

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に関する基礎研究

Fundamental study on real-time terahertz time-domain spectroscopic imaging using line focusing of terahertz beam

○安井武史、澤中健一、安田敬史、荒木勉

○Takeshi Yasui, Ken-ichi Sawanaka, Takashi Yasuda 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/>

We propose real-time terahertz time-domain spectroscopic line (1D-THz-TDS) imaging by combined use of electro-optical time-to-space conversion and a line focus of THz pulse at a sample. 1D-THz-TDS imaging with size of 15 mm by 1 THz is achieved at a frame rate of 10 frame/s. The proposed method will provide a powerful tool for non-destructive, component analysis imaging of a moving object.

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、X線や超音波に代わる新しい非接触・非侵襲な成分分析型内部透視手段として、空港手荷物検査や生体計測など様々な分野での応用が期待されている。THz-TDS イメージングでは、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) として測定し、特有の THz 吸収を利用することにより、『どこに』『何が』あるかを識別することが可能となる。しかし、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 (またはビーム走査) のための 2 次元機械走査機構が必要となるため、結果的に長い測定時間を必要としていた。したがって、このような機械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る。

本研究では、電気光学的時空間変換[1]と線集光テラヘルツ光学系を利用することにより、機械的走査機構不要で実時間ライン・イメージングが可能な THz-TDS イメージング法に関して報告する。

2. 測定原理

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 $\Delta\tau$ 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 パルスとプローブパルス光を非共軸入射し (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、 $\Delta\tau = \Delta h \cdot \tan\theta / c$ (c は光速) で表される。また測定時間窓は $\Delta T = d \cdot \tan\theta / c$ 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取得できる。ここで光学系に改良を加え、ラインビーム状に形成された THz パルスを測定対象に照射し、2 次元光検出素子で検出すれば、そのラインビームに沿った THz 時間波形分布情報が短時間で得られる (図 2)。すなわち、まず THz パルスを、円筒レンズ 1 (CL1) によってサンプルに X 軸方向に沿って線集光する。ライン状でサンプルを通過した THz ビームは、円筒レンズ 2 (CL2) により再びコリメートされ、円筒レンズ 3 (CL3) と円筒レンズ 4 (CL4) によりそれぞれ空間軸 (X 軸) 及び時間軸の情報が電気光学結晶上に結像される。一方、プローブビームは電気光学結晶に非共軸入射される ($\theta = 42^\circ$)。偏光子ペアによってプローブビーム ($d = 5\text{mm}$) 断面強度分布情報に変換された 2 次元イメージ信号は、レンズ (L) によって 2 次元 CCD カメラに結像される。その結果、THz 電場時間情報が水平軸に、ラインビームに沿った 1 次元空間情報 (X 軸方向) が垂直軸に展開された、2 次元時空間 THz イメージを CCD フレームレートで取得できる。さらにその時間軸情報 (水平軸) をフーリエ変換することにより、THz-TDS ライン・イメージを得ることができる。

3. 測定結果

上述の手法に基づいて、サンプルのない状態で 2 次元時空間 THz イメージ (シングルフレーム=50ms、

フレームレート=10frame/s)を測定した。図3は測定された2次元時空間THzイメージ(サイズ:19mm*15ps)を示しており、時間情報が横軸、空間情報(X軸)が縦軸にそれぞれ展開されている。7psあたりにTHzパルスの信号ラインが確認され、パルス幅は0.8psである。図3の時間軸情報をパソコンでフーリエ変換することにより、振幅及び位相のTHz-TDSライン・イメージを得ることができる。図4(a)及び(b)は、本システムで得られたTHz振幅スペクトル及び位相スペクトルを示しており、1THzの周波数スペクトル帯域が確認できる。一方、周波数分解能は、2次元時空間THzイメージの時間窓(15ps)の逆数から0.067THzである。

4. 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・イメージング法に関する研究を報告した。19mm*1THzのTHz-TDSライン・イメージが、適度な計測時間(50ms)とSN比で測定された。今後は動体サンプルの成分分析型内部透視イメージングへの応用を試みる予定である。

本研究は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)及び笹川科学研究助成より援助を受けた。

参考文献

[1] Jie Shan, Aniruddha S. Weling, Ernst Knoesel, Ludwig Bartels, Mischa Bonn, Ajay Nahata, Georg A. Reider, Tony F. Heinz, "Single-shot measurement of terahertz electromagnetic pulses by use of electro-optic sampling", Opt. Lett., Vol.25, pp426-428(2000).

