

## 線集光型実時間テラヘルツ時間領域分光イメージング法の特性評価

### Basic performance of real-time terahertz time-domain spectroscopic imaging using line focusing of terahertz beam

○安井武史, 澤中健一, 荒木勉

○Takeshi Yasui, Ken-ichi Sawanaka and Tsutomu Araki

大阪大学大学院基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

E-mail: t-yasui@me.es.osaka-u.ac.jp, [http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki\\_lab/](http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki_lab/)

We improve signal-to-noise ratio in a real-time terahertz (THz) time-domain spectroscopic imaging system with a line-focused THz beam by use of pulse-to-pulse lock-in imaging. We further evaluate spatial resolution in this system by performing a knife-edge test and confirm the spatial resolution equal to diffraction limit in THz spectroscopic imaging.

#### 1. はじめに

テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) イメージングは、分光学的手法に基づいた新しい非接触リモート・非侵襲な成分分析型内部透視手段として期待されている。特に、最近、テラヘルツ領域 (THz 領域: 周波数 0.1~10THz、波長 30 $\mu$ m~3000 $\mu$ m) において、ビタミン・糖・医薬品・農薬・禁止薬物・プラスチック爆弾・ガン組織を始めとした様々な物質が固有の吸収スペクトル (THz 指紋スペクトル) を示すことが明らかになり、セキュリティや工業計測を始めとした様々な分野での応用が試みられている。しかしながら、従来の THz 分光イメージングは、その有用性にも関わらず、機械的走査機構に起因する長い測定時間ゆえに測定対象が静止物体に制限され、実用化が制限されてきた。我々は、前回、動体測定も可能な THz 分光イメージング法として、電気光学的時間-空間変換と線集光 THz 結像光学系を用いた実時間 THz-TDS ライン・イメージング法を提案した[1]。今回は、パルス・ロックイン THz イメージング法[2]の適用により測定 SN 比を改善したので報告する。さらに、THz 分光イメージングにナイフエッジ法を適用し、空間分解能の評価を行った。

#### 2. 実験装置

実験装置図を Fig. 1 に示す。高強度 THz パルスはフェムト秒チタン・サファイア再生増幅器 (波長 800nm、パルスエネルギー 1mJ/pulse、繰り返し周波数 200Hz) からのレーザー光を ZnTe 結晶 (ZnTe1, 10mm 角 $\times$ 4mm 厚) に入射することにより発生させる。THz パルスとプローブパルスを THz 検出用 ZnTe 結晶 (ZnTe2, 25mm 角 $\times$ 1mm 厚) に非共軸入射することにより、THz パルス電場の時間波形がプローブパルスの空間複屈折量分布に変換される (電気光学的時間-空間変換)。クロスニコル配置の偏光子ペア (図 1 では省略) によってプローブ光の空間強度分布に変換された THz パルス電場時間波形は、結像レンズを介して高速 CMOS カメラ (浜松ホトニクス、インテリジェントビジョンシステム高解像度タイプ、512 $\times$ 512 ピクセル、8 ビット分解能、フレームレート 200fps) の水平座標に展開される。一方、CMOS カメラの垂直座標は 1 次元イメージングに利用可能であるので、円筒 THz レンズを用いて THz ビームをサンプルに線集光し、それを THz レンズペアで ZnTe2 に結像することにより、サンプルの 1 次元 THz イメージを CMOS カメラの垂直座標に展開する。さらに、レーザー繰り返し周波数の 1/2 分周 (100Hz) に同期した光チョッパーを THz 発生用ポンプ光に用いることにより、THz パルスが ZnTe2 に入射した場合 (信号イメージ) と入射していない場合 (背景イメージ) のプローブイメージを各パルス毎に連続取得し、その差分イメージを CMOS カメラ内で算出することにより、高速なパルス・ロックイン・イメージング (フレームレート 100fps) を実現している。最終的に、2 次元時空間 THz イメージの時間軸 (水平座標) を高速フーリエ変換することにより振幅と位相の THz 分光ラインイメージを得る。

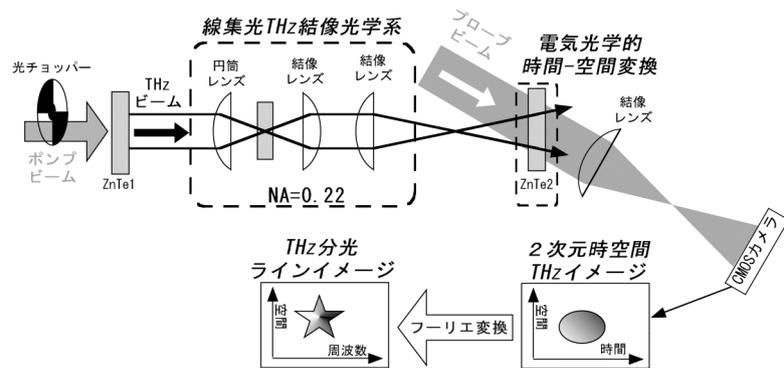


Fig. 1 Experimental setup

### 3. 実験結果

図 2(a)はサンプルが無い状態で取得された 2 次元時空間 THz イメージ (測定時間 10ms) から抜き出された THz パルス電場の時間波形を示しており、時間幅 0.62ps の THz パルスが良好な SN 比で測定されている。また、図 2(b)は図 2(a)の時間波形をフーリエ変換することによって得られた振幅及び位相のフーリエ・スペクトルを示しており、2THz 付近までスペクトル帯域がのびていることが確認できる。図 3 は測定時間と SN 比の関係を示している。ここでは、比較のため、前回のシステムの SN 比も併示してある。パルス・ロックイン検出イメージングにより SN 比が大幅に改善され、さらに測定時間の増大と共に SN 比が向上していることが分かる。

