

線形周波数チャープパルスを用いた多波長イメージの全光学式時空間分解撮影による

超高速 2次元バーストイメージング法の開発

Development of Ultrafast 2D-burst Imaging method by
Spatially and Temporally Resolved All-optical Wavelength-multiplexing (STRAW)
using Linearly Frequency-chirped Pulses

鈴木 敬和 (B4), 伊佐 文宏 (M1), 藤井 令央 (M2), 廣澤 賢一 (助教)

Takakazu Suzuki, Fumihito Isa, Leo Fujii and Kenichi Hirose

Abstract

We propose and experimentally demonstrate a method for all-optical ultrafast 2D-burst imaging which we call Spatially and Temporally Resolved All-optical Wavelength-multiplexing (STRAW) imaging. STRAW is composed of a diffractive optical element (DOE), a band-pass filter, and two Fourier transform lenses. Using a linearly frequency-chirped pulse and converting the time axis to the wavelength, we realize single-shot ultrafast burst imaging. As an experimental demonstration of STRAW, we monitor the dynamics of a plume generated during laser ablation using a linearly frequency-chirped broadband pulse (>100 nm) which is temporally stretched to ~ 40 ps.

1. はじめに

近年, 超高速撮影技術は, 衝撃波の伝搬 [1] やプラズマ物理 [2], 光化学 [3], レーザ加工 [4, 5], などにおける超高速現象の解明のために注目を集めている. 超高速現象を撮影する手法として, 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 [6-8]. しかし, この方法は繰り返し計測する必要がありレーザーアブレーション [9, 10] や相変化材料の相変化 [11] のような単発現象, 量子力学的な価電子の運動 [12] やブラウン運動などのランダムな現象をシングルショット撮影することができない. 一方で, 光電子管を用いて測定光の時

空間的な光強度変化を蛍光面上での輝度分布像に置換するストリークカメラ [13] は, サブピコ秒 ($\sim 10^{-13}$ s) オーダーの単発現象を撮影できるが得られる情報は1次元のみである. なお, 数フェムト秒の時間分解能をもつ X 線ストリークカメラ [14] や空間情報を測定光にエンコードした後に 2次元イメージを再構築するストリークカメラ [15, 16] も開発されている. ストリークカメラを用いた方法以外に周波数域の干渉を用いた 1次元の連続計測法 (時間分解能 ~ 30 fs) [17] や周波数チャープを時間軸にした THz 電界の 1次元イメージング法 (時間分解能 ~ 40 ps) [18] が報告されている. また, CCD や CMOS カメラなどの撮像素子による 2次元イメージの高速連続撮影は電氣的な速度の制限によりサブマイクロ秒 ($\sim 10^{-7}$ s) 程度が限界である [19].

この電氣的な撮影速度の限界を克服したのがパルスレーザと単一ピクセルフォトダイオードを利用した全光学連続イメージング法 STEAM (Serial Time-Encoded Amplified Microscopy) [20] である. STEAM では, レーザパルスの時間幅で露光時間が, 繰り返し周波数でフレームレートが決定される. これによりナノ秒 ($\sim 10^{-9}$ s) オーダーの 2次元イメージの連続撮影が可能になった. さらに, 超高速現象を撮影するために考案されたのが STAMP (Sequentially Timed All-optical Mapping Photography) [21] である. STAMP では, フラッシュ光として線

形周波数チャープパルスを利用し、この 1 パルス内の波長分散に遅延時間を対応させ、各波長成分に含まれる 2 次元画像情報を時空間的に分解することで、2 次元のシングルショットコマ撮り撮影をサブピコ秒の時間分解能で実現している。実際に、レーザアブレーションとフォノンの伝搬における高速現象をそれぞれ平均フレーム間隔 15.3 ps と 229 fs で撮影した結果が報告されている。しかし、空間分解用の特殊なペリスコープが必要であり、その物理的制限により最大コマ数が現状では 6 個に制限されている(原理的に増加は可能)。

STAMP の同時撮影枚数の増加を実現するために別の手法による波長成分の空間分解が望まれる。そこで我々が注目したのが超短パルス波形のシングルショット計測法 STRIPED FISH (Spatially and Temporally Resolved Intensity and Phase Evaluation Device: Full Information from a Single Hologram) [22-24] である。STRIPED FISH は回折光学素子 (DOE : Diffractive Optical Element) と波長選択フィルタ (BPF : Band-Pass Filter) を用いた簡単な光学系から構成され、空間的に波長分解された多数 (現在では 40 個) のデジタルホログラムを計測し再構築することで、超短パルス波形の完全な時間および 2 次元空間の 3 次元情報 $E(x,y,t)$ が得られる。従来の時空間特性の計測法 [25-27] では同時に 3 次元情報の取得が不可能であったが、STRIPED FISH では 3 次元情報のシングルショット同時計測が可能なので増幅器後の不安定な高強度パルスや低繰り返しパルスの時空間特性計測への応用が可能である。実際に、空間チャープの付加したパルス [22] やチャープパルス同士を異なる遅延時間および角度で干渉させたときに生じるビート [24] の複雑な時空間特性を計測している。