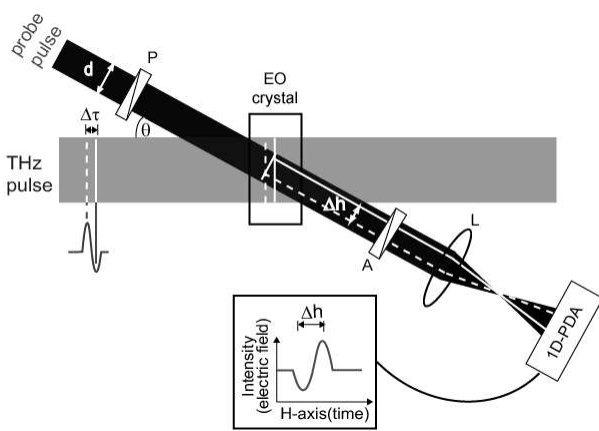


Fig.1 Principle of THz measurement

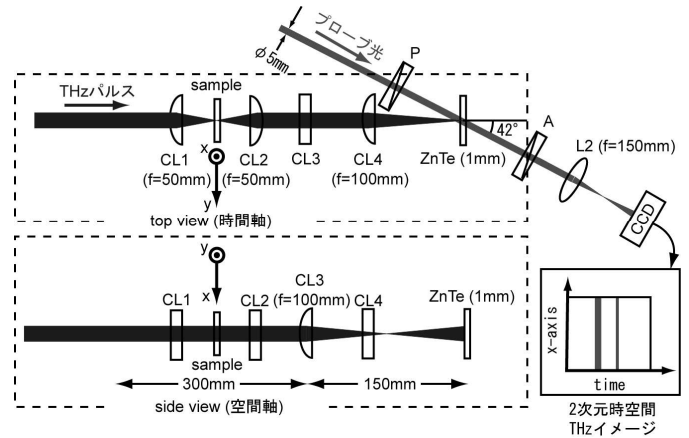


Fig.2 Experimental setup

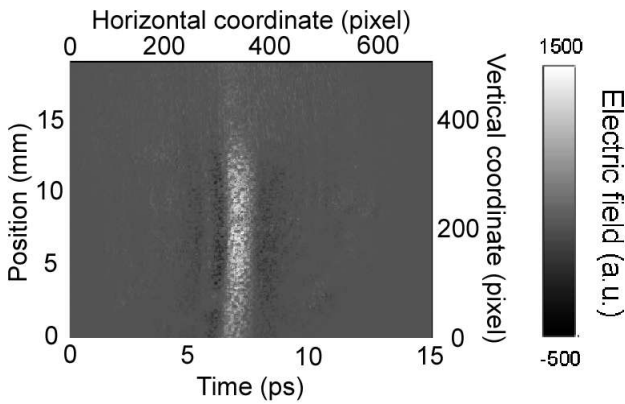


Fig.3 2D spatiotemporal THz image of 19-mm by 15-ps

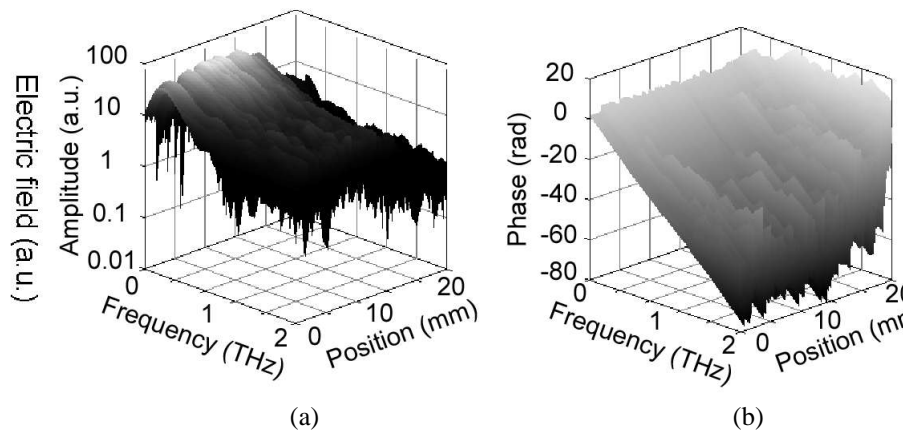


Fig.4 1D-THz-TDS image of 20-mm by 2-THz (a) Amplitude image and (b) phase image