ誘起表面周期構造、アブレーションプルームなどの現象における初期の電子状態やプラズマ、衝撃波伝搬を観察することはそれらの現象を制御するために重要であり、そのための超高速観察手法開発が求められている。

STAMP[1]は電子的高速カメラで追従できないナノ秒～サブピコ秒領域の現象を1ショットで2次元撮影可能な手法である。ナノ秒以下の現象を捉える汎用的な手法としてポンプ・プローブ法があるが、

繰り返し計測が必要であるため正確な再現性に乏しい現象撮影には向かない。線形周波数チャープレーザパルスによる波長-時間変換と光学的フーリエ変換による波長-空間変換によって1ショットで異なる時間情報を持った波長成分を分光し2次元イメージとして取得可能なSTAMPは分光手法で区別でき、ペリスコープアレイを用いた初機のSTAMP、回折光学素子(DOE)と波長選択フィルタ(BPF)を組み合わせたSF-STAMP[2]、マイクロレンズアレイ(MLA)と角度分散素子を組み合わせたLA-STAMP[3]の3種類がこれまで開発されている。また、自由空間でミラー対によるパルス幅伸張を行う光学系であるFACED[4]により生成した波長掃引パルス列をプローブ光とすることでSTAMPの計測可能時間窓はナノ秒域まで拡大されている。LA-STAMPは、プローブ光パルスの利用効率が高く、FACEDとの整合性にも優れた手法である。

本年度は、このLA-STAMPの撮影枚数向上と結果的に計測可能時間窓拡大を目的として研究を行った。

2. LA-STAMP の設計・構築

本研究では、LA-STAMPの計測可能時間窓を10 ns以上、LA-STAMP撮影可能枚数を20枚以上とすることを目標に取り組んだ。そのためにLA-STAMPの再設計・構築を行った。光学系で使用したMLAはFig. 1(a)のような六角形配列凸レンズアレイでピッチ44 μm 、曲率0.049 mm、NA0.173である。

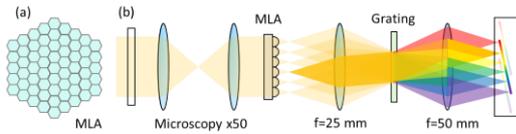


Fig.1 (a)MLA (b)LA-STAMP

LA-STAMP 光学系の原理は面内分光法である。まず測定対象のイメージを結像レンズで MLA 上に結像する。その際各レンズによって空間的にサンプリングされたイメージはフーリエ変換され焦点面にアレイ状のスポットを形成する。ただし、LA-STAMP 法の特長として、個々のレンズが捉えたイメージ自体は測定対象ではなく、強度と波長特性のみを利用することになる。その後、各レンズの光はコリメートレンズで平行光となり、回折格子に入射する。回折格子面では、各レンズに対応したイメージ面が逆フーリエ変換されて形成される。次に回折格子以降は $2f$ 分光器となっており、回折格子で波長ごとに角度分散を与え、結像レンズを通過し、時間および空間的にフーリエ変換され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。最終的に波長分散されて空間分離された各マイクロレンズへの入射光強度を波長ごとに 2 次元に並べて画像再構築することで、マルチスペクトラルイメージングを実現する。

MLA, 光源, 角度分散素子, 結像レンズのパラメータに基づき光学系の計算を行った結果を以下にまとめる。使用している用語定義は Fig. 2 のようになっている。

条件	計算結果
使用波長: 790 nm~ 810 nm	サブ瞳スポット直径: 14.76 μm
M2: 1.3	隣接スポット間隔: 88.0 μm
ビーム径: 8.0 mm	MLA 最小回転角: 9.61°
回折格子ピッチ: 600	波長成分スポット限界数: 36
MLA ピッチ: 44 μm	焦点面における波長広がり: 0.63 mm
NA: 0.173	焦点広がり限界: 1.05 mm
コリメートレンズ焦点距離: 25 mm	分解可能スペクトル幅: 33.53 nm
結像レンズ焦点距離: 50 mm	波長分解能限界: 0.93 nm
カメラピクセルサイズ: 7.4 μm	最大フレーム数: 21

Fig.2 Calculated design parameters of a modified LA-STAMP

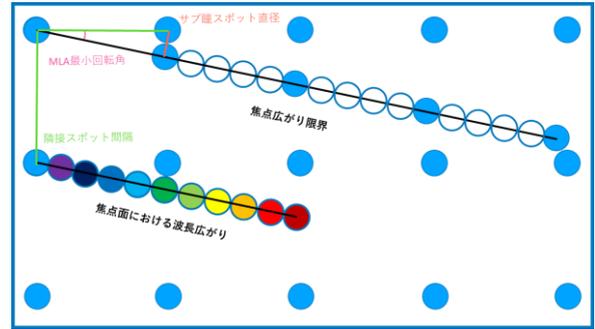


Fig.3 Term definition on the Fourier plane in a spectrometer.

