

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開発

安井武史、澤中健一、井原淳之、荒木勉

大阪大学大学院基礎工学研究科

Line-field, real-time terahertz time-domain spectroscopic imaging

Takeshi Yasui, Ken-ichi Sawanaka, Atsushi Ihara, and Tsutomu Araki

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

We demonstrated real-time, one-dimensional (1D) terahertz time-domain spectroscopic (THz-TDS) imaging of a moving object by combined use of real-time measurement of temporal waveform and real-time 1D imaging of a THz beam passing through a sample. We evaluated the spatial resolution of the present system using a knife-edge test. The resulting spatial resolution of THz-TDS image is close to diffraction limit of the THz imaging optics, and is dependent on the THz frequency. Finally, we applied the proposed system for a moving object. The resulting pixel rate is achieved to be 2,320 pixel/sec. The proposed method will be a powerful tool in the fields of security monitoring and nondestructive testing.

1. はじめに

テラヘルツ波 (THz 波: 周波数 0.1~10THz、波長 30 μ m~3000 μ m) は、X線や超音波に代わる非接触・非侵襲な内部透視手段として、セキュリティ・工業計測・生体計測を始めとした様々な分野での応用が期待されている。特に、最近、THz 領域においてビタミン・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、内部透視イメージを THz 周波数毎の色付きカラー画像 (THz 分光画像) として測定するテラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) イメージングが、『どこに』『何が』あるかを識別可能な成分分析型内部透視手段として注目されている。しかしながら、基本的に点計測である従来法では、例えば1次元 (ライン状) の THz-TDS イメージを取得するためには、時間遅延走査及びサンプル走査のため2次元の機械的走査機構が必要となり、長い測定時間を必要としていた。その結果、測定対象が静止物体のみに制限され、実用化を実現する上で大きな障害となっていた。もし、このような機械的走査機構を省略できれば、測定時間の大幅な短縮が可能になり、動体サンプルへの適用も可能になると考えられる。

我々は、今回、電気光学的時間-空間変換[1]による実時間 THz 時間波形計測と線集光 THz 結像光学系による実時間 THz ライン・イメージングを複合した実時間 2次元時空間 THz イメージング[2]を用いて、機械的走査機構が不要な線集光型実時間 THz-TDS イメージングを実現した。

2. 電気光学的時空間変換

電気光学的時空間変換の原理図を図1に示す。ここで、時間差 Δt の正と負の電場ピークから構成される THz 電磁波パルスを考える。電気光学的時空間変換では、電気光学結晶に THz ビームとプローブビームを非共軸入射し（交叉角度 θ ）、結晶内で面として重ねる。THz パルスの正と負のピークの2つの波面は、プローブパルスの波面と異なる位置で重なり、同じ重なり状態を保ったまま結晶中を伝播する。このような時間-空間変換過程を通して、THz パルス電場の時間軸情報はプローブ光ビームの空間複屈折量分布に展開される。クロスニコル配置の偏光子ペア (P,A) によってプローブ光の空間強度分布 (Δh) に変換された THz パルス電場の時間軸情報は、結像レンズを介して 1 次元光検出素子によって検出される。ここで時間-空間変換式は、以下のようになる。

$$\Delta\tau = \Delta h \cdot \tan\theta / c \quad (1)$$

ここで、 c は光速である。また測定時間窓は、 d はプローブビーム直径とすると、

$$\Delta T = d \cdot \tan\theta / c \quad (2)$$

で表される。このような電気光学的時空間変換を用いると、サンプルのある点における THz 電場時間情報がラインセンサー上の位置信号としてリアルタイムで取得できる。

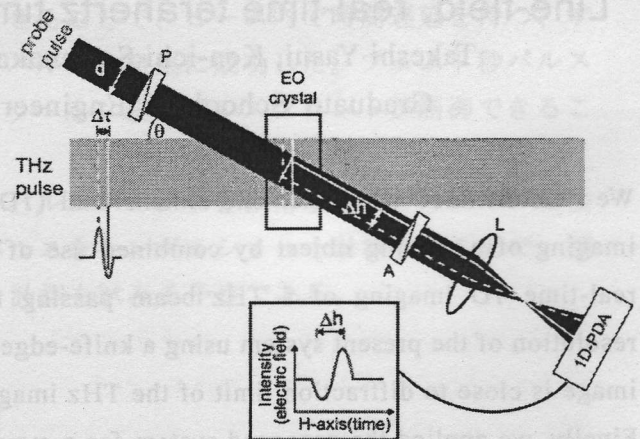


Fig. 1. Principle of time-to-space conversion in EO crystal

2. 実験装置

実験装置図を図2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 800 nm、パルスエネルギー 1mJ/pulse、繰り返し周波数 1kHz）からのレーザー光を ZnTe 結晶 (ZnTe1, 10mm 角×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×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2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、232*232 ピクセル、フレームレート 1000fps）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 (500Hz) 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