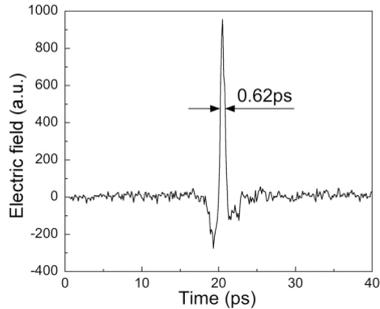


Fig. 2(a) Temporal waveform

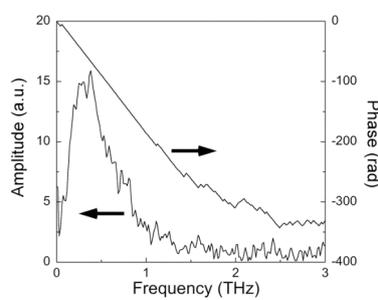


Fig. 2(b) Fourier spectra.

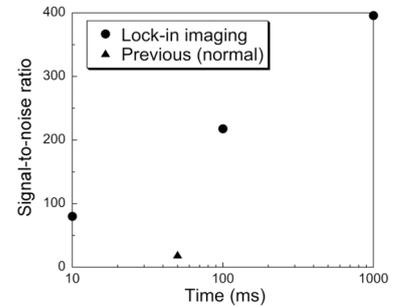


Fig. 3 Signal-to-noise ratio

次に、ナイフエッジ法を用いて本システムの空間分解能を評価した。サンプル位置で THz ラインビームの下半分を隠すようにナイフエッジを配置した場合に得られた THz 分光イメージを図 4(a)に示す。ここでは、THz ビームの空間強度分布の影響をキャンセルするため、ナイフエッジが有る場合と無い場合の振幅イメージの比を取っている。この結果から、ナイフエッジ付近において見られる振幅比変化 (縦方向) の様子が周波数依存性を示していることが分かる。このナイフエッジ振幅比分布から、各周波数における空間分解能を求めたのが図 4(b)である。比較のため、THz 結像光学系の開口数 (NA=0.22) から計算した回折限界の理論曲線も併せて示す。両者の比較から、本システムにおいて回折限界に近いレベルの空間分解能が達成されていることが分かる。

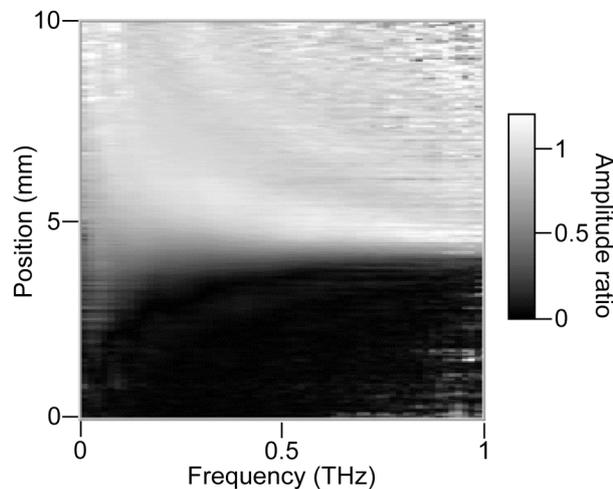


Fig. 4(a) Amplitude ratio image of knife-edge

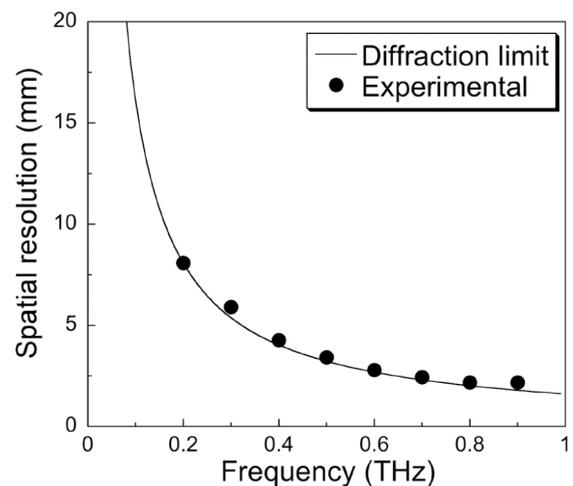


Fig. 4(b) Spatial resolution

### 4. まとめ

実時間 THz-TDS ライン・イメージング法に対してパルス・ロックイン検出を適用することにより、測定 SN 比を改善した。さらに、ナイフエッジ法による空間分解能の評価を行い、ほぼ回折限界レベルの空間分解能が達成されていることを確認した。

本研究は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE)、科学研究費補助金 (課題番号 18686008、18650121) 及び住友財団より援助を受けた。

### 文献

- [1] 安井武史他, Optics Japan 2005 講演予稿集, 23aP11, pp. 110-111 (2005).
- [2] F. Miyamaru et al, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 43, pp.L489-L491(2004).