

# SF-STAMP を用いたテラヘルツ領域シングルショット 2 次元超高速バーストイメージング

## Single-shot 2D burst ultrafast imaging in terahertz region utilizing SF-STAMP

山口 勇輝 (M2), 鈴木 敬和 (D1), 根本 寛史 (M1), 高澤 一輝 (B4), 松下一輝(B4)

Yuki Yamaguchi, Takakazu Suzuki, Hirofumi Nemoto, Kazuki Takasawa, Kazuki Matsushita

### Abstract

In this research, we are aiming at development of THz-wave single shot two-dimensional ultrafast imaging method by combining conventional THz wave EO sampling method with a SF-STAMP (Sequentially Timed All-optical Mapping Photography utilizing Spectral Filtering). We monitored a GaAs wafer pumped by ultrafast laser pulse and captured spatiotemporal change in carrier density.

### 1. はじめに

従来の EO サンプリングを用いた THz 波イメージング法[1, 2]では, シングルショットで 2 次元イメージを得ることはできても, さらに時間変化情報またはスペクトル情報を得るためには機械的な遅延時間掃引と繰り返し計測が不可欠であった. そのため, THz 波イメージングは医療, 安全, 品質検査など, 多岐にわたる応用が見込まれているが, 計測対象は静的な対象または再現性のある動的な対象に限られてきた.

一方, 我々が近赤外波長のフェムト秒パルスを使って開発してきた超高速 2 次元連写撮像法 STAMP(Sequentially Timed All-optical Mapping Photography)[3]では, 線形周波数チャープパルスを探光として用い, 対象を撮像した後, 回折格子あるいはバンドパスフィルタによって波長成分ごとに分離し, それぞれをカメラに結像させることでシングルショット 2 次元高速連写撮影を実現し

ている.

本研究では, 従来の THz 波イメージング法である EO サンプリングと SF-STAMP (STAMP utilizing Spectral Filtering)[4]を組み合わせ, THz 領域でのシングルショット 2 次元超高速イメージング法を開発することを目的にしている. THz 領域超高速イメージング法では, THz 波によって撮影した像を EO 効果によりチャーププローブパルスの偏光の変化に変換することで THz イメージングと SF-STAMP を結合させた. 今回は, 計測対象に GaAs ウェハを使い, ポンプ光をウェハの面に対して角度をつけて入射することで空間的にフォトキャリア生成開始時間の差を作り, 本撮像システムの原理実証を行った.

### 2. 実験セットアップ

#### 2.1 THz-STAMP 実験系

Fig.1 に THz-STAMP の実験セットアップを示す. CPA から出射されたフェムト秒パルスは THz 波発生用パルス, キャリア生成のためののポンパルス, STAMP 用のプローブパルスの 3 つに分離される. THz 波は LN 結晶を用いた波面傾斜法[5]で発生させた. 2.4 ps 以上の現象を見るために THz 波は時間幅を広げるようマルチサイクル化させる必要があり, ビームスプリッタを用いて THz 波発生用パルスをダブルパルス化した. こうして発生したマルチサイクル THz 波の時間波形を Fig.2 に示す.

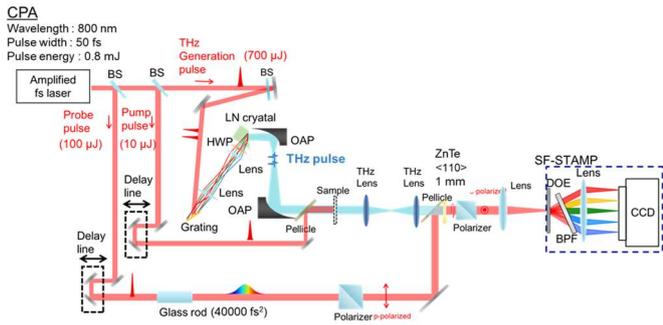


Fig.1 THz-STAMP の実験系

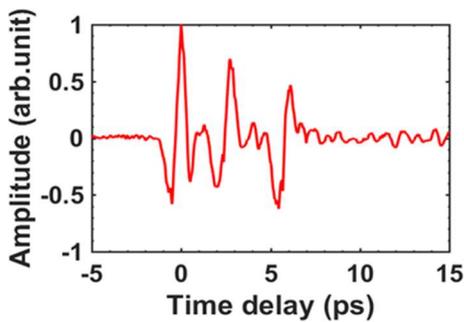


Fig.2 マルチサイクル THz 波形

チャーププローブパルスは EO 結晶である ZnTe に入射し、サンプルの像が転写される。クロスニコルセットアップにおける 2 次元 EO 効果により THz 波の像が偏光回転からさらにプローブパルス光強度に変換され、SF-STAMP 光学系によって波長分離、結像される。