我々が知る限り、STRIPED FISH はビーム計測以外には用いられていない。そこで、本研究では DOE と BPF を利用し波長成分の空間分解を実現する

STRIPED FISH のアイデアを 2 次元多波長イメージの同時計測に応用した。さらに線形周波数チャープパルスの波長分散に遅延時間を対応させる STAMP の原理を組み合わせることで、STAMP とは異なる手法で波長成分の空間分解を実現し、新たなシングルショット 2 次元バーストイメージング法である多波長イメージの全光学式時空間分解イメージング STRAW (Spatially and Temporally Resolved All-optical Wavelength-multiplexing) imaging を開発した。STRAW による超高速イメージングの原理実証として、ガラスのレーザアブレーションの際に生じる超高速現象のダイナミクスを撮影した。

2. STRAW の原理

2.1. 波長成分の時空間分解

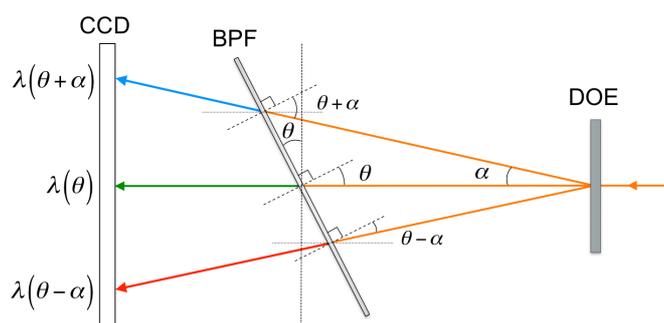


Fig. 1 Schematic of spatially and temporally resolving by DOE and BPF

DOE と BPF による波長の時空間分解の概念図を Fig. 1 に示す。まず、DOE に入射したビームは回折広がり角 α で広がる分岐ビーム (アレイビーム) になる。つまり、入射ビームは DOE により複数のアレイビームに複製され、空間的に分解される。この部分が STAMP における空間分解 (ペリスコープアレイ) 部分に対応する。したがって、DOE から発生するアレイビームの数が実現可能なコマ数に対応する。なお、本研究では、原理実証のために $2 \times 2 = 4$ 個のアレイビームを発生する DOE を用いた。

回折しない 0 次光も利用できるため、今回の場合、実現されるコマ撮り枚数は 5 コマとなる。

次に、DOE から分岐するアレイビームは BPF により波長選択が行われる。BPF はビームの入射角 θ に依存して Eq. (1) のように透過波長 $\lambda(\theta)$ が変化する [28]. (ただし、 λ_0 : BPF の中心波長, n_{eff} : 有効屈折率)

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n_{\text{eff}}} \right)^2} \quad (1)$$

この性質により BPF を回転させ入射角 θ を変化させることで波長選択が可能となる。さらに DOE から発生するアレイビームは広がり角 α で伝搬していくので、 θ 傾けて配置した BPF に入射するアレイビームの両端の入射角はそれぞれ、 $\theta - \alpha$ 、 $\theta + \alpha$ となる。これにより 0 次光 $\lambda(\theta)$ を中心に長波長 $\lambda(\theta - \alpha)$ 、短波長 $\lambda(\theta + \alpha)$ の波長選択が実現される。よって、DOE と BPF を組み合わせることで長波長端 $\lambda(\theta - \alpha)$ から短波長端 $\lambda(\theta + \alpha)$ の範囲内でアレイビームは異なる波長に選択される。したがって、入射ビームに線形周波数チャープパルスを用いた場合、BPF による波長選択が STAMP における時間分解 (波形整形器による超短光パルス列整形) 部分に対応する。以上のように DOE と BPF を組み合わせることでチャープパルス内の遅延時間の異なる波長成分を時間・空間的に分解することが可能となる。

