

【第4講】

テラヘルツ断層イメージング及びテラヘルツ分光イメージングの実時間化

安井武史、荒木勉

大阪大学大学院基礎工学研究科

1. はじめに

テラヘルツ領域(周波数 = 0.1~10 THz; 波長 = 30~3000 μm)は、ちょうど光波と電波の境界に位置し、これまで良質なレーザー光源や高感度検出器が無かったため、ほとんど研究が行われていない未開拓電磁波領域であった。しかし、最近の安定な超短パルスレーザーの出現と超高速デバイス技術の発達により、パルス状の THz 波(以下 THz パルスと略す)が比較的容易に生成・検出できるようになってきたため、以下に示す特徴と相まって新たな応用展開が活発になっている。THz パルスは、光波と電波の境界に位置するということから、その両者の性質を有するユニークな電磁波である。具体的には、(1)自由空間伝搬、(2)非金属材料に対する良好な物質透過性及び低散乱性、(3)極低エネルギー・極低侵襲性、(4)コヒーレントビーム、(5)超短パルス特性、(6)広帯域スペクトル、(7)イメージング測定や分光測定が可能、といった特徴を有する。

物体の非破壊検査では、内部の様子を階層的に検査できる断層画像撮影技術は極めて有効であり、これまでにX線CTや超音波エコーが実用化されているが、これらの手法では高い侵襲性や接触測定が測定対象に対する制限となっていた。一方、上述した THz パルスの特性を利用すれば、超音波エコーと同様なパルスエコー法に基づいた THz 断層イメージング(THz トモグラフィー)が非接触・非侵襲で実現できる。我々はこのような方法を、塗装膜¹⁻³⁾やヒト皮膚断層⁴⁾の非接触リモート測定に応用してきた。しかしながら、現状では THz パルスの時間波形を直接的に実時間測定可能な検出器が存在しないため、機械式時間遅延を利用した相互相関測定(ポンプ・プローブ法)に基づいて間接的に時間波形を取得しなければならない。その結果、ピコ秒オーダーの THz パルスエコー時間波形を1つ取得するのに数分前後の測定時間が必要となるわけである。2次元断層イメージングを取得するためには、さらにビーム照射位置を1次元的に走査しなければならない。このように、従来の THz トモグラフィーは基本的に点計測に基づいているため、2次元断層イメージングを取得するためには2次元的な機械的走査機構(時間遅延及びサンプル移動)が必要となる。その結果、画像取得に膨大な時間(数分~数時間)がかかり、本手法の応用性を著しく制限してきた。

一方、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)イメージングが注目されている。この手法を用いると、『どこに』『何が』あるかを識別可能になり、成分分析型の内部透視手段として期待されている。しかしながら、THz トモグラフィー同様、基本的に点計測に基づいた THz-TDS イメージング法では、THz-TDS イメージング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複数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、これらの THz トモグラフィーや THz-TDS イメージングにおいて機械的走査機構(時間遅延走査、サンプル走査)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⁵⁾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⁶⁾。さらに、本手法に基づいた実時間2次元 THz トモグラフィー^{6, 7)}や実時間 THz-TDS スキャナー⁸⁾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)⁵⁾

2次元自由空間電気光学サンプリング法(2D-FSEOS)とは、THz ビームとプローブビーム(レーザービーム)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介して、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変換する手法である。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($\Delta\tau$)は、結像レンズを介して1次元フォトダイオード・アレイ(1D-PDA)によって検出される。ここで時間-空間変換式は、以下ようになる。

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

ここで、 c は光速である。また測定時間窓は、 d 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-PDA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。

