

リアルタイム・テラヘルツ・イメージング

Real-time Terahertz Imaging

安井 武史
Takeshi Yasui大阪大学 大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

1. はじめに

テラヘルツ (THz) 波とは、光波と電波の境界に位置する電磁波 (周波数 100GHz ~ 10THz、波長 30 μ m ~ 3mm) のことである。これまでは良質なレーザー光源や高感度検出器の開発が遅れていたため、未開拓な電磁波領域とされてきた。しかし近年の超短パルスレーザーや超高速デバイス技術の発展により、パルス状の THz 波 (THz パルス) が比較的容易に生成・検出できるようになった。THz パルスは、自由空間伝播、非金属材料に対する良好な透過特性、コヒーレントビーム、超短パルス、広帯域スペクトル、非侵襲、低散乱、分光やイメージングが可能などの特徴を有しており、新たな応用展開に関する研究が活発になっている。このような THz パルスの特徴を活かしたイメージング法が、THz 断層イメージング (THz トモグラフィ) と THz 時間領域分光 (THz-TDS) イメージングである。前者では、非接触・非侵襲で物体内部の様子を階層的に可視化できることから、X 線 CT や超音波エコーに代わる新しい非破壊検査手段として期待されている。一方、後者では、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) として測定可能であり、さらに各種物質が THz 領域において示す固有の吸収スペクトル (THz 指紋スペクトル) を利用すれば、『どこに』『何が』あるかを識別可能な成分分析型内部透視が実現できる。しかしながら、従来法では時間遅延走査及びサンプル走査のために複数の機械的走査を行わなければならない、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てきた。もし、これらの THz イメージングにおいて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。その結果、両イメージング手法の応用性は飛躍的に高まるはずである。我々は、このような機械的走査機構を省略するため、電気光学的時間-空間変換による実時間 THz 時間波形計測 [1] 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 イメージングを提案した [2]。さらに、本手法に基づいた実時間 2 次元 THz トモグラフィ [2, 3] や THz カラーキャナー [3, 4] を開発し、動体サンプルの計測に応用している。本講演では、これらの成果に関して紹介する。

2. 電気光学的時間-空間変換 (非共軸 2 次元自由空間電気光学サンプリング法)

2 次元自由空間電気光学サンプリング法 (2D-FSEOS) とは、THz ビームとレーザービーム (プローブビーム) を電気光学結晶に対して共軸に入射することにより、電気光学ポッケルス効果を通じて、THz ビームの空間電場分布をレーザー

ビームの空間強度分布に転写する手法である。一方、非共軸 2D-FSEOS では、THz ビームとプローブビームを非共軸入射配置とすることにより、THz パルスの電場時間波形をプローブビームの空間強度分布に変換することが可能になる。非共軸 2D-FSEOS 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 パルスを考える。電気光学的時間-空間変換では、THz 検出用電気光学結晶に 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断面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 (Δt) は、結像レンズを介して 1 次元ラインセンサー (1D-LS) 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。

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

ここで、 c は光速である。また測定時間窓は、 d を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間-空間変換を用いると、サンプルを透過した THz パルスの電場時間波形を 1D-LS 上の位置信号として、機械的走査機構無しでリアルタイム取得できる。

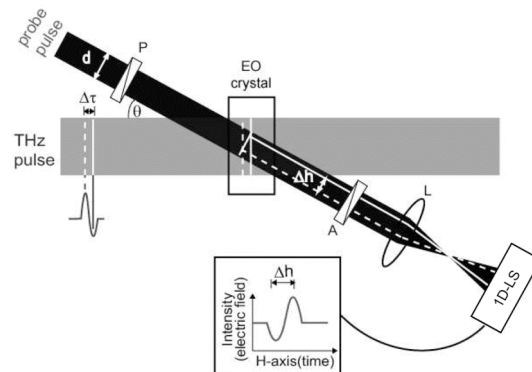


図 1 電気光学的時間-空間変換

3. 実験結果

3-1. 実時間 2 次元 THz トモグラフィ

THz 膜厚計 [5-7] は自動車ボディ等に施された塗装膜の膜厚や乾燥状態の非接触リモート計測手段として期待されているが、塗装工程におけるインプロセス・モニタリングへの拡張を考慮した場合、計測の実時間性が強く望まれる。

このようなインプロセス THz 塗膜計に対して、実時間 2 次元 THz トモグラフィーが有効であると考えられる。そこで、ここでは塗装膜厚計測への応用例を紹介する。ベルト・コンベヤー上の塗装製品を想定し、動体サンプルへの適用性を評価した。サンプルはアルミ板上の半分の領域に白アルキド塗装(膜厚 175 μm)を施したものをを用いた。この塗装膜サンプルを、THz ビームの集光ライン方向に沿って連続的に移動させたながら(移動速度 5mm/s)、2 次元断層イメージを連続取得した。図 2 は 3 つの THz ビーム照射位置における測定結果を示している。非塗装部分では、アルミ板表面からの THz エコー信号が 2.8ps の位置で観測されている [図 2(a)]。次に塗装部分では、塗膜表面及び塗膜-アルミ板境界からの THz エコー信号が時間的に分離 (2.3ps 及び 4.5ps) されているのが確認できる [図 2(c)]。また、白アルキド塗装の群屈折率(2.14)と時間遅延から算出した膜厚スケールは図上部の水平軸に示されている。測定領域 1~4mm における膜厚ムラ分布は $162 \pm 21 \mu\text{m}$ (平均値 \pm 標準偏差)であった。非塗装部分と塗装部分の境界では、1 つの THz エコー信号と 2 つの THz エコー信号が混在していることが確認できる [図 2(b)]。このように、動体サンプルの 2 次元断層分布の実時間モニタリングが本手法によって可能であることが分かる。

