

# フェムト秒非同期光サンプリング法を用いた高速・超高分解テラヘルツ時間領域分光法の開発

## Rapid, ultrahigh-resolution terahertz time-domain spectrometer based on femtosecond asynchronous optical sampling method

○安井武史, 實吉永典, 荒木勉

○Takeshi Yasui, Eisuke Saneyoshi 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 a rapid, ultrahigh-resolution terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) based on asynchronous optical sampling (AOS) method. Using two asynchronously-controlled femtosecond lasers, the theoretical limit of frequency resolution (=82.8 MHz) in THz-TDS is achieved at a measurement time of 10 sec.

### 1. はじめに

テラヘルツ (THz) 時間領域分光法 (THz-TDS) は, THz 電磁波パルスを用いた代表的な周波数分光計測法である. 従来の THz-TDS では, 機械式ステージを用いた時間遅延走査を行うことにより, まず THz パルス電場の時間波形を取得し, 得られた時間波形をフーリエ変換することにより強度と位相のスペクトル波形を得る. THz-TDS の周波数分解能は測定時間窓の逆数によって決定されるため, 機械式ステージを用いた手法では測定時間短縮と周波数分解能向上の間にはトレードオフの関係があった. 我々は, このようなトレードオフを解消する手段として, 非機械式時間遅延走査が可能な非同期光サンプリング法 (AOS 法) に着目した<sup>[1]</sup>. 前回は AOS 法を実現するためのフェムト秒光サンプリング光源に関して報告した<sup>[2]</sup>. 今回は, AOS 法を THz-TDS に適用した AOS-THz-TDS<sup>[3]</sup>について報告する.

### 2. AOS-THz-TDS 法

AOS-THz-TDS 法では, 2 台のモード同期レーザーを用いることにより時間遅延走査用機械式ステージを省略できるため, 機械式時間遅延走査に起因するトレードオフがなくなり, THz-TDS の理論限界周波数分解能 (=モード同期周波数) と高速測定を同時に実現できる. 測定原理を Fig.1 に示す. THz パルス, プローブパルスのモード同期周波数を  $f_1, f_2$ , 両者のモード同期周波数の差を  $\Delta$  とおく. 両者のモード同期周波数がわずかに異なるため, 両者の時間的重なりはパルス毎にサンプリング間隔 (S) だけシフトしていくことになり, 時間的にスケール拡大された THz パルス信号をオシロスコープで直接観測できる [拡大率  $M=(1/\Delta)/(1/f_1)=f_1/\Delta$ ]. ここで  $S=(1/f_2)-(1/f_1)=\Delta/(f_1f_2)$  であるので, THz-TDS の周波数レンジはその逆数  $1/S=(f_1f_2)/\Delta$  となる. またサンプリング周期はモード同期周波数差の逆数 ( $1/\Delta$ ) となり, 周波数分解能は  $\Delta$  によらず常に理論限界値であるモード同期周波数 ( $f_1$ ) を達成できる.

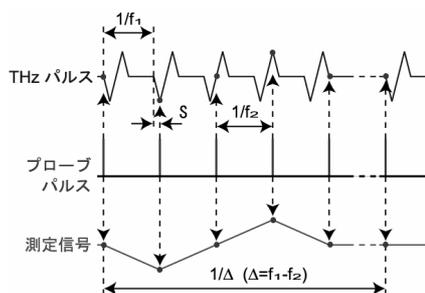


Fig.1 Principle of AOS-THz-TDS method.

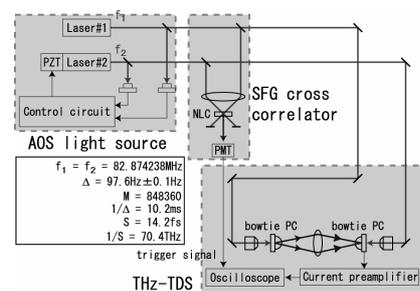


Fig.2 Experimental setup of AOS-THz-TDS.

### 3. 実験装置

Fig. 2 に AOS-THz-TDS のセットアップを示す. AOS-THz-TDS は, AOS 光源, SFG (和周波発生光) 相互相関計, THz-TDS システムという三つの要素から構成されている. AOS 光源は, モード同期周波数差がある値で一定となるように高精度制御された二台のモード同期チタン・サファイアレーザー ( $f_1 \approx f_2 \approx 82.874238\text{MHz}$ ,  $\Delta = 97.6 \pm 0.1\text{Hz}$ ) からなる. SFG 相互相関計では, 二台のレーザー出力光の一部を非線形光学結晶 (NLC) に入射し, 発生した SFG 光を時間原点トリガー信号として使用する. THz-TDS では, AOS 光源からの 2 つのレーザー光を THz パルス発生用とプローブパルスとしてそれぞれ利用する. THz パルスの発生および検出