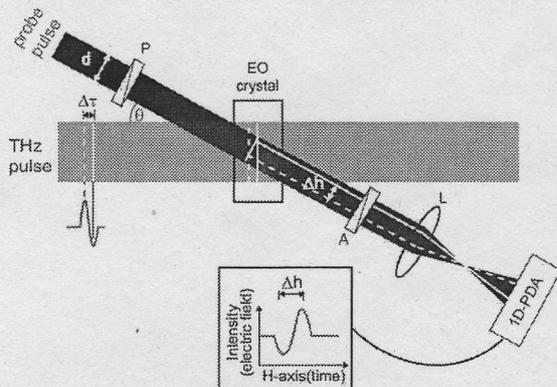


図1 電気光学的時間-空間変換

3. 実時間2次元THzトモグラフィー

3.1 実験装置

上述の非共軸2F-FSEOSによる電気光学的時間-空間変換を用いると、サンプルのある点における断面奥行情報(THz エコー波形)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2次元断面分布情報が短時間で得られる。このような考えに基づいて開発した実時間2次元THzトモグラフィーの装置図を図2に示す。THzパルス発生及び検出用レーザー光源には、フェムト秒チタン・サファイア再生増幅器(パルスエネルギー1mJ、パルス幅100fs、中心波長800nm、繰返周波数1kHz)を用いる。非線形光学結晶(4mm厚ZnTe結晶)によって発生させた高強度THzパルスはレンズ1によってコリメートされた後、円筒レンズによってサンプルに線集光される。サンプルから反射されたTHzエコービームは、レン

ズ2によって電気光学結晶(1mm厚ZnTe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。直交配置された偏光子ペア(偏光子、検光子)によってプローブビーム断面強度分布情報に変換された2次元断面分布情報は、レンズ3によって冷却CCDカメラ(640×480ピクセル、12ビット分解能、毎秒10フレーム)に結像される。最終的に、THzエコー時間情報が水平軸に、ラインビームに沿った1次元空間情報が垂直軸に展開された、2次元時空間THzイメージが取得される。

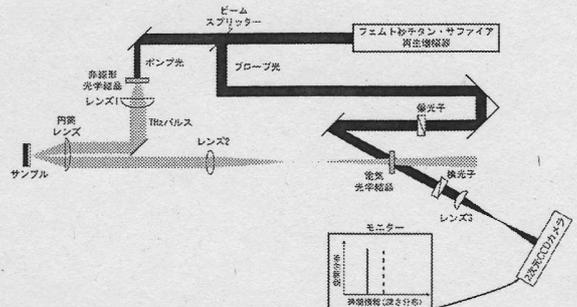


図2 実時間2次元THzトモグラフィー装置

3.2 測定結果

図3(a)は、ミラーをサンプルとした場合に取得された2次元時空間THzイメージ(イメージ領域:9ps×5mm、測定時間100ms)を示しており、水平軸が深さ分布、垂直軸がラインビームに沿った1次元空間分布に対応している。イメージのグレースケールはTHz電場の正負強度を示している。THzエコー信号は4.1psの位置に現れており、ミラー表面が平らで内部構造を有しないため1本の垂直ライン状となっている。図3(b)は図3(a)の水平線(1)に沿ったTHz電場の強度分布を示しており、パルス幅0.5psのTHzエコー時間波形が実時間測定できていることが確認できる。このパルス幅がTHzトモグラフィーの深さ分解能[図3(a)の水平方向]を決定する。一方、面内空間分解能[図3(a)の垂直方向]はTHzパルスの波長(回折限界)に依存する。

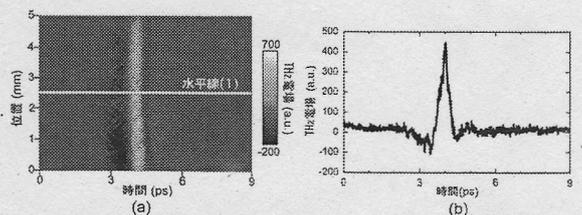


図3 (a)2次元時空間THzイメージと(b)時間波形

THz膜厚計¹⁻³⁾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に有用であるが、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。まずベルト・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 4 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 4(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 4(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 μm (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のが確認できる[図 4(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。

