

Japan Congress on High Speed Photography and Photonics 2001

— 13-15 December 2001, Fukuoka —

# 高速度撮影とフォトニクスに関する 総合シンポジウム 2001

## 講演論文集

会 期 平成13年12月13日(木)～15日(土)  
会 場 ももちパレス(福岡県立福岡勤労青少年文化センター)

編 集 高速度撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム2001  
論文編集委員会

## THz 時間領域分光システムの開発と非破壊検査への応用

○光成 俊泰、 安井 武史、 荒木 勉 (阪大院基礎工)

## Development of terahertz time-domain spectroscopy and application to non-destructive inspection

Toshiyasu Mitsunari, Takeshi Yasui, Tsutomu Araki  
(Graduate School of Engineering Science, Osaka University)

We develop a terahertz time-domain spectroscopy system and demonstrate applications to non-destructive inspection. Our system provides a basic performance of 3.3 ps pulse width, spectral span from 0.05 THz to 1THz, and 4.6 GHz spectral resolution. As example of food inspection, we measured water content in instant coffee powder.

## 高速度現象の分類と撮影法

・現象の時間スケール	: 1~100 ps
・観測内容	: 物質を透過してきた THz 光の時間分解測定
・観測方法	: 時間領域分光
・観測機器	: 光伝導スイッチ、フェムト秒レーザー
・観測時間精度	: 約 0.2 ps

## 1. はじめに

テラヘルツ光(THz 光)とは、光波と電波の間に位置し、広帯域なスペクトル(100GHz~10THz)を有するピコ秒遠赤外パルス光である。THz 光発生・検出技術は、最近の超短パルスレーザーと半導体技術の発達により可能となったもので、新しい光源としてその応用が注目されている[1]。

一方、非破壊検査は食品検査や製品検査のような工業計測において、重要な計測手段である。THz 光は水分を含まない非金属物質を良く透過し、かつ非侵襲であることから、X 線や超音波に代わる非破壊検査の光源として期待されている[2]。また、THz 時間領域分光法(THz-TDS)を用いることにより、サンプルの成分分析も可能である。今回、我々は、食品検査の応用例として、THz 光の良好な透過性と水に対する強い吸収を利用して、ドライフード(インスタントコーヒー粉末)に含まれる微量水分の高感度測定を非破壊・非接触で行った。

## 2. 実験方法

Fig.1 に、実験セットアップを示す。THz 光の発生及び検出には、ボウタイ型光伝導スイッチと、フェムト秒チタンサファイアレーザー(AVESTA、パルス幅 80fs、平均パワー300mW、

繰り返し周波数 87MHz、中心波長 785nm)を用いた。まず、レーザー光はビームスプリッター(BS)で発生用ポンプ光と検出用プローブ光に分ける。ポンプ光(40 mW)は光チョッパーで強度変調(周波数 3.45 kHz)された後、光伝導スイッチの微小ギャップ(5 $\mu$ m)にレンズで集光される。微小ギャップ間には、あらかじめバイアス電圧(20V)をかけておく。フェムト秒パルス光が入射する瞬間に、アンテナ間で微小電流が流れ、双極子放射によりスイッチから THz 光が発生する。THz 光はスイッチの裏面に取り付けられたシリコンレンズを経て放射される。さらに、THz 光は軸外し放物面鏡によりコリメートされ、サンプルを透過させる。サンプルを透過した THz 光は、再び軸外し方物面鏡とシリコンレンズで検出用ポウタイ型光伝導スイッチに集光される。このとき、プローブ光(10 mW)を発生側と同様にアンテナの微小ギャップに集光すると、THz 光の電場に比例する電流がアンテナ間に流れる。この微小電流を電流アンプで直流増幅し、ロックインアンプで測定した。プローブ光の時間遅延を自動ステージで走査することによって、THz 光の時間波形をサンプリングする。

このように、THz-TDS 法では、まず最初に THz 光の時間波形を測定する。この時間波形は電場の時間変化を表しているため、これをフーリエ変換することにより、振幅と位相の周波数スペクトルを得ることができる。したがって、サンプルが有る場合と無い場合の振幅・位相スペクトルを比較すれば、サンプルの複素屈折率(吸収と屈折)が得られる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 基本特性

