

SF-STAMP 光学系を用いた超高速 2 次元バーストイメージングの撮影時間窓拡大のための波

長掃引遅延パルス列生成光学系

Construction of spectrally sweeping delay pulses generation system for
time window expansion of ultrafast 2D-burst imaging method by

Sequentially Timed All-optical Mapping Photography utilizing Spectral Filtering (SF-STAMP)

根本 寛史 (B4), 鈴木 敬和 (D1), 肥田 遼平 (M2), 山口 勇輝 (M1)

Hirofumi Nemoto, Takakazu Suzuki, Ryohei Hida, Yuki Yamaguchi

Abstract

We generate a spectrally sweeping 100-ps-interval pulse train for ultrafast burst imaging. Adopting those pulses to sequentially timed all-optical mapping photography utilizing spectral filtering (SF-STAMP), we realize single-shot burst 5-frame imaging with a sub-nanosecond time window.

1. はじめに

従来の電子の高速カメラで撮影できる単発現象は最短でナノ秒領域である。ナノ秒領域以下の高速現象の撮影には、ポンプ・プローブ法による時間分解計測が広く利用されているが、繰り返し計測が必要であるため再現性に乏しい現象を撮影する場合は適さない。この時間領域での単発撮影を実現する手法として、線形周波数チャープ光パルスと光学的フーリエ変換を応用した **Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)** [1]がある。STAMP 法は、プローブ光として用いるチャープパルスの瞬時周波数に遅延時間を対応させることに加え、画像情報をスペクトル帯毎に空間的に分解することで、チャープパルスの時間幅を計測時間窓とする時間分解能可変 2 次元高速バースト撮影を実現している。オリジナルの STAMP では最大コマ撮り枚数は 6 枚に制限されていたが、回折光学素子

(DOE) と波長選択バンドパスフィルタ (BPF) によりスペクトルイメージ分割を実現した STAMP utilizing spectral filtering (SF-STAMP) [2]により最大 25 枚の同時撮影が実現された [3]。しかし、分散媒質の材料分散を利用する方法では、伸張できるパルスの時間幅に限界があり、現在までに達成されている SF-STAMP の撮影時間窓は最大で 70 ps 程度である。本研究では、SF-STAMP 法の時間窓を拡大するアプローチとして、近年、Time-stretch imaging の手法に応用されている、回折格子とミラー対を用いて自由空間での多重反射によりパルス幅の伸張を行う光学系 **Free-space angular-chirp-enhanced delay (FACED)** [4]を構築し、中心波長の異なる遅延パルス列を生成した。我々は、生成したパルス列を SF-STAMP の時空間イメージング方式に組み合わせることで、撮影時間窓を 400 ps まで拡大し、ガラスのアブレーション過程をシングルショット撮影することに成功した。

2. FACED の原理

FACED を含む時間伸張光学系の全体図を Fig. 1 に示す。

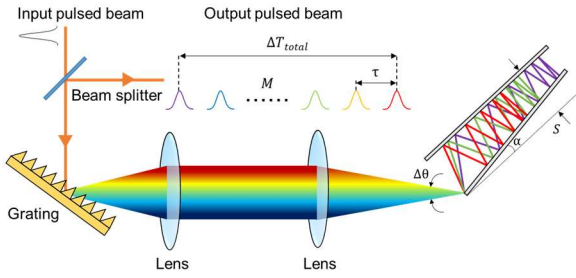


Fig.1 Working principle of FACED

入射したレーザパルスは角度分散素子を通じた後、波長ごとに異なる角度で1枚目のミラーに入射する。2枚目のミラーは1枚目のミラーに対して完全な平行からわずかに角度がずれた状態で配置されており、入射したパルスはミラー対を多重反射した後、遠端側から抜けることなく、再び入射端に戻り出射される。このとき、ミラー対での反射回数は入射角に応じて変化し、入射角が大きなパルスほど反射回数が多くなるため、FACEDに入射したパルスは、ミラー間隔に対応する光路差を持ったパルス列となってFACEDから出射される。ただし、ミラー対での多重反射において往路と復路が完全に一致するのは入射角 θ が