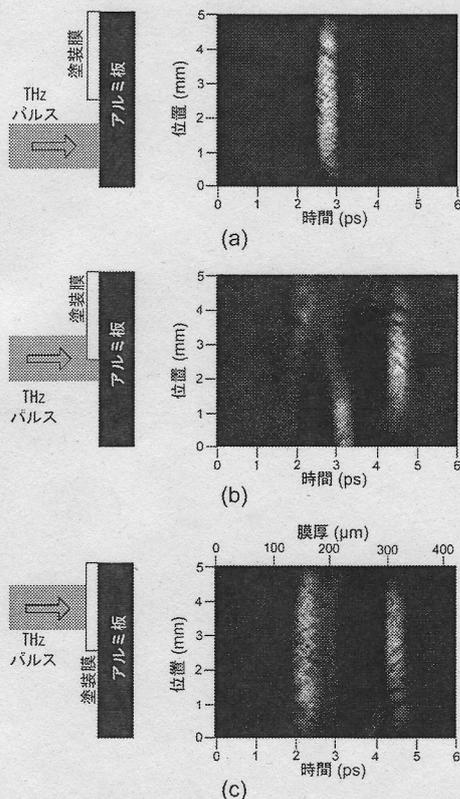


図 4 移動塗装膜の 2 次元断層イメージング

一方、本手法の非接触リモート性と実時間性を利用すると、従来は測定困難とされた未乾燥状態の塗装膜(ウェット膜)の測定も可能となる。そこで、ウェット膜の乾燥に伴う膜厚変化を本手法によって実時間測定した。サンプルは速乾性黒アクリル塗装をアルミ板に施したもので、塗装前後の 2 次元断層イメージを測定した。図 5 は、1 分毎の 2 次元断層 THz イメージを示している。塗装前は剥き出しのアルミ板上からの THz エコー信号のみが観測されて

いるが、塗装後は塗膜表面及び塗膜-アルミ板境界からの 2 つの THz エコー信号が時間的に分離されている。乾燥の進行に伴い、2 つの THz エコー信号の時間的位置が変化している様子が確認できる。ここで、左側の THz エコー信号は塗膜表面からの反射であり幾何学的膜厚変化に対応しているのに対し、2 つの THz エコー信号の時間間隔は光学的膜厚に対応している。これらの時間的位置の変化から、乾燥に伴い、塗膜が幾何学的及び光学的に収縮していることが分かる。また、塗膜の収縮が面内で均一に進行している様子も確認できる。

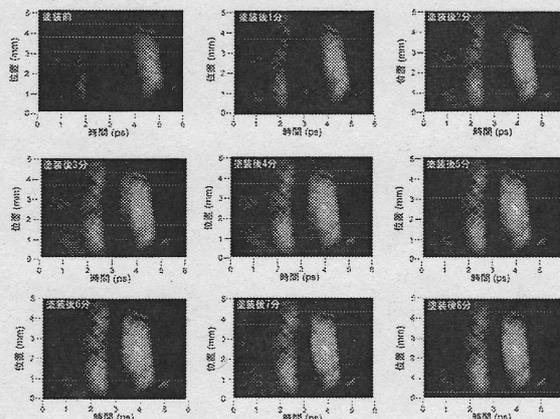


図 5 ウェット塗装膜の乾燥過程

4. 実時間 THz-TDS スキャナー

4.1 実験装置

実時間 THz-TDS スキャナーの実験装置図を図 6 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 1kHz)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 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 \times 232 ピクセル、12 ビット分解能、毎秒 1000 フレーム)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⁹⁾。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。

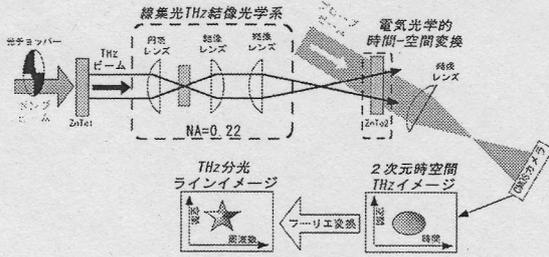


図6 実時間 THz-TDS スキャナー装置

4.2 実験結果

図 7(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 7(b)は図 7(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。

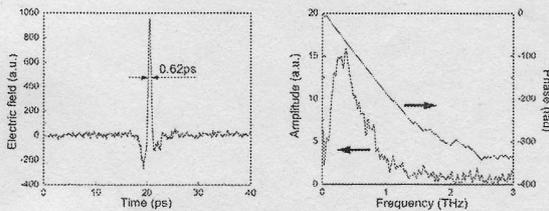


図7 (a)時間波形と(b)フーリエスペクトル

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 8(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 8(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。

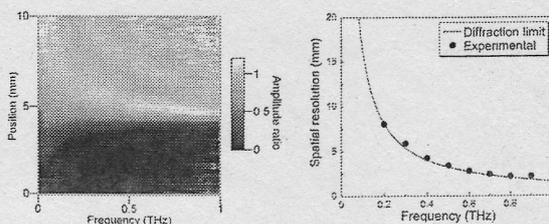


図8 (a)ナイフエッジの THz 振幅分光イメージと(b)空間分解能

最後に、動体サンプルの測定を行った。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[透過周波数=0.2THz,0.4THz,0.8THz,1.5THz; 図 9]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(移動速度=1mm/s、全イメージ測定時間=10 秒)。図 10 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 の分光イメージでは 4 分割 MHA の仕様通りのイメージが得られているが、0.39THz イメージでは 0.2THz-MHA、0.78THz イメージでも 0.2THz-MHA 及び 0.4THz-MHA 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を持つためである。本システムのピクセルレートは毎秒 2320 ピクセルに達しており、従来の点走査型 THz-TDS イメージング装置と比べて大幅な高速化が実現されている。