まず、放射 THz 光の時間変化を時間分解能 0.2 ps で測定した。その結果、ポウタイ型光伝導スイッチ特有のパルス波形が得られた(Fig.2)。このとき、パルス幅は 3.3 ps、SN 比は 330 であった。この波形をフーリエ変換して、振幅と位相の周波数スペクトルを得た

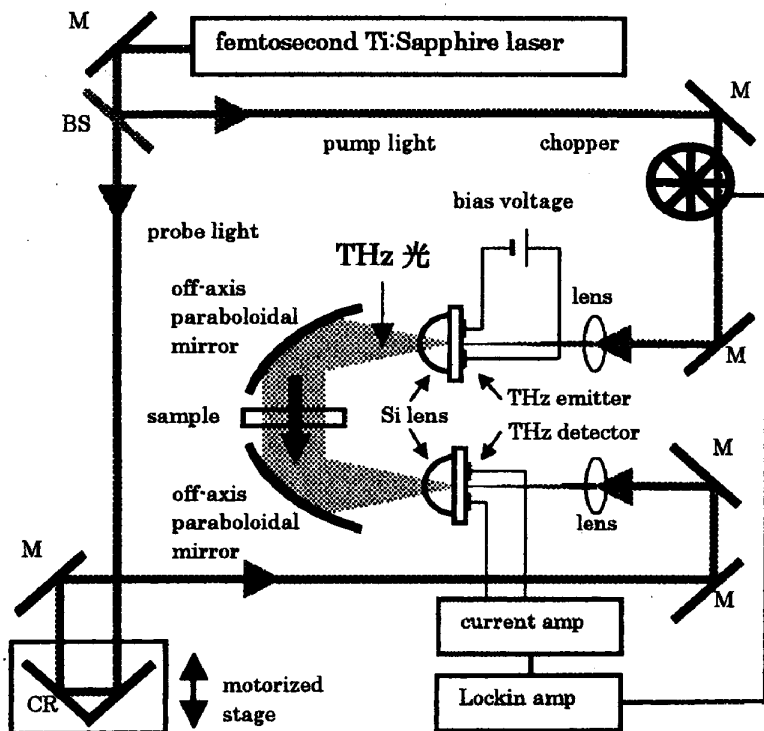


Fig. 1 Experimental setup of THz-TDS system.

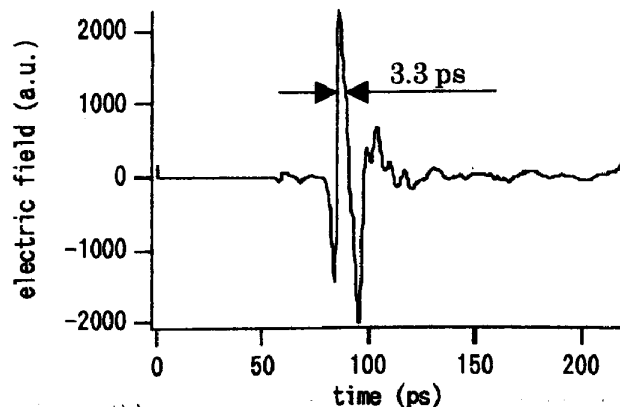


Fig.2 Temporal behavior of THz light.

(Fig.3)。0.05 THz から 1 THz の周波数スパンで振幅スペクトル信号がノイズに埋もれず確認できた。また、位相スペクトルもこの範囲で直線性を保っており、位相が揃っていることが分かる。