2.2. 多波長成分の同時イメージング

STRAW の概念図を Fig. 2 に示す。STRAW 光学系は、2 枚のレンズ、DOE、BPF から構成される $4f$ 結像光学系である。STRIPED FISH 同様にホログラフィック干渉計測をすることで振幅画像に加え位相画像も得られる利点があるが、CCD で計測されるホログラムの分解能の問題で振幅イメージのみを計測する場合は、アナログ的に光学的フーリエ変

換を用いた方が分解能に優れている。したがって、STRAW では $4f$ 結像光学系により受動的に光フーリエ変換が行われ Image 面に直接像が形成される。そのため、ホログラムのように像の再構築計算や参照光を必要としないので STRIPED FISH よりも簡単な構成となる。

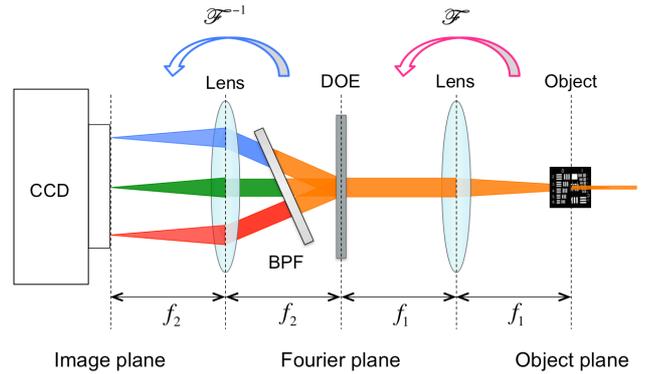


Fig. 2 Schematic setup of STRAW

Object 面のイメージが 1 枚目のレンズ (焦点距離 f_1) で光学的にフーリエ変換され、DOE を配置する面がフーリエ面になる。その後、DOE で複製されたアレイビームは傾けて配置した BPF に異なる角度で入射することで波長選択が行われ 2 枚目のレンズ (焦点距離 f_2) によって光学的に逆フーリエ変換される。よって、Image 面に配置した CCD の受光面上に空間的に分散した 2 次元の多波長イメージが同時に結像される。したがって、STAMP 同様に、フラッシュ光に線形周波数チャープパルスを用いることで、CCD 面上で結像される多波長イメージは時間差の付いた画像となり、フラッシュ光 1 パルスが BPF で選択される長波長端から短波長端までの波長帯域幅 $\Delta\lambda_{\text{window}} = \lambda(\theta - \alpha) - \lambda(\theta + \alpha)$ に対応する時間幅 ΔT を計測時間窓とするシングルショット超高速バースト撮影が実現される。

2.3. 時間分解能

STRAW の時間分解能は、STAMP 同様の設計 [29] が可能である。Fig. 3 に STRAW で分解される各波長成分の波長幅と時間幅の対応関係を示す。

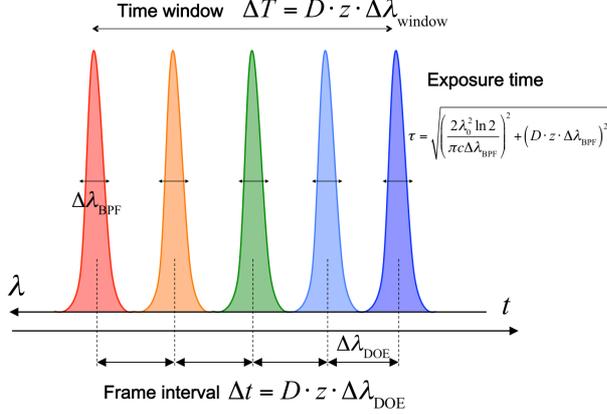


Fig. 3 Principle of STRAW's time resolution

STRAW の 1 ショットで得られる波長帯域幅を $\Delta\lambda_{\text{window}}$ 、BPF で波長選択されるスペクトル幅を $\Delta\lambda_{\text{BPF}}$ 、波長選択された各波長間の波長幅を $\Delta\lambda_{\text{DOE}}$ とすると、計測時間窓 ΔT は Eq. (2) で表現される。

$$\Delta T = D \cdot z \cdot \Delta\lambda_{\text{window}} \quad (2)$$

ただし、 D (ps/km·nm) は分散パラメータ、 z (km) は分散媒質の長さである。したがって、計測時間窓は、フラッシュ光に付加する線形周波数チャープ量 (2次分散量) $D \cdot z$ (ps/nm) により可変となる。

また、各波長イメージの露光時間 τ は Eq. (3) で表現される。

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{2\lambda_0^2 \ln 2}{\pi c \Delta\lambda_{\text{BPF}}}\right)^2 + (D \cdot z \cdot \Delta\lambda_{\text{BPF}})^2} \quad (3)$$