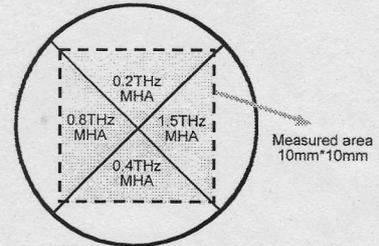


図9 サンプル(4分割メタルホールアレイ)

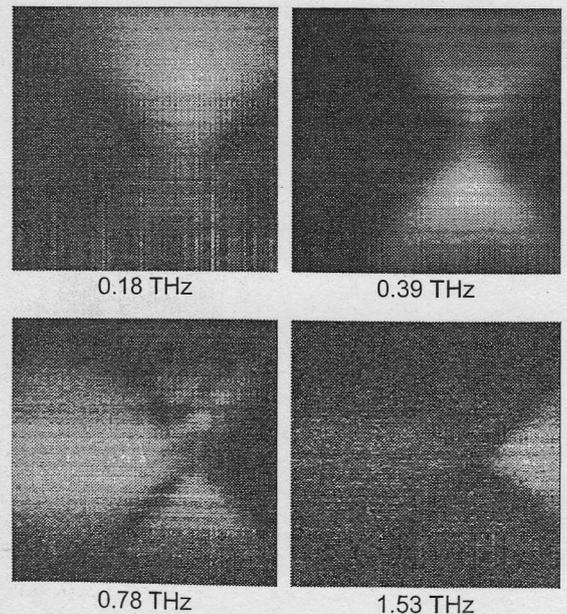


図10 動体サンプルの THz-TDS イメージ

5. まとめ

電気光学的時間-空間変換と線集光 THz 光学系に基づいた実時間 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。

本研究は科研費 18686008・18650121、稲盛財団および三豊科学技術振興協会より援助を受けた。

参考文献

- 1) 安井武史、荒木勉, “テラヘルツパルス光を用いた高機能塗装膜モニタリング法の開発”, 光アイアンス **14**, pp.18-23 (2003).
- 2) T. Yasui, T. Yasuda, K. Sawanaka, and T. Araki, "A terahertz paintmeter for non-contact monitoring of thickness and drying progress in paint film", *Appl. Opt.* **44**, pp. 6849-6856 (2005).
- 3) T. Yasuda, T. Iwata, T. Araki, and T. Yasui, "Improvement of minimum paint film thickness for THz paintmeters by multiple regression analysis", *Appl. Opt.* **46**, (in press).
- 4) 安井武史、東野義之、荒木勉, “テラヘルツ電磁波パルスを用いた非接触・局所皮膚水分量測定の開発”, 生体医工学 **42**, pp.190-194 (2004).

5) J. Shan, A. S. Weling, E. Knoesel, L. Bartels, M. Bonn, A. Nahata, G. A. Reider, T. F. Heinz, "Single-shot measurement of terahertz electromagnetic pulses by use of electro-optic sampling", *Opt. Lett.* **25**, pp. 426-428 (2000).

6) T. Yasuda, T. Yasui, T. Araki, and E. Abraham, "Real-time two-dimensional terahertz tomography of moving objects", *Opt. Comm.* **267**, pp. 128-136 (2006).

7) 荒木勉、安井武史, “テラヘルツ電磁波パルスによるリアルタイム2次元断層画像撮影技術～非侵襲・非接触リモートな実時間断層画像撮影法の開発～”, 検査技術 **11**, pp. 41-46 (2006).

8) T. Yasui, K. Sawanaka, and T. Araki, "Real-time, one-dimensional terahertz time-domain spectroscopic imaging of moving object", *Proc. Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimetre Waves and 15th International Conference on Terahertz Electronics*, pp. 60-61, Cardiff, England (2007).

9) F. Miyamaru, T. Yonera, M. Tani and M. Hangyo, "Terahertz two-dimensional electrooptic sampling using high speed complementary metal-oxide semiconductor camera", *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, pp. L 489-L491 (2004).