

# codeV を用いた波長掃引パルス列の時空間特性評価

## 及びサブナノ秒領域シングルショット2次元バーストイメージング

### Spaciotemporal Characterization of spectrally sweeping burst pulses using codeV and single-shot 2-D burst imaging in subnanosecond region

根本 寛史 (M1), 鈴木 敬和 (D2), 山口 勇輝 (M2), 高澤 一輝(B4), 松下 一輝 (B4)  
Hirofumi Nemoto, Takakazu Suzuki, Yuki Yamaguchi, Kazuki Takasawa, Kazuki Matsushita

#### Abstract

We performed spatiotemporal characterization of spectrally sweeping burst pulses generated by FACED using codeV. We also realized ultrafast 2-D burst imaging with a 300 ps frame interval and a 2.7 ns time window by applying the burst pulses to SF-STAMP.

#### 1. はじめに

電子的高速カメラでは捉えられないナノ秒以下の時間領域で単発撮影を実現する手法として、STAMP [1]がある。STAMP法では線形周波数チャープパルスを照明光に用い、波長ごとにイメージセンサの異なる位置に結像することで、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。また、回折光学素子(DOE)と波長選択バンドパスフィルタ(BPF)によりスペクトラルイメージ分割を実現したSF-STAMP [2]により最大25枚の同時撮影が実現されている [3]。しかし、分散媒質の材料分散で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撮影時間窓は最大で70 ps程度である。本研究では、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) [4]により生成した中心波長の異なる遅延パルス列を照明光に用い、SF-STAMPの撮影時間窓を2.7 nsまで拡大し、シングルショット計測を行った。また、光線追跡シミュレーションを用いて、FACEDから出射したパルス列の時空間特性評価を行った。ただし、

Code Vでは有限のスペクトル幅をもったパルス伝播は取り扱うことができないので、CW光の波長を変化させて計算した。

#### 2. 波長掃引遅延パルス列の生成

本研究では、790 ~ 820 nmの帯域において300 ps間隔の遅延を持つパルスが10個生成されるように波長掃引遅延パルス列生成光学系の設計、構築を行った。構築したセットアップをFig. 1に示す。

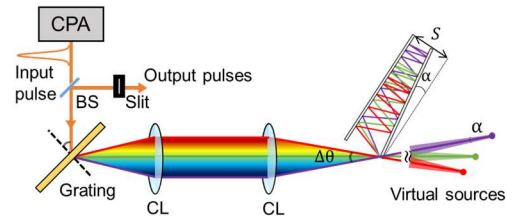


Fig.1 Schematic setup of spectrally sweeping pulse train generating system

回折格子を通過したレーザパルスは、ミラー対で多重反射した後、入射端に戻り出射される。ミラー対での反射回数は入射角に応じて変化するため、FACEDに入射したパルスは、波長によって異なる遅延を持ったパルス列となって出射される。ただし、往路と復路が完全に一致するのは入射角  $\theta$  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、その他の波長では光路は一致しない。FACEDから出射したパルスから照明光に使用する波長を制限するため、回折格子から180 mm離れた位置に4 mm開

口のスリットを配置した.FACED 入射前(CPA)のパルスと出射後のパルスのスペクトルを Fig. 2 に示す. Fig.2 において, スペクトルのピークが波長掃引遅延パルス列の各パルスの中心波長に対応する.

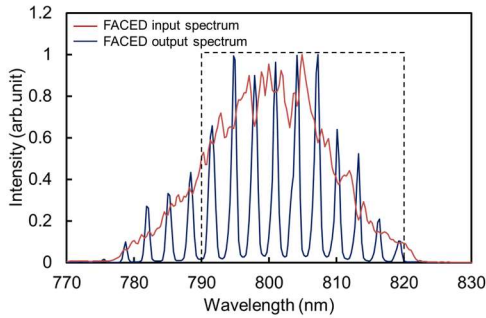


Fig. 2 Spectrum of FACED input pulse and output pulse

### 3. 波長掃引パルスの時空間特性評価

FACED 出射パルスは伝搬とともに空間的に分離するため, 光路長が波長ごとに異なり, サンプル面で時間的なずれが生じる. ミラー対での反射回数が同じ波長成分間での時間的なずれは SF-STAMP における各フレームの露光時間に対応する. 各波長に対して, FACED 入出射時の中心光線の位置のずれを求めた結果を Fig. 3 に示す. 位置のずれが 0 の波長が主光線に対応し, 橙色の点線内の波長は同一反射回数である.

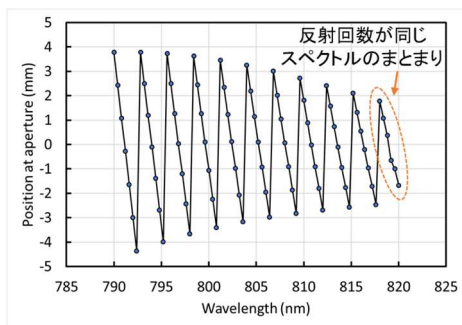


Fig.3 The position of the central ray

各波長成分の伝搬時間を Fig. 4 に示す. 同一反射回数の波長成分内での伝搬時間の差が各フレー

ムの露光時間を決める. ここで, Fig. 4 の橙色の点線内が同一反射回数の波長成分である.

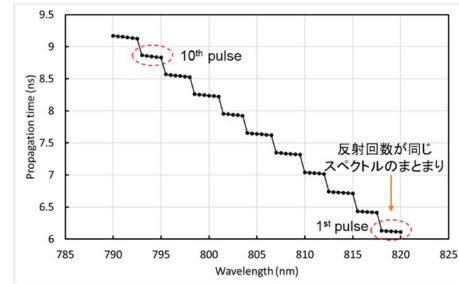


Fig.4 Propagation time for each wavelength

光線追跡の結果から, パルス間隔と露光時間を計算した結果を Table 1 に示す. ここで, ミラー対での反射回数が同じ波長のうち, 中心光線の位置ずれが  $\pm 2$  mm 以内の波長における伝搬時間の差を露光時間とした.