$$\theta = k\alpha \quad (k \text{ は整数}) \quad (1)$$

を満たす主光線と呼ばれるビームのみであり、それ以外のビームはわずかに光路がずれた状態でミラーの入射端に戻り出射される。FACEDで生成されるパルスの数 M は、ビームが1枚目のミラーに集光する角度を $\Delta\theta$ 、ミラー対が完全な平行から角度 α だけずれているとすると、次のようになる。

$$M = \frac{\Delta\theta}{\alpha} \quad (2)$$

また、隣接する2パルス間の時間間隔 τ は、光路差から求められ、ミラー間隔 S 、光速 c を用いて、

$$\tau = \frac{2S}{c} \quad (3)$$

となる。また、時間間隔 τ のパルスが M 個得られるので、伸張されたパルスのパルス幅は、

$$\Delta T_{total} = \tau \times M \quad (4)$$

となる。以上から、ミラー対の角度ずれ α 、ミラー間隔 S を変化させることでパルスの時間間隔やパルス幅を任意の値に設定することができる。ただし、実際に伸張可能な時間幅はミラー対の長さによって物理的に制限を受けることに注意が必要である。

3. 波長掃引遅延パルス列生成

3.1. 波長掃引パルス列生成光学系の構築

本研究では、パルス列の各パラメータが以下の値(中心波長: 795, 800, 805, 810, 815 nm, パルス間隔: 100 ps, パルス数: 5, 時間窓: 400 ps)になるように波長掃引パルス列生成光学系の設計、構築を行った。実際に構築した波長掃引遅延パルス列生成光学系のセットアップを Fig. 2 に示す。

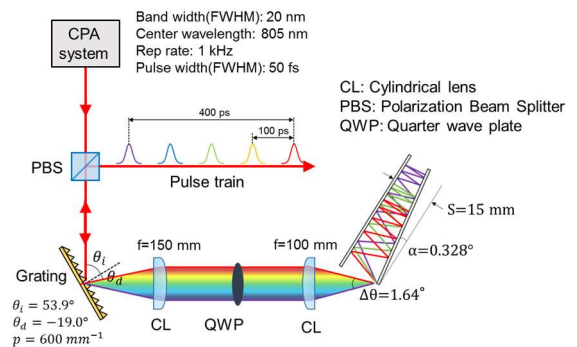


Fig. 2 Schematic setup of spectrally sweeping pulse train generating system

回折格子のブレイズ波長が 805 nm になるように入

射角を決定し、各波長の回折角、シリンドリカルレンズの焦点距離からミラーへの集光角を計算すると、 $\Delta\theta=1.64^\circ$ となった。上記のパラメータを満たすように、式(2)、(3)から $\alpha=0.328^\circ$ 、 $S=15\text{ mm}$ 、と決定した。なお、全ての波長のビームがミラー対で多重反射を行うためには、全ての波長のビームで1枚目のミラーへの入射角が 0 より大きくなる必要がある。本実験では、回折中心波長 805 nm のビームの1枚目のミラーに対して入射角が 6° になるようにミラー対全体を傾けた。FACED 入射前(CPA)パルスのスペクトルと FACED から出射したパルスのスペクトルを Fig. 3 に示す。