なお、 λ_0 は光源の中心波長、 c は真空中における光速である。フレーム間隔 Δt は、各波長間の遅延時間で決定され Eq. (4) のようになる。

$$\Delta t = D \cdot z \cdot \Delta\lambda_{\text{DOE}} \quad (4)$$

3. 実験セットアップ

STRAW の実験セットアップを Fig. 4 に示す。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ーパルス (中心波長 800 nm, スペクトル幅 20 nm, パルス幅 50 fs, 平均出力パワー 340 mW, 繰り返し周波数 1 kHz) を用いた。広帯域パルスを得るために、集光レンズ ($f=400$ mm) で Ar ガス封入中空ファイバ (ファイバ長 400 mm, コア径 126 μm) に入射させ、自己位相変調により広帯域化 (>200 nm) させた。その後、光学ガラス (N-SF10 ($D_{\text{N-SF10}} = -468.9$ ps/km·nm), BK7 ($D_{\text{BK7}} = -149$ ps/km·nm)) を用いて線形周波数チャープを与え、パルス幅を ~ 60 ps まで伸張し、プローブ光として利用した。また、アブレーションを起こすためのポンプ光には中空ファイバの手前で分けた CPA から出射される FTL パルスを使用した。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ーブ光に分ける手前に用いて単パルスを切り出した。

STRAW 光学系では、サンプルの情報を含んだ線形周波数チャープパルス (プローブ光) が 1 枚目のレンズ ($f=75$ mm) を伝搬し、DOE (HOLOEYE, DE-225) により $2 \times 2 + 1 = 5$ 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 ($f=75$ mm) により冷却 CCD の受光面上の異なる位置に 5 波長イメージが結像される。冷却 CCD (BITLAN, BS-42N) の受光面のサイズは 15.16 mm \times 15.16 mm, ピクセルサイズは 7.4 μm \times 7.4 μm , 総ピクセル数は 2048 \times 2048 である。

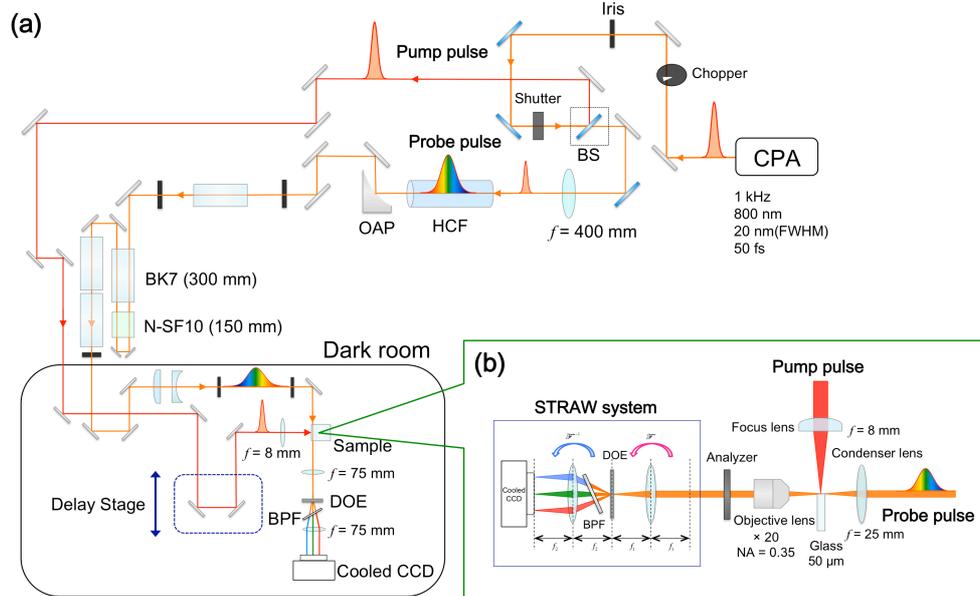


Fig. 4 (a) Experimental setup of STRAW imaging (BS: beam splitter, HCF: hollow-core fiber filled with Ar-gas, OAP: off-axis parabolic mirror, DOE: diffractive optical element, BPF: band-pass filter) and (b) Experimental setup of the microscopic STRAW system for observation of the ultrafast laser ablation dynamics

まず、STRAW 光学系の Object 面に USAF テストターゲットを配置したときの静止像におけるシングルショット多波長同時撮影の結果を Fig. 5(a)に、このときの各波長イメージのスペクトル特性を Fig. 5(b)に示す。各波長イメージは 20 nm の帯域内で約 5 nm 間隔で分割されており、450 × 450 ピクセルを占めた。さらに、BPF を回転させてアレイビーム