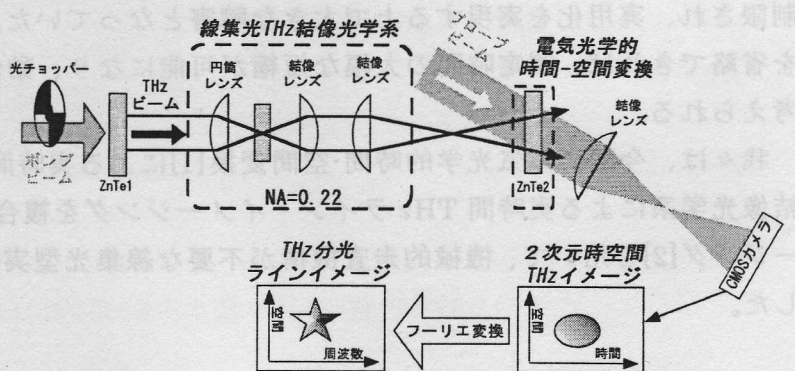


Fig. 2. Experimental setup.

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 500fps）を実現している[3]。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。

3. 基本特性

図 3(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 3(b)は図 3(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 4 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、以前のパルス・ロックイン検出イメージングを用いないシステムの 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。

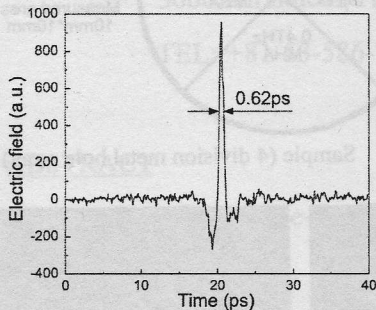


Fig. 3(a). Temporal waveform

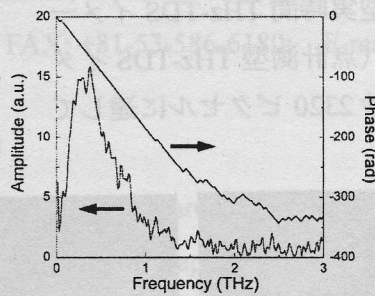


Fig. 3(b). Fourier spectra.

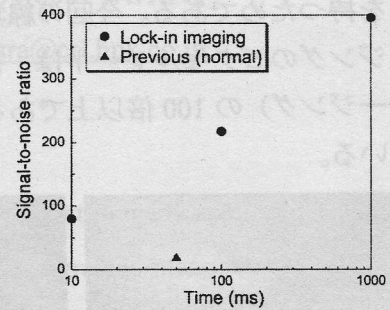


Fig. 4. Signal-to-noise ratio

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 5(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 5(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。