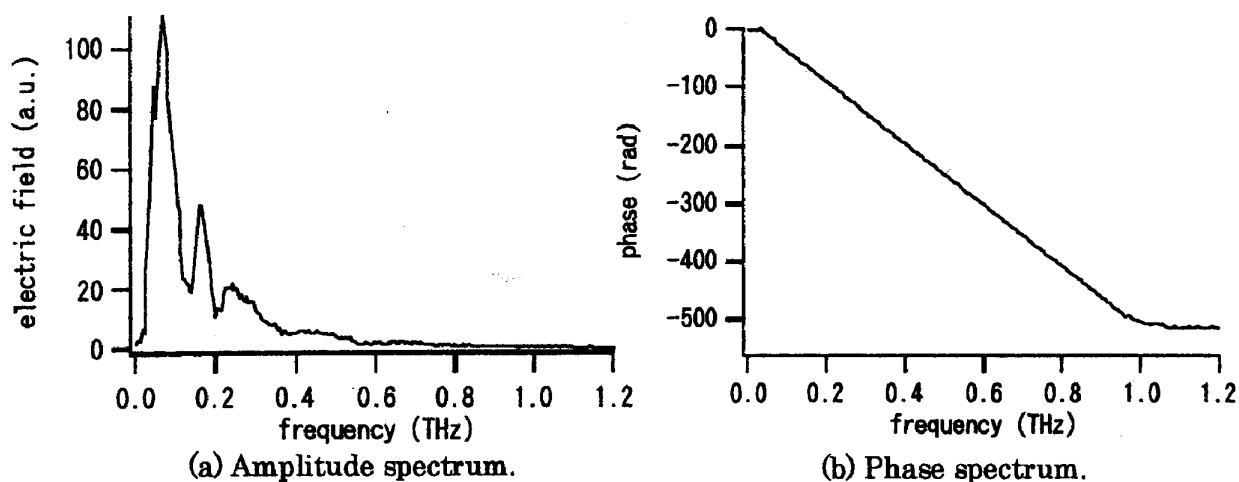


Fig.3 Frequency spectra of THz light.

### 3.2 水蒸気の測定

次に、システムの信頼性を評価するため、サンプルセルに封入した水蒸気の吸収スペクトルを測定した(Fig.4)。水蒸気は、低波数領域において純回転スペクトルを示すことが知られている。数値を示した吸収線は水蒸気の純回転スペクトルである。図中の数字は実測値で、括弧内は文献値[2]を示している。スペクトル中の各測定値は、文献値と±2%の誤差で一致しており、THz-TDS法によって水蒸気の純回転スペクトルが精度良く測定できていることが分かる。

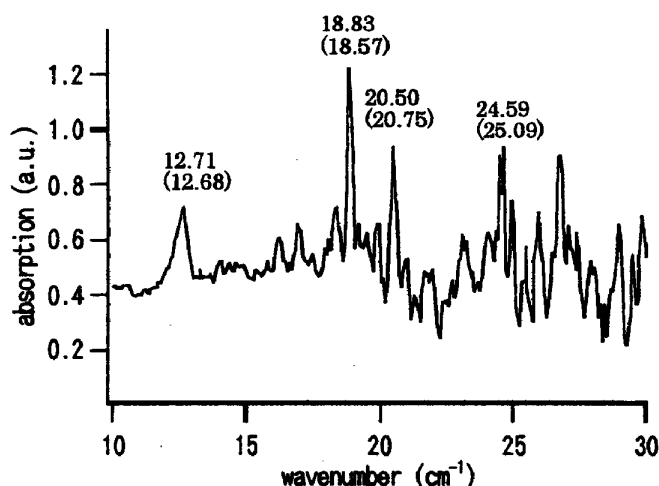


Fig.4 Absorption spectrum of water vapor.

### 3.2 水の測定

さらに、水分量と吸収量との関係を調べるため、THz光が透過する水の光路長を100~900 $\mu\text{m}$ まで100 $\mu\text{m}$ 刻みで変えて、その透過スペクトルを測定した。各光路長に対する透過スペクトルのピーク値(0.069THz)をFig.5にプロットした。その結果、ほぼランバート・ベール則に従っており、水の定量が可能であることが分かった。

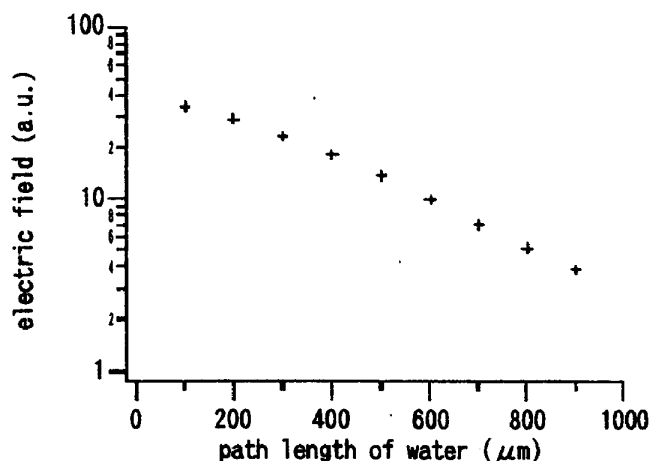


Fig.5 Relation between path length and absorption of water.