の入射角を変化させることで透過波長も変化する。したがって、繰り返し計測になるが、BPF による波長選択範囲内 (730 nm ~ 830 nm) において 5 フレーム分のシングルショット撮影ができる。つまり、BPF の走査により $\Delta\lambda_{\text{window}} = 100 \text{ nm}$ に対応する計測時間窓での撮影が可能となる。Fig. 6 に 5 フレーム内の各波長イメージのスペクトル特性を示す。

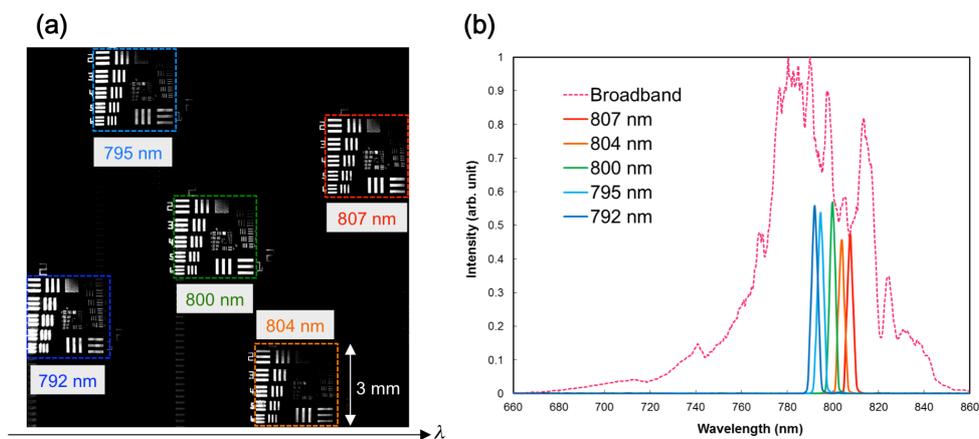


Fig. 5 (a) Wavelength-multiplexed image (from 792 to 807 nm) and (b) wavelength-multiplexed image's spectral properties

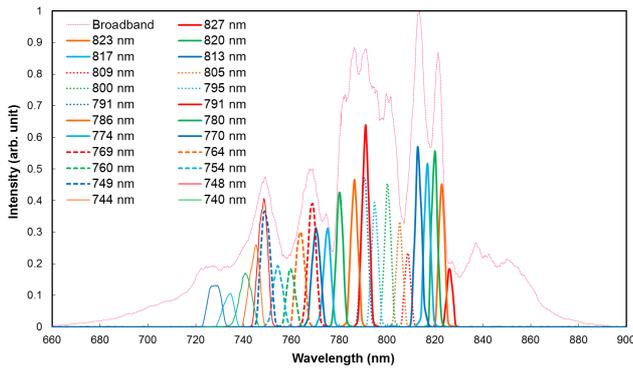


Fig. 6 Spectral properties of five image frames at different BPF rotation angles

4. 実験結果

STRAW による超高速イメージングの原理実証を行うために、薄膜ガラス (厚さ 50 μm) 表面にポンプ光を集光させ、レーザアブレーションの際に起こる超高速ダイナミクスを撮影した。プローブ光の広帯域パルスには光学ガラス (N-SF10 ($z = 300$ mm), BK7 ($z = 1500$ mm)) を伝搬させることで $D \cdot z = 0.36$ (ps/nm) の線形チャープを加えた。したがって、Eq. (2)よりシングルショット ($\Delta\lambda_{\text{window}} = 20$ nm) 撮影での時間窓の計算値は 7.2 ps, 5 フレーム ($\Delta\lambda_{\text{window}} = 100$ nm) 撮影での時

間窓は 36.0 ps となる。また、アブレーションのダイナミクスを撮影するために Fig. 5 (b) に示す顕微光学系を組み、STRAW 光学系の Object 面に拡大したイメージを転写した。

Fig. 7 にアブレーションルームが形成される瞬間をシングルショット撮影した結果を示す。このとき、計測時間窓 $\Delta T = 7.2$ ps, フレーム間隔 $\Delta t = 1.8$ ps (フレームレート 0.55 Tfps), 露光時間 $\tau = 900$ fs, 各波長イメージは 400×260 ピクセルである。さらに、BPF を回転させることで撮影した 5 フレーム分 (計測時間窓 $\Delta T = 36.0$ ps, 各波長イメージ 285×285 ピクセル) の結果を Fig. 8 に示す。