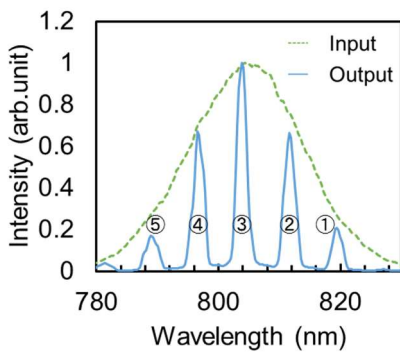


Fig. 3 SC 光 spectrum of FACED input pulse and output pulse

FACED に入射する前のスペクトルが連続的であるのに対し、FACED 出射のスペクトルでは、波長掃引パルス列の各パルスの中心波長に対応する 5 つの離散的なスペクトルのピークが計測される。なお、FACED 出射パルスのスペクトルは、光軸方向がわずかにずれているためピンホールを用いて主光線のみを測定したものである。

3.2. 波長掃引パルス列の時間特性

CPA システムから出射したフェムト秒超短光パルスから、FACED によって一定間隔の遅延時間を

有するパルス列が生成されていることを確認するため、和周波発生を利用してパルス間隔を評価した。Fig. 4 に和周波発生に用いたセットアップを示す。

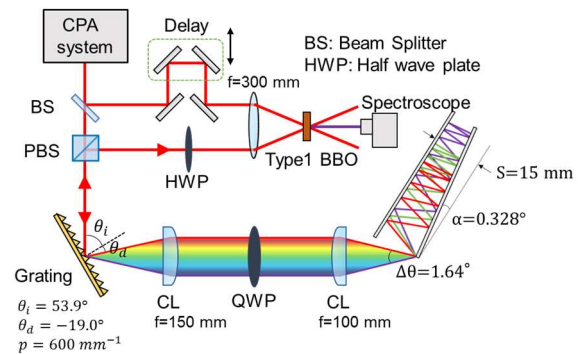


Fig. 4 Schematic setup of sum frequency generation to characterize the temporal profile of the pulse train.

あらかじめビームスプリッタで光路を分けた CPA システム出射パルスと FACED 出射パルスで和周波発生を行い、ディレイラインの光路長を変えながら和周波が発生する位置と箇所を調べることによって、パルスの数を確認した。得られた和周波のスペクトルを Fig. 5 に示す。

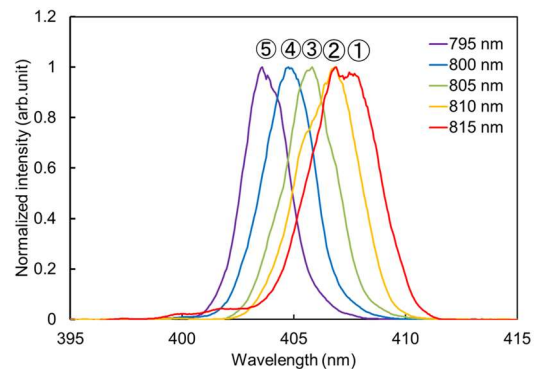


Fig. 5 Spectrum of sum frequency generation

Fig. 5 に示すスペクトル①～⑤は異なる 5 つのディレイラインの位置で計測されたものであり、これにより、5 つのパルスが生成されていることが確認できた。なお、和周波のスペクトル①～⑤は、Fig.

3 に示したスペクトルのピーク①～⑤をそれぞれ中心波長とするパルスによって発生されたものである。また、そのときのディレイラインの光路長差から FACED 出射パルスのパルス間隔を計算すると、パルス間隔は 100 ps であった。