#### 4. 応用

##### 4.1 インスタントコーヒーの水分測定

食品検査においてドライフードの水分含有量は、重要な品質評価パラメーターの一つである。そこで、インスタントコーヒー粉末の高感度水分測定を行った。サンプルが無い場合のスペクトルと空のガラスビンを入れた場合の透過スペクトルを Fig.6(a)に示す。ガラス容器はその含有水分のため高周波成分を吸収しているが、低周波数成分は 1/3 程度は透過している。そこで、この低周波数成分を利用して、容器に入れた状態で、開封直後と開封したまま 2 日間室内に放置したコーヒー粉末の水分量を測定した(Fig.6(b))。開封直後では、コーヒー粉末の含有水分は少ないので、ほとんど吸収は見られなかったが、二日間放置後の透過スペクトルのピーク値は 56%にまで低下した。これは主に、大気中の水蒸気がコーヒー粉末に取りこまれた結果であり、スペクトルが全体的に低下している。また、実験期間中は雨天高湿度のため、多くの水分をコーヒー粉末が取り込んだことも、大幅なスペクトルピークの低下の一因と考えられる。

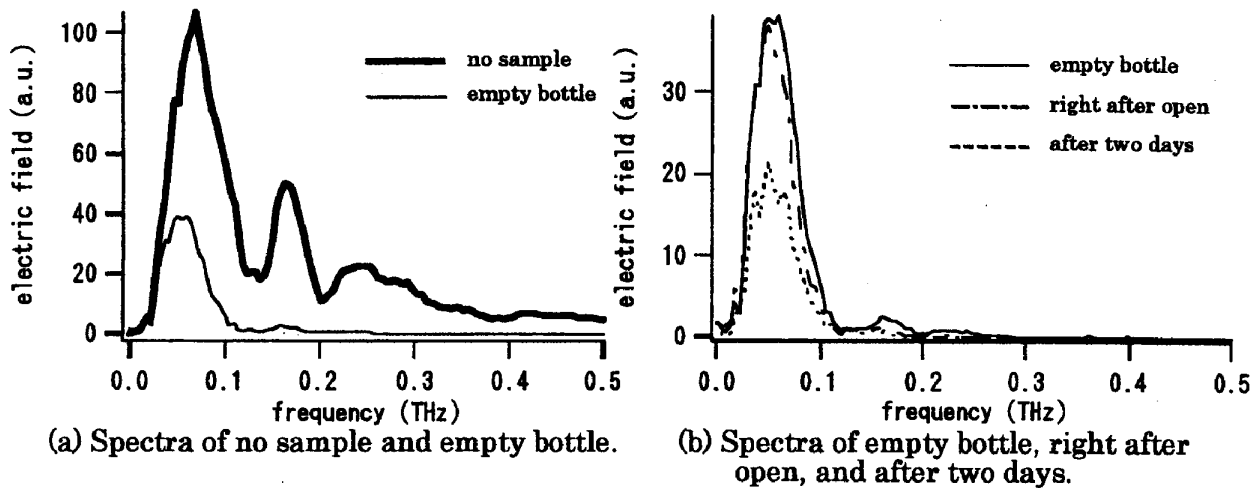


Fig.6 Transmittance spectra of instant coffee powder.

#### まとめ

我々は、THz-TDS システムを開発し、その基本特性の評価を行った。さらに、非破壊食品検査への応用例として、ドライフードの水分測定を行った。THz 光の良好な透過特性と水に対する強い吸収を利用することにより、非破壊・非接触にインスタントコーヒー粉末の微量な水分量を高感度に測定することができた。また、吸収だけでなく位相の情報も用いることにより、様々な非破壊検査への応用が期待される。

本研究は、ネスレ科学振興会及びコニカ画像科学振興財団より研究助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] D. H. Auston et al, Appl. Phys. Lett., 45, 3, pp284-286(1984)
- [2] D. M. Mittleman et al, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., 2, pp679-692(1996).
- [3] H.Yoshinaga et al, J. Opt. Soc. Am., 48, 5, pp315-323(1958).