また、プローブ光に加える線形チャープ量を $D \cdot z = 0.14$ (ps/nm) に変えて撮影したときの結果を Fig. 9 に示す。このとき、シングルショット撮影での時間分解能は、計測時間窓 $\Delta T = 2.8$ ps, フレーム間隔 $\Delta t = 700$ fs (フレームレート 1.43 Tfps), 露光時間 $\tau = 527$ fs である。以上より、分散量を変化させることで計測時間窓が可変であることが実証された。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。

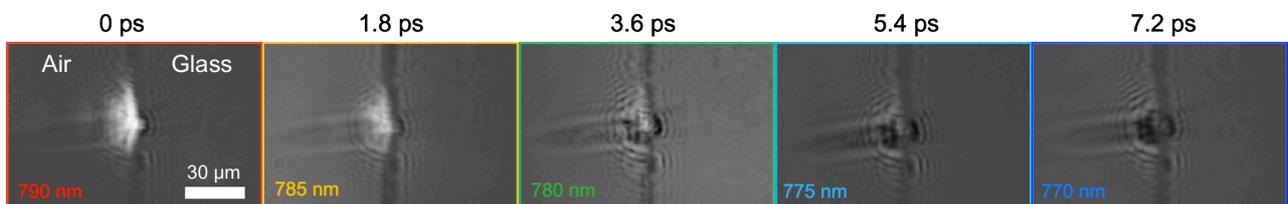


Fig. 7 Measured images of generation of ablation plume in a single-shot by STRAW. In a single-shot time window (7.2 ps), an ablation plume on air-glass surface was generated by a pump pulse. Air's breakdown was also captured in all frames. Each image has 400×260 pixels.

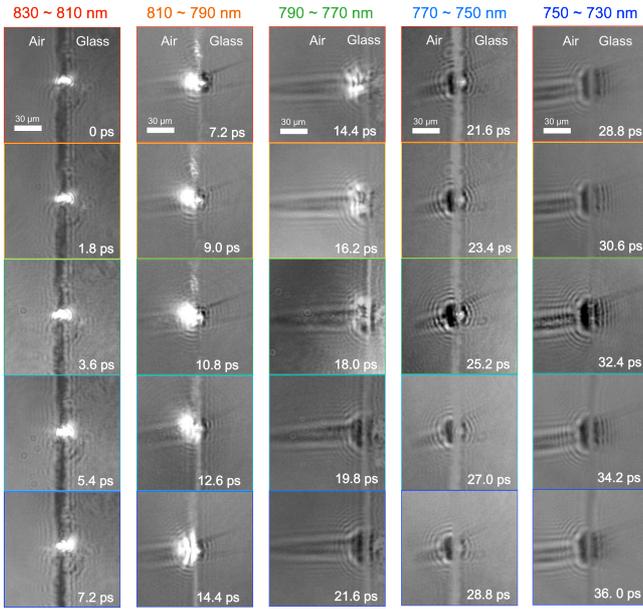


Fig. 8 Measured images of generation of ablation plume in 5-shots by STRAW. By rotating BPF, we monitored ablation dynamics in time window of 36.0 ps.

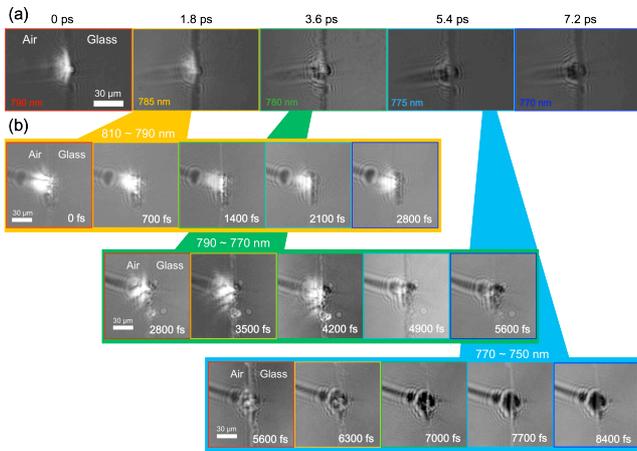


Fig. 9 Measured STRAW images of generation of ablation plume in a different time window: (a) single-shot images with 1.8 ps frame interval; (b) single-shot images with 700 fs frame intervals; images in (b) are captured more faster phenomena than (a).