4. SF-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. SF-STAMP 光学系の構築

本研究で構築した顕微光学系, SF-STAMP 光学系のセットアップを Fig. 6 に示す。

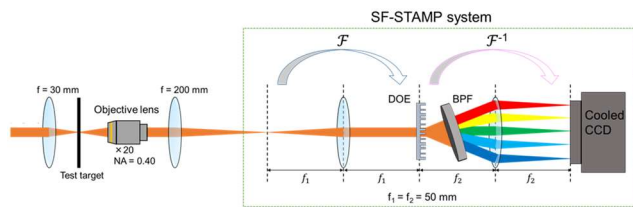


Fig. 6 Schematic setup of SF-STAMP system

SF-STAMP による 5 枚同時バースト撮影を実現するため、25 ビーム分岐 DOE (HOLOEYE, customized model), 大口径冷却 CCD (BITLAN, BU-55LN) を使用した。受光面のサイズは 24.0 mm × 36.1 mm, ピクセルサイズは 7.4 μm × 7.4 μm, 総ピクセル数は 4872 × 3248 である。サンプルの情報を含んだ波長掃引パルス列は、顕微光学系によって 20 倍までイメージが拡大された後, SF-STAMP 光学系の 1 枚目のレンズ ($f = 50$ mm) を伝搬し, DOE により $5 \times 5 = 25$ 個のアレイビームに複製され, 中心波長 830 nm, スペクトル幅 2.2 nm (FWHM) の BPF (IRIDIAN, ZX000167) で波長選択された後, 2 枚目のレンズ ($f = 50$ mm) により冷却 CCD の受光面上の異なる位置に結像する。波長掃引パルス列を照明光として用いた, SF-STAMP 光学系によるマルチスペクトラルイメージングの結果を Fig. 7 に示す。使

用した対物レンズは, OLYMPUS 社製, LMPLFLN20x ($\times 20$, $NA = 0.40$, $WD = 12.0$) である。

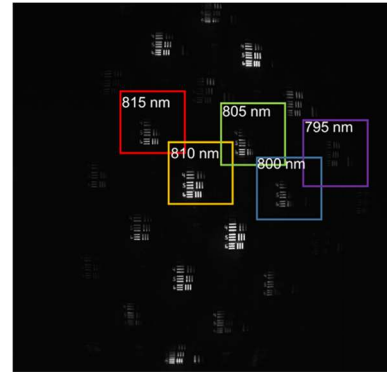


Fig. 7 A multispectral image captured by SF-STAMP system with spectrally sweeping pulse train

Fig. 7 のマルチスペクトラルイメージの内, 波長を示した 5 つのイメージが波長掃引パルス列の各パルスに対応しており, これらをシングルショットイメージングのフレームとして用いた。なお, それ以外のフレームのイメージでは時間情報が重複している, あるいは 1 つのイメージに異なる時間の情報が含まれているため, 本実験の構成においては意味を持たない。

4.2. シングルショットバーストイメージング

SF-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. 8 に示す。

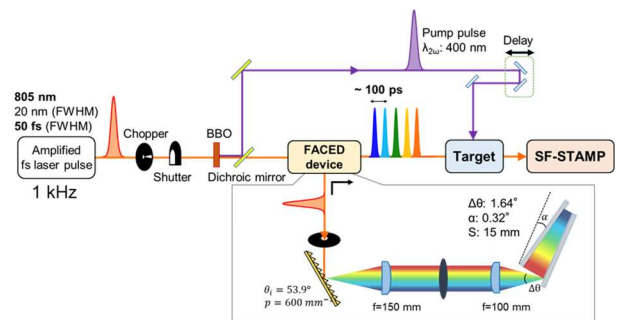


Fig. 8 Experimental setup of single-shot imaging by SF-STAMP

光源にはモードロック Ti:Sapphire レーザをチャープパルス増幅器 (CPA) により増幅したフェムト秒レーザパルス (中心波長 805 nm, スペクトル幅 20 nm, パルス幅 50 fs, 平均出力パワー 1.0 W, 繰り返し周波数 1 kHz) を用いた. CPA から出射された FTL パルスを BBO 結晶に入射させ, 発生した 2 倍波をポンプ光として使用した. 一方, BBO 結晶で 2 倍波に変換されずに透過したパルスを FACED へ入射させ, 生成した波長掃引パルス列を偏光ビームスプリッタと $\lambda/4$ 板を利用して取り出し, プロブ光として用いた. なお, シングルショット撮影のために光学チョップおよびシャッターをポンプ光とプロブ光に分離する手前に用いて単パルスを切り出した. SF-STAMP を用いて, 薄膜ガラス (厚さ 50 μm) 表面にポンプ光を集光させ, ガラス表面のアブレーション過程のシングルショット 5 コマ超高速撮影を行った. プロブ光には FACED で生成した 5 つの波長掃引パルス列を用い, 100 ps のフレーム間隔で, 撮影時間窓 400 ps にわたる計測を行った. Fig. 9 にガラス表面におけるアブレーション過程のシングルショット撮影をした結果を示す. なお, 結果に示した画像はいずれも変化前との差分を取り, コントラストを調整したものである. Fig. 9 では, ポンプ集光後からアブレーションプルームが時間とともに大きく膨らんでいく様子が 100 ps のフレーム間隔で 400 ps にわたって観測され, 撮

