

# SF-STAMP と高速度カメラの併用による

## リアルタイム全光学超高速連写イメージング

### All-optical Real-time Ultrafast Burst Imaging by combining SF-STAMP and a High-speed Camera

鈴木 敬和 (D1), 根本 寛史 (M1)

Takakazu Suzuki, Hirofumi Nemoto

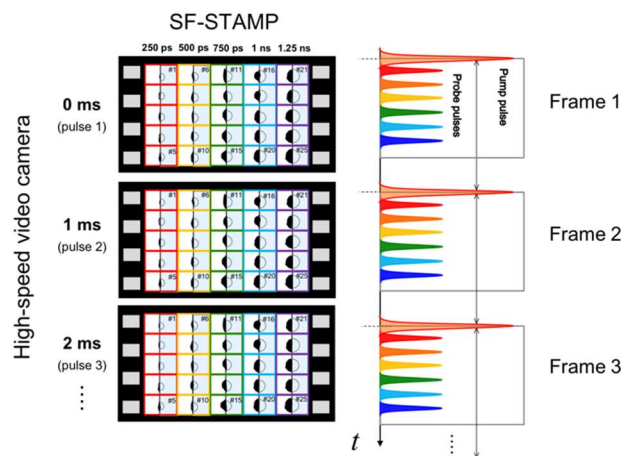
#### Abstract

By introducing a high-speed (HS-) camera as a detector in STAMP, we obtained real-time consecutive ultrafast 2D-burst images in accordance with the frame rate of the HS-camera. In this work, since the temporal resolution of STAMP is irreverent to the imaging sensor, we demonstrated the combination of SF-STAMP and a 1000 fps HS-camera (nac Image Technology, MEMRECAM HX-7s) and monitored  $\sim 10$  ps of time sequence images of 1-kHz femtosecond laser processing of glass material.

#### 1. はじめに

近年さまざまな高速イメージング手法が提案されている [1] が、数 10 ピコ秒から数ナノ秒のサブナノ秒の時間窓を対象とするシングルショットバーストイメージング法は存在しない。周波数チャープした単一レーザパルスを超高速な異波長コヒーレントストロボ光源としてコマ撮りを実現する Sequentially Timed All-optical Mapping Photography (STAMP) [2] は、世界最高速の連写を実現する手法であり、原理的にフェムト秒からナノ秒の領域の全てを計測対象にできる。我々はこれまでに、回折光学素子 (Diffractive optical element: DOE) と波長選択干渉バンドパスフィルタ (Band-pass filter: BPF) を  $4f$  結像光学系に組み込むことで撮影枚数の向上だけでなく、大幅な簡素化・小型化を可能にした改良型 STAMP である STAMP utilizing Spectral Filtering (SF-STAMP) [3, 4] を開発し 25 枚のバーストイメージングを実現している。さらに Free-space Angular-

Chirp-Enhanced Delay (FACED) [5] を用いた波長掃引遅延パルス列を採用することにより時間窓をサブナノ秒領域に拡張を行ってきた [6]。画像エンコード法を工夫した 2 次元ストリークカメラ [7] や、空間周波数を時間的に変調して画像エンコードした手法 [8] も開発されてはいるが、画像再構築ポストプロセスにおける解像度の問題、計測速度の問題があり、直接イメージを取得できる点で STAMP が他の手法と比較してサブナノ秒領域におけるリアルタイム計測への応用に適している。



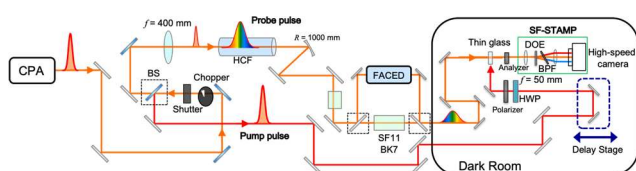
**Fig. 1** Schematic of real-time consecutive 1 kHz ultrafast 2D-burst imaging by the combination of SF-STAMP system and a 1-kfps high-speed camera.

本研究では、チャープパルス増幅器により増幅した kHz 繰り返しフェムト秒レーザによるレーザ加工プロセスを、Fig. 1 に示すように SF-STAMP と kHz レートで連続撮影が可能な高速度カメラと組み合わせることで、1 ショット毎の加工現象を SF-

STAMP により $\sim 10$  ピコ秒の時間窓で 25 フレームバーストイメージ計測し、高速カメラの 1000 fps のレートで加工パルス毎のリアルタイムイメージ (約 5000 パルス分) を一括計測する。この方法により、kHz 繰り返しレーザのパルス積算による加工現象の変化を観測する。

## 2. 実験セットアップ・実験結果

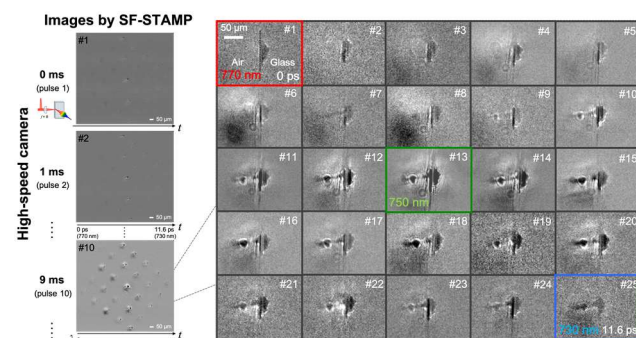
SF-STAMP と高速カメラを用いた実験で観測したガラスのフェムト秒レーザ加工プロセスにおけるピコ秒領域でのパルス毎のリアルタイム計測結果を示す。



**Fig. 2** Experimental setup of real-time observation of femtosecond laser processing with consecutive 1 kHz ultrafast 2D-burst imaging.