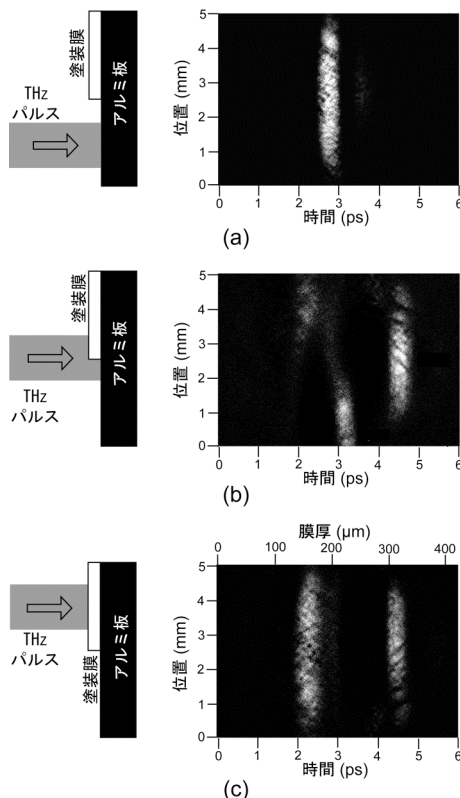


図 2 移動塗装膜の 2 次元断層イメージング

3-2. THz カラーキャナー

テストサンプルとしてメタルホールアレイ (MHA) を用いて基本特性評価を行った。MHA は THz 帯フォトニック結晶の 1 つであり、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(透過周波数=0.2THz, 0.4THz, 0.8THz, 1.6THz ; 図 3) を作成し、ステージで一方方向に連続移動(1mm/sec)させながら測定を行った(測定領域 20mm*20mm、測定時間 20 秒)。図 4(a) は、4 分割 MHA の 4 つの透過周波数における THz 分光画像(232pixel*200pixel)を示しており、4 分割 MHA のスペクトル特性を反映した結果が得られているのが分かる(イメージのクロストークは、4 分割 MHA 自体の透過スペクトル特性によるものである)。従来の点計測型 THz-TDS イメージング装置とピクセルレート(=総ピクセル数/測定時間)を比較すると、THz カラーキャナーが 100~10,000 倍近く高いことになる。図 4(b) は移動速度を 10mm/sec に増加した場合の測定結果(測定時間 2 秒)を示しており、測定 SN 比は低下しているものの、同様な結果が得られていることが分かる。

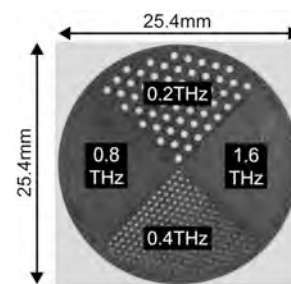


図 3 4 分割 MHA

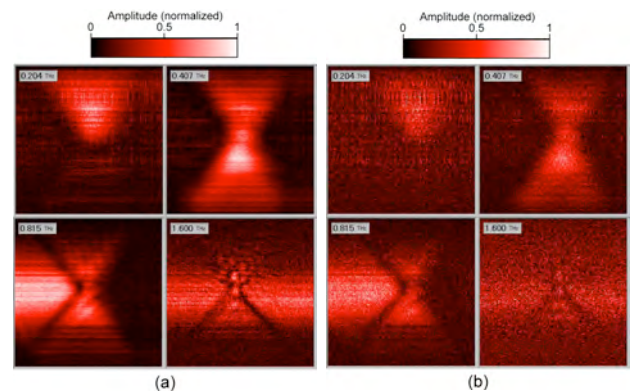


図 4 4 分割 MHA の THz 分光イメージ。(a) 1mm/sec と (b) 10mm/sec

4. まとめ

機械的走査機構の不要な実時間 2 次元時空間 THz イメージング法を THz トモグラフィー及び THz-TDS イメージングに適用し、両手法の実時間化を達成した。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。

参考文献

- [1] J. Shan *et al.*, Opt. Lett. **25**, pp. 426-428 (2000).
- [2] T. Yasuda *et al.*, Opt. Comm. **267**, pp. 128-136 (2006).
- [3] http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki_lab/research/thz/
- [4] T. Yasui *et al.*, Opt. Express **16**, pp. 1208-1221 (2008).
- [5] T. Yasui *et al.*, Appl. Opt. **44**, pp. 6849-6856 (2005).
- [6] T. Yasuda *et al.*, Appl. Opt. **46**, pp. 7518-7526 (2007).
- [7] 安井武史他, 塗装工学 **43**, pp. 389-397 (2008).