## 2.2 フォトキャリア生成のイメージング実験

シングルショットイメージングの実験として、フォトキャリアの生成による GaAs ウェハの THz 波透過の時間変化を撮影した。しかし、本資料はキャリア寿命が 500 ps 以上あるためキャリア再結合の様子は撮れないので、Fig.2 のように GaAs に対して垂直に THz 波を、角度をつけてポンプ光を斜めに入射し、視野の両端でポンプ光の到着時間の差を作ることでキャリアが生成開始される時間に空間的にずれが生じ、時間が経つにつれてキャリアが生

成している範囲が増える様子を捉えることにした。キャリア生成の時間差は  $\theta=5^\circ$  では視野の範囲内(8 mm)で 2.3 ps となる。

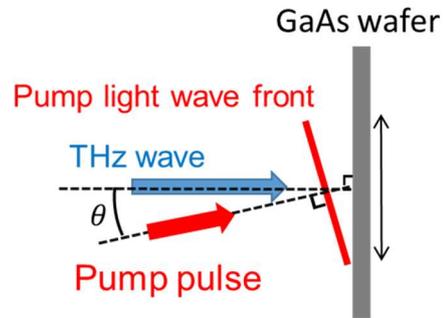


Fig.3 サンプル付近の THz 波とポンプの関係

## 3. 実験結果

### 3.1 シングルショットイメージング

GaAs をサンプルとしてシングルショットチャープパルス EO イメージを SF-STAMP によって取得した結果を Fig.4 に示す。

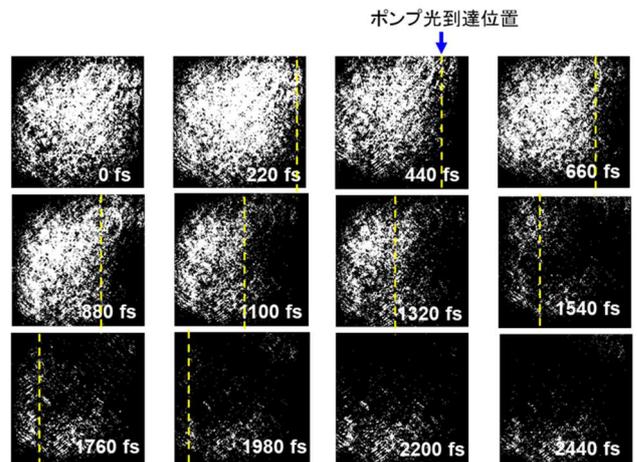


Fig.4 GaAs におけるフォトキャリア生成の時刻が、右から左に移動していく様子を計測したイメージング

図中の黄色の点線はポンプパルスの到達位置を表している。EO イメージは右側から左側に向かって徐々に暗くなっており、キャリアの生成した領域で THz 波が吸収されていることを示している。また、EO イメージはポンプパルスが視野の端に到達している 2.44 ps の時点では完全に暗くなっている。これより、THz-STAMP により THz 波で撮影された超高速現象の時間分解イメージをシングルショット 2 次元計測できることが実証された。

本実験の THz-STAMP の時間特性は本実験の条件においてはフレーム間隔 220 fs, 露光時間 0.8 ps, 時間窓 2.44 ps である。

今回の実験ではサンプルとして欠陥の無い GaAs を用いたが、空間的に注入濃度を変化させてイオン注入した GaAs をサンプルとして用いることで、キャリア寿命分布による欠陥密度分布をイメージング出来ると考えられる。

#### 4. まとめ

我々はテラヘルツ波を用いて GaAs のフォトキャリア生成の様子を捉え、チャープパルス EO サンプルリングと SF-STAMP を結合することで、テラヘルツ領域におけるシングルショット 2 次元超高速イメージングを実証した。本実験においてはフレーム間隔 220 fs, 露光時間 0.8 ps, 時間窓 2.44 ps である。

#### 5. References

1. X. Wang, Y. Cui, W. Sun, J. Ye, and Y. Zhang, "Terahertz real-time imaging with balanced electro-optic detection," *Opt. Commun.* **283**, 4626–4632 (2010).
2. Zhiping Jiang and Xi-Cheng Zhang, "Measurement of spatio-temporal terahertz field distribution by using chirped pulse technology," *IEEE J. Quantum Electron.* **36**, 1214–1222 (2000).
3. 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).
4. 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**, 30512–30522 (2015).
5. H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka, "Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO<sub>3</sub>," *Appl. Phys. Lett.* **98**, 91106 (2011).