計算結果から、空間的に分離できる最大のスポット数は 36 と求められる一方で、各フレームは波長ごとに分離していることが望ましいので、波長分解能と CCD の 1 ピクセルに含まれる波長幅を考慮すると最大フレーム数は約 21 が妥当であろう。

3. LA-STAMP 光学系によるマルチスペクトラルイメージング

目標とする 20 枚以上撮影が本光学設計で可能であるため、実際に光学系を構築し検証実験を行った。当初、光学系で MLA 以降のレンズには色消しレンズを使用していたが収差の影響でスポット径が大きくなる問題があったためカメラレンズ(TECH SPEC 社製 C series VIS-NIR 固定焦点レンズ)を使用し Fig.4 の光学系を構築した。この光学系では MLA で形成されたフーリエ面をカメラレンズで 2 度イメージ転写することでスポットを取得している。

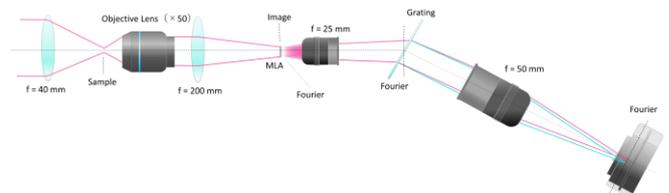


Fig.4 Image Transfer Optics

実際に USAF-1951 テストターゲット(Newport 社

製, RES-1)を撮影した際に波長分解されたフーリエ面における画像は静止ターゲットであるので Fig.5(b)のようになった。

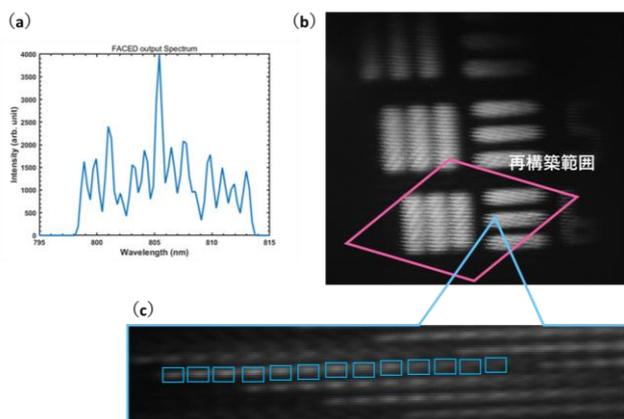


Fig.5 (a)Probe laser pulse spectrum (b)Image of Fourier plane, (c)Enlarged Image of (b).

光源には FACED で波長分散化された 13 パルス (Fig.5 (a)) を用い、得られた画像の一部の領域で波長ごとに画像再構築することで Fig.6 のように 13 枚のマルチスペクトルイメージを行うことができた。実際の高速に変化している対象の場合、Fig.5 (b)の CCD イメージは非常に不鮮明になるが、波長毎に再構築することでフレームイメージが 13 枚得られる。

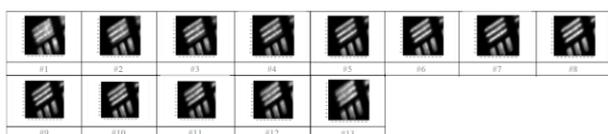


Fig.6 Reconstruction result

画像再構築は(1)各マイクロレンズの該当波長スポット検索, (2)波長ごとのピクセル再配置の手順で行った。具体的には(1)スポット検索でキャリブレーション用画像の特定波長に着目しスポット位置の計算を行う。その後、計算結果とのずれを補正するために計算結果のスポット座標から周辺 5 ピクセル範囲でより輝度値の高いピクセルを探索し、

あれば座標更新する。次に(2)で再構築したい画像において(1)で取得したスポット座標の周辺 5 ピクセルの輝度を平均化し、座標における輝度とする。最終的に波長ごとにその輝度を並べることで画像の再構築が完了する。

Fig.6 のマルチスペクトルイメージでは, 35×35 のピクセル範囲で画像再構築を行っているため FOV は $30 \mu\text{m}$ と計算できる。また空間分解能は顕微光学系でサンプルを 50 倍に拡大した後ピッチ $44 \mu\text{m}$ の MLA の各レンズ領域で輝度を平均化しているため $0.88 \mu\text{m}$ と計算できる。再構築可能な範囲が限られている要因としては、(1)スポット形状と(2)アルゴリズムの 2 つが挙げられる。(1)は CCD カメラのフーリエ面における波面が光軸に垂直な状態から傾いていることが原因でスポット位置によって焦点が正確に合わなくなっているためである。(2)では全てのスポットに対して等間隔で探索するアルゴリズムを用いているが、実際には撮像素子側でスポットが等間隔に並んでいないことによる。(1)に関してはイメージ転写を行い像が拡大されることで影響が大きくなっているので Fig.7 のような 4f 光学系を構築し改善できる。また(2)の要因に関してはスポット位置に応じて探索範囲を変更することで改良できる。

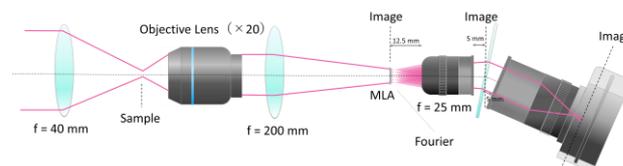


Fig.7 4f optical layout.

4. まとめ

本研究では, MLA と角度分散素子を利用した面分光手法を STAMP に応用した LA-STAMP の撮影可能枚数増加に取り組んだ。従来の 7 枚から目標とする 20 枚の取得が可能であるが現状では, FACED 光

学系における中心波長掃引パルス列発生の制限から 13 枚まで増加できることがわかった。さらに、CCD 面においてスポット径が収差により大きくなる点も影響している。また視野に関しては 4f 光学系と画像再構築アルゴリズムの改良で今後改善できる。

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. H. Nemoto, T. Suzuki, and F. Kannari, "Single-shot ultrafast burst imaging using an integral field spectroscopy with a microlens array", *Opt. Lett.* **45**, 18(2020)
4. 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).