5. 撮影コマ数増加の設計

本研究では、STRAW による超高速バーストイメージングの原理実証のために、5 個のアレイビームに分岐する DOE を使用したので実現される撮影コマ数は 5 枚である。しかし、STAMP の撮影コマ数を決定するペリスコープアレイの数を増やすことと比較すると DOE から分岐するビーム数を増加することは容易である。したがって、連続撮影枚数を増加する設計の指針を示す。本実験で使用した DOE の回折広がり角 α は、約 5.1° であり、STRAW の 1 ショットで選択可能な波長帯域幅は ~ 20 nm である。また、現在使用している CCD カメラよりも大口径なカメラを用いることで $\alpha \sim 13.5^\circ$ の広がり角のビームも受光面に入射することが可能となり、波長帯域幅は ~ 50 nm 程度まで拡大可能となる。例えば、 $\alpha \sim 13.5^\circ$ を有し、 $5 \times 5 = 25$ 個のアレイビームに分岐するような DOE を利用することで、撮影コマ数 25 枚が実現可能である。なお、STRAW では、分岐数の多い DOE を用いることでビーム数を容易に増加することができるが、DOE でビームを複製した後に BPF で波長選択を行うためにビームパワーの損失が多い欠点や、カメラの受光面のサイズとの兼ね合いから撮影コマ数は ~ 30 枚程度が実現可能と考えられる。

6. まとめ

本研究では、光源に線形チャープパルスを利用することで多波長イメージの全光学式時空間分解 STRAW (Spatially and Temporally Resolved All-optical Wavelength-multiplexing) によるシングルショット超高速 2 次元バーストイメージングの開発および原理実証を行った。STRAW の 1 ショットで実現可能な撮影コマ数は DOE から分岐するアレイビームの数で決定される。したがって、今回用いた DOE よりも広がり角が大きく、ビーム数の多い DOE および大口径 CCD カメラを用いることでコマ数の増加が可能となる。原理的に、利用できる

波長帯域幅 ~50 nm, 撮影コマ数 ~30 枚程度が実現可能である。また, 計測時間窓はプローブ光に付加する線形周波数チャープ量によって可変であるため, 撮影対象に合わせてサブピコ秒 (10^{-13} s) からサブナノ秒 (10^{-10} s) 程度の調整が可能である。また, STRAW 光学系は 4f 結像光学系がベースになっているため Object 面に像を転写することで, 本実験で行った透過光の強度イメージング以外に位相差顕微イメージングなど他のイメージング法とのアレンジが可能である。

References

1. M. Sakakura, M. Terazima, Y. Shimotsuma, K. Miura, and K. Hirao, "Observation of pressure wave generated by focusing a femtosecond laser pulse inside a glass," *Opt. Express* **15**, 5674-5686 (2007).
2. R. Kodama, P. A. Norreys, K. Mima, A. E. Dangor, R. G. Evans, H. Fujita, Y. Kitagawa, K. Krushelnick, T. Miyakoshi, N. Miyanaga, T. Norimatsu, S. J. Rose, T. Shozaki, K. Shigemori, A. Sunahara, M. Tampo, K. A. Tanaka, Y. Toyama, T. Yamanaka, and M. Zepf, "Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition," *Nature* **412**, 798-802 (2001).
3. P. Hockett, C. Z. Bisgaard, O. J. Clarkin, and A. Stolow, "Time-resolved imaging of purely valence-electron dynamics during a chemical reaction," *Nat. Phys.* **7**, 612-615 (2011).
4. R. R. Gattass and E. Mazur, "Femtosecond laser micromachining in transparent materials," *Nat. Photonics* **2**, 219-225 (2008).
5. M. Sakakura and M. Terazima, "Initial temporal and spatial changes of the refractive index induced by focused femtosecond pulsed laser irradiation inside a glass," *Phys. Rev. B* **71**, 024113 (2005).
6. M. C. Downer, R. L. Fork, and C. V. Shank, "Femtosecond imaging of melting and evaporation at a photoexcited silicon surface," *J. Opt. Soc. Am. B* **2**, 595-599 (1985).
7. M. Domke, S. Rapp, M. Schmidt, and H. P. Huber, "Ultrafast pump-probe microscopy with high temporal dynamic range," *Opt. Express* **20**, 10330-10338 (2012).
8. C. Unger, J. Koch, L. Overmeyer, and B. N. Chichkov, "Time-resolved studies of femtosecond-laser induced melt dynamics," *Opt. Express* **20**, 24864-24872 (2012).
9. X. Mao, S. S. Mao, and R. E. Russo, "Imaging femtosecond laser-induced electronic excitation in glass," *Appl. Phys. Lett.* **82**, 697-699 (2003).
10. W. Hu, Y. C. Shin, and G. King, "Early-stage plasma dynamics with air ionization during ultrashort laser ablation of metal," *Phys. Plasmas* **18**, 093302 (2011).
11. J. Takeda, W. Oba, Y. Minami, T. Saiki and I. Katayama, "Ultrafast crystalline-to-amorphous phase transition in $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ chalcogenide alloy thin film using single-shot imaging spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.* **104**, 261903 (2014).
12. E. Goulielmakis, Z. Loh, A. Wirth, R. Santra, N. Rohringer, V. S. Yakovlev, S. Zherebtsov, T. Pfeifer, A. M. Azzeer, M. F. Kling, S. R. Leone, and F. Krausz, "Real-time observation of valence electron motion," *Nature* **466**, 739-743 (2010).
13. Hamamatsu Photonics K.K., "Guide to Streak Cameras" (Hamamatsu Photonics K.K., 2008), https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/e_streakh.pdf
14. U. Fröhling, M. Wieland, M. Gensch, T. Gebert, B. Schütte, M. Krikunova, R. Kalms, F. Budzyn, O. Grimm, J. Rossbach, E. Plönjes, and M. Drescher,