実験は Fig. 2 に示すシングルショットのポンプ・プローブ法を用いて行った。光源には、チャープパルス増幅されたレーザパルス (繰り返し周波数 1 kHz, 平均出力エネルギー 900  $\mu\text{J}$ , 中心波長 800 nm, スペクトル幅 20 nm (FWHM), パルス幅 50 fs (FWHM)) を使用し、中空ファイバ (Hollow core fiber: HCF) 入射前に、ポンプ光とプローブ光の2つに分けた。プローブ光は Ar ガスを封入した中空ファイバ (コア径 126  $\mu\text{m}$ ) に集光させ自己位相変調により広帯域化を行い、光学ガラス (N-SF11 および BK7) を伝搬させることで線形周波数チャープを付加させた。ポンプ光との波長のオーバーラップを防ぐ為、チャーププローブ光は 770~730 nm の帯域を利用し、11.6 ps の計測時間窓とした。SF-STAMP 光学系では 25 個のドットパターンを形成する DOE (回折角 25.6°, HOLOEYE 社製) と BPF

(中心波長 780 nm, バンド幅 3 nm, Semrock 社製) を  $f_1 = f_2 = 50$  mm の 4f 結像光学系に組み合わせることで波長帯域幅 40 nm (825~785 nm) のスナップショットマルチスペクトラルイメージを取得した。撮像には 2048 $\times$ 1920 ピクセル (ピクセルサイズ 11  $\mu\text{m}\times$ 11  $\mu\text{m}$ ) の 1000 fps の高速カメラ (nac image technology 社製, MEMRECAM HX-7s) を用いた。ガラス (50- $\mu\text{m}$  thick, Nippon Electric Glass, Green Glass (OA-10G)) のレーザ加工は、ポンプ光強度を 80  $\mu\text{J}$ , 50  $\mu\text{J}$ , 30  $\mu\text{J}$ , 10  $\mu\text{J}$  の条件で行った (集光レンズ :  $f=8$  mm を使用)。



**Fig. 3** The time sequences of femtosecond laser processing of glass sample were measured with time windows of 12 ps at each pump laser pulse. On the right-hand side, single-shot burst images (150 $\times$ 200 pixels) at the 10th pump pulse were depicted and arranged along with the time series.

80  $\mu\text{J}$ , 50  $\mu\text{J}$  のパルス強度では、1 発目でガラス表面にアブレーションブルームが形成されるが、30  $\mu\text{J}$ , 10  $\mu\text{J}$  ではガラス内部のキャリア発生による散乱のみが観測された。2 発目以降は、1 発目より大きなアブレーションブルームが観測され、それ以降ではアブレーション加工が進む様子が確認できた。加工効率に関してはパルス強度が大きいほど良いことが確認でき、いずれのパルス強度でも 100 パルス程度でレーザ加工は飽和することがわかった。

ここでは、計測例として Fig. 3 にポンプ光強度が 80  $\mu\text{J}$  の条件時の加工パルスごとのバーストイメージ (1 発目, 2 発目, 10 発目) を示す.

### 3. まとめと今後の展望

本研究では、サブナノ秒以下の領域でのシングルショットバーストイメージングを実現する STAMP と 1000 fps の高速度カメラを併用することで、1 kHz のフェムト秒増幅器の出力パルスによるレーザ加工プロセスのリアルタイム計測を行った。今年度の取り組みでは、チャープパルスを用いた~10 ピコ秒の時間窓計測によるアブレーション加工の初期段階の計測のみであったが、引き続き STAMP のプローブ光源に FACED を用いた波長掃引遅延パルス列を用いることでリアルタイムかつ数 100 ピコ秒でのサブナノ秒バーストイメージ計測を進める。

#### References

1. J. Liang and L. V. Wang, “Single-shot ultrafast optical imaging”, *Optica* **5**, 1113 (2018).
2. K. Nakagawa, A. Iwasaki, Y. Oishi, R. Horisaki, A. Tsukamoto, A. Nakamura, K. Hirosawa, H. Liao, T. Ushida, K. Goda, F. Kannari, and I. Sakuma, “Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP),” *Nat. Photonics* **8**(9), 695 (2014).
3. T. Suzuki, F. Isa, L. Fujii, K. Hirosawa, K. Nakagawa, K. Goda, I. Sakuma, and F. Kannari, “Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) utilizing spectral filtering,” *Opt. Express* **23**(23), 30512 (2015).
4. T. Suzuki, R. Hida, Y. Yamaguchi, K. Nakagawa, T. Saiki, and F. Kannari, “Single-shot 25-frame burst imaging of ultrafast phase transition of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  with a sub-picosecond resolution”, *Appl. Phys. Express* **10**, 92502 (2017).
5. J. Wu, Y.-Q. Xu, J. Xu, X. 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 (2017).
6. H. Nemoto, T. Suzuki, Y. Yamaguchi, and F. Kannari, “Single-shot Ultrafast Burst Imaging by Spectrally Sweeping Pulse Train with 100-ps Interval”, in *CLEO Pacific Rim Conference 2018*, OSA Technical Digest (Optical Society of America), Th1B.3 (2018).
7. L. Gao, J. Liang, C. Li, and L. V. Wang, “Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second,” *Nature* **516**, 74–77 (2014).
8. T. A. Ehn, J. Bood, Z. Li, E. Berrocal, M. Aldén, and E. Kristensson, “FRAME: femtosecond videography for atomic and molecular dynamics,” *Light Sci. Appl.* **6**, e17045 (2017).