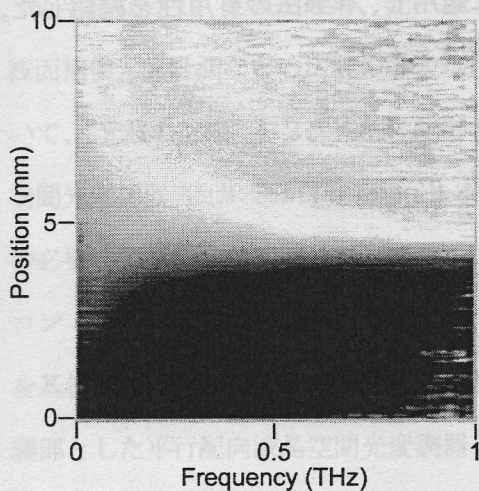


Fig. 5(a). Amplitude ratio image of knife-edge

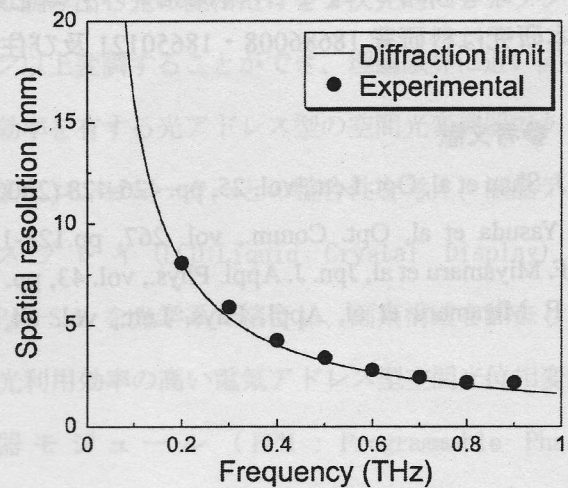


Fig. 5(b). Spatial resolution

4. 動体サンプルの測定

サンプルには、THz 帯フォトニック結晶の1つであるメタルホールアレイ (MHA) を用いた。MHA は、空孔率を調節することにより、透過周波数が選択可能な THz 帯バンドパスフィルターとして利用できる。今回は、空間的に異なる透過特性を有する4分割 MHA [SUS304; 透過周波数=0.2 THz, 0.4THz, 0.8THz, 1.5THz; 図 6] を作成し、これをモータ駆動式機械ステージで連続的に移動させながら測定を行った (1 ライン測定時間=2 ミリ秒、全イメージ測定時間=10 秒)。図 7 は取得された THz 分光イメージ (232pixel*100pixel) を示しており、各周波数毎に異なるイメージが確認できる。0.18THz 及び 1.53THz では4分割 MHA の仕様通りのイメージが得られているが、0.39THz では 0.2THz-MHA、0.78THz でも 0.2THz-MHA 及び 0.4THz-MHA のイメージのクロストークが測定されている。これは、MHA が透過周波数の低周波側成分を急激に減衰させる一方で高周波側成分を若干透過させる透過スペクトル特性[4] を持つためである。今回の線集光型実時間 THz-TDS イメージングのピクセルレートは、従来 (点計測型 THz-TDS イメージング) の 100 倍以上である毎秒 2320 ピクセルに達している。

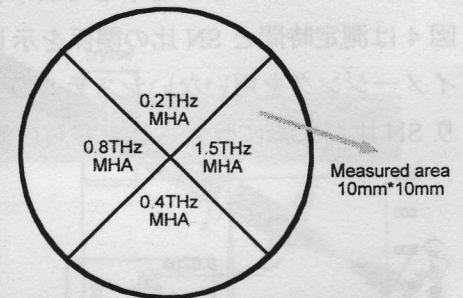


Fig. 6. Sample (4 division metal hole array)

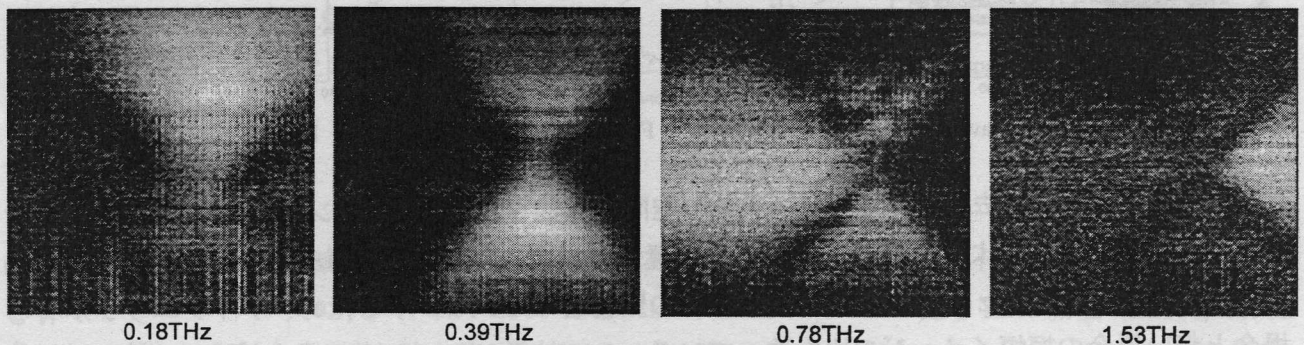


Fig. 7. THz-TDS image of 4-division metal hole array

5. まとめ

電気光学的時空間変換と線集光テラヘルツ光学系を利用した、実時間 THz-TDS ライン・イメージング法を開発した。さらに、開発システムを動体サンプルに適用し、本手法の有用性を確認した。

本研究は科研費 18686008・18650121 及び住友財団より援助を受けた。

5. 参考文献

- [1] J. Shan et al, Opt. Lett., vol. 25, pp. 426-428 (2000).
- [2] Yasuda et al, Opt. Comm., vol. 267, pp.128-136 (2006).
- [3] F. Miyamaru et al, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 43, pp. L489-L491(2004).
- [4] F. Miyamaru et al, Appl. Phys. Lett., vol. 84, pp.2742-2744 (2006).