- “Single-shot terahertz-field-driven X-ray streak camera,” *Nat. Photonics* **3**, 523-528 (2009).
15. H. Shiraga, M. Nakasuji, M. Heya, N. Miyanaga, H. Shiraga, M. Nakasuji, M. Heya and N. Miyanaga, “Two-dimensional sampling-image x-ray streak camera for ultrafast imaging of inertial confinement fusion plasmas,” *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 620-623 (1999).
 16. 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).
 17. N. H. Matlis, S. Reed, S. S. Bulanov, V. Chvykov, G. Kalintchenko, T. Matsuoka, P. Rousseau, V. Yanovsky, A. Maksimchuk, S. Kalmykov, G. Shvets and M. C. Downer, “Snapshots of laser wakefields,” *Nat. Phys.* **2**, 749-753 (2006).
 18. Z. Jiang and X.-C. Zhang, “Single-shot spatiotemporal terahertz field imaging,” *Opt. Lett.* **23**, 1114-1116 (1998).
 19. T. G. Etoh, C. Vo Le, Y. Hashishin, N. Otsuka, K. Takehara, H. Ohtake, T. Hayashida, and H. Maruyama, “Evolution of Ultra-High-Speed CCD Imagers,” *Plasma Fusion Res.* **2**, S1021 (2007).
 20. K. Goda, K. K. Tsia, and B. Jalali, “Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena,” *Nature* **458**, 1145-1150 (2009).
 21. 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).
 22. P. Gabolde and R. Trebino, “Single-shot measurement of the full spatio-temporal field of ultrashort pulses with multi-spectral digital holography,” *Opt. Express* **14**, 11460-11467 (2006).
 23. P. Gabolde and R. Trebino, “Single-frame measurement of the complete spatiotemporal intensity and phase of ultrashort laser pulses using wavelength-multiplexed digital holography,” *J. Opt. Soc. Am. B* **25**, A25-A33 (2008).
 24. Z. Guang, M. Rhodes, M. Davis and R. Trebino, “Complete characterization of a spatiotemporally complex pulse by an improved single-frame pulse-measurement technique,” *J. Opt. Soc. Am. B* **31**, 2736-2743 (2014).
 25. T. Tanabe, H. Tanabe, Y. Teramura, and F. Kannari, “Spatiotemporal measurements based on spatial spectral interferometry for ultrashort optical pulses shaped by a Fourier pulse shaper,” *J. Opt. Soc. Am. B* **19**, 2795-2802 (2002).
 26. S. Akturk, M. Kimmel, P. O’Shea, and R. Trebino, “Measuring spatial chirp in ultrashort pulses using single-shot Frequency-Resolved Optical Gating,” *Opt. Express* **11**, 68-78 (2003).
 27. S. Akturk, M. Kimmel, P. O’Shea, and R. Trebino, “Measuring pulse-front tilt in ultrashort pulses using GRENOUILLE,” *Opt. Express* **11**, 491-501 (2003).
 28. IDEX Optics & Photonics, “How to Select a Filter”, https://marketplace.idexop.com/store/SupportDocuments/TN_HTB_Filters.pdf
 29. M. Tamamitsu, K. Nakagawa, R. Horisaki, A. Iwasaki, Y. Oishi, A. Tsukamoto, F. Kannari, I. Sakuma, and K. Goda, “Design for sequentially timed all-optical mapping photography with optimum temporal performance,” *Opt. Lett.* **40**, 633-636 (2015).