影時間窓の拡大が実現された.

5. 今後の展望

本研究では, ミラーの長さによる物理的な制限とイメージングに使用した光源の帯域による制限から, 実現された連写枚数は 5 枚であるが, SF-STAMP を用いたシングルショットイメージングでは最大連写撮影枚数は 25 枚が実現されている. 波長掃引パルス列を照明光として使用する手法では, 生成されるパルスの数が実現可能な連射枚数に対応するが, 本研究では, FACED に用いたミラーの長さが 25 発のパルスを生成する上で十分でないため, パルス数 5 発, 計測時間窓 400 ps に留まっている. 今後は, SF-STAMP の性能を最大限発揮するため, さらに長く (>15 cm), 高反射率なミラー対を FACED に使用し, 光源を中空ファイバで発生させた広帯域パルス (40 nm \sim) に変えることで, 最大連写枚数を大幅に増加し, 同時に計測時間窓のさらなる拡大も可能になる. FACED のパラメータの例として, $\Delta\theta=2.24^\circ$, $\alpha=0.089^\circ$, $S=15$ mm とすることで 25 フレームでのシングルショット撮影が達成される. また, 本研究で構築した, 波長掃引パルス列生成システムのフレーム間隔や計測時間窓の可変性をさらに活かすことで, 様々な時間スケールにおいて再現性の乏しい単発現象を解明していくことが期待される.

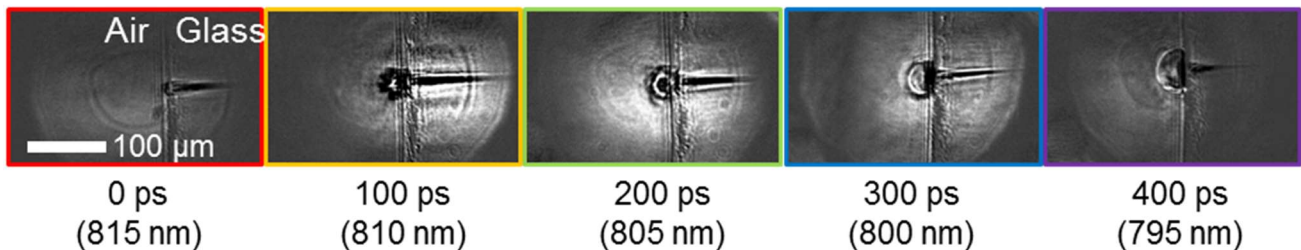


Fig. 9 Measured images of ablation on glass in a single shot by SF-STAMP with spectrally sweeping

6. まとめ

本研究では, 自由空間内におけるミラー対の多重反射を利用して時間伸張を行う FACED 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 SF-STAMP に組み合わせることによって, 撮影時間窓を 400 ps まで拡大することに成功した. 今後は, さらに広帯域な光源と長いミラーを組み合わせることで, 生成できるパルスを増やし, 25 フレームのシングルショット撮影を可能にし, 撮影時間窓を数ナノ秒まで拡大することを目標とする.

References

1. 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**, 695–700 (2014).
2. 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**, 30512 (2015).
3. 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).
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