Pulse number	Pulse interval (ps)	Pulse duration (ps)	Exposure time (ps)
1 <sup>st</sup> pulse	301.0	18.4	18.4
5 <sup>th</sup> pulse	299.1	28.1	19.4
10 <sup>th</sup> pulse	296.1	34.5	16.8

Table 1 Pulse interval and Exposure time

## 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. 5 に示す.

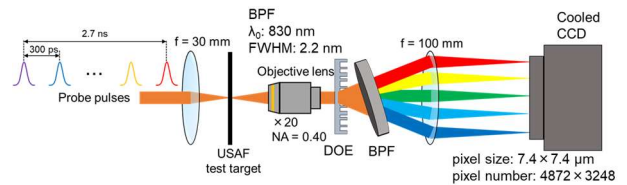


Fig. 5 Schematic view of experimental setup of SF-STAMP system

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拡大された後, DOE, BPF によって波長選択され, 冷却 CCD の受光面上の異なる位置

に結像する。マルチスペクトラルイメージングの結果を Fig. 6 に示す。①~⑩の 10 個のイメージが波長掃引パルス列の各パルスに対応し、これらを単発撮影のフレームとして用いた。それ以外のフレームのイメージでは番号を示したイメージのいずれかと時間情報が重複してしまっている。

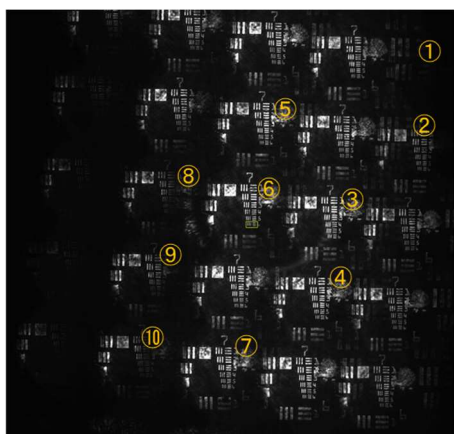


Fig. 6 A multi-spectral image captured by SF-STAMP system with spectrally sweeping pulse train

#### 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. 7 に示す。

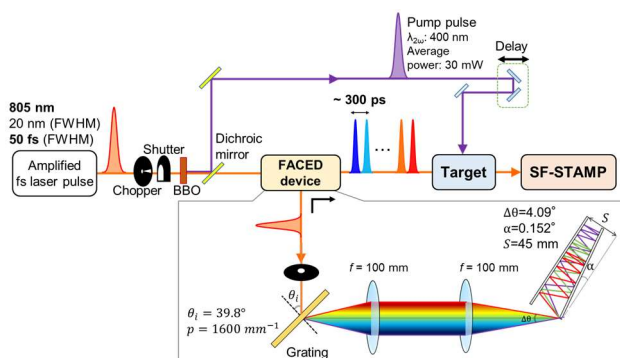


Fig. 7 Experimental setup of single shot imaging by SF-STAMP

光源には増幅した Ti:Sapphire レーザパルスを用い

た。ポンプ光にはその 2 倍波を使用し、プローブ光には生成した波長掃引パルス列を用いた。Fig. 8 (a) に薄膜ガラス表面におけるアブレーション過程をシングルショット撮影した結果を、Fig. 8 (b) に LiF 単結晶にフェムト秒レーザを集光し、発生した応力波ダイナミクスを 300 ps のフレーム間隔で 2.7 ns にわたって撮影した結果を示す。ここで、Fig. 8(a) は 20 倍、Fig. 8(b) は 50 倍に拡大したイメージある。

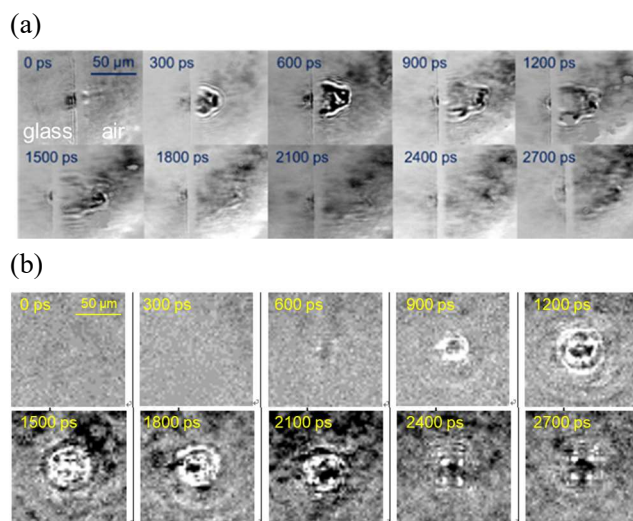


Fig. 8 Measured images of (a) ablation on glass, (b) crack propagation in LiF single crystal,

#### 5. 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 2.7 ns まで拡大することに成功した。また、光線追跡シミュレーションを用いて、FACED 出射パルスの時空間特性について評価を行った。

#### References

1. K. Nakagawa *et al.*, Nat. Photonics **8**, 695–700 (2014).
2. T. Suzuki *et al.*, Opt. Express **23**, 30512 (2015).

3. T. Suzuki et al., *Appl. Phys. Express* **10**, 92502 (2017).
4. J.-L. Wu et al., *Light Sci. Appl.* **6**, e16196 (2016).