には、狭帯域・高効率のボウタイ型光伝導アンテナを使用した。AOS法の原理に基づき時間的に拡大されたTHzパルスは、SFG信号をトリガーとしたデジタル・オシロスコープによって直接測定される。従来のTHz-TDSに対して、機械式ステージとロックインアンプが省略されている。

#### 4. 実験結果

Fig.3(a)は、デジタル・オシロスコープ内で10回、100回、1000回の積算化処理を施したTHzパルス電場の時間波形（時間窓300ps）を示しており、それぞれの測定時間は100ms、1s、10sである。水平軸の上部はオシロスコープ上での時間軸であり、下部は時間拡大率M(=848, 360)を用いて実際の時間軸に換算されている。積算回数を増やすことによってSN比が向上している様子が確認できる。Fig.3(b)は単一スイープ（測定時間10ms）での時間波形にスムージング処理を施したもので、単一スイープでの測定も十分に可能であることが分かる。Fig.4(a)はパルス周期(=12.1ns)の時間窓で測定されたTHzパルスの時間波形である(1000回積算、測定時間10秒)。この時間波形をフーリエ変換して得られた振幅スペクトルがFig.4(b)である。比較のため、従来の機械ステージ式THz-TDSにより得られたスペクトル（時間窓100ps、測定時間約5分、周波数分解能10GHz）をFig.4(c)に示す。両者の比較から、AOS-THz-TDSによってTHz振幅スペクトルが正確に測定できていることが確認できる。しかしながらAOS-THz-TDSでは、従来法に比べて大幅に短い測定時間で理論限界周波数分解能(=モード同期周波数=82.8MHz)を達成できている。

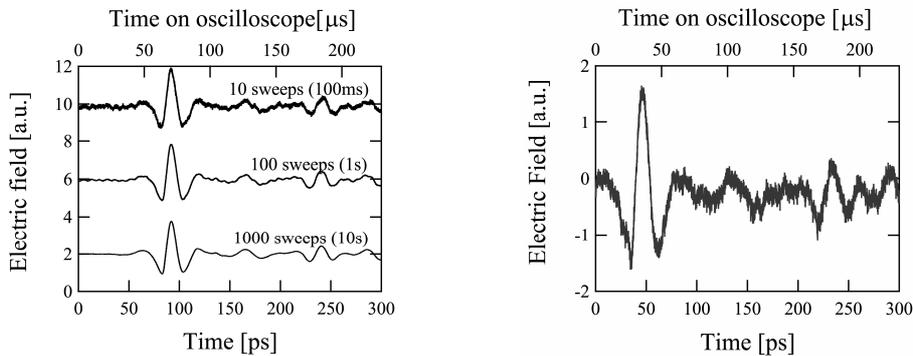


Fig.3 Temporal waveform with temporal window of 300ps.

(a)10-sweep,100-sweep,1000-sweep (b)Single sweep with signal smoothing

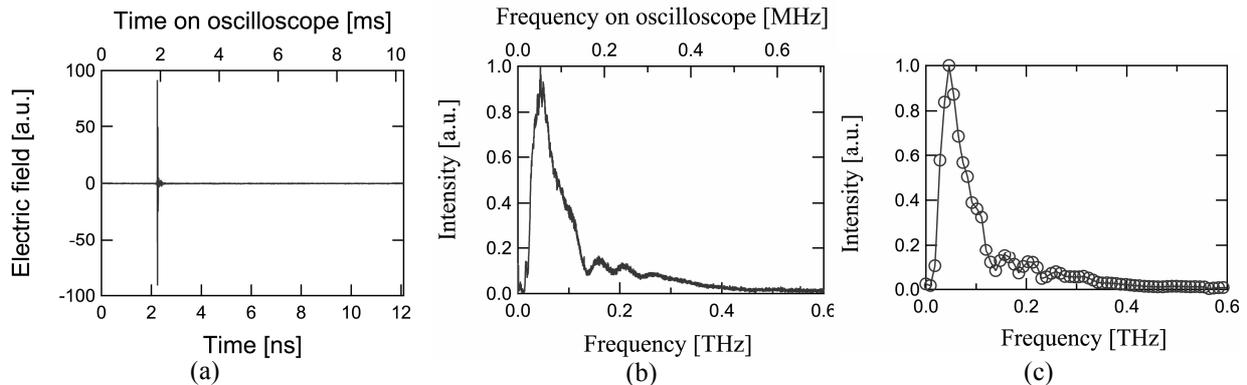


Fig.4 (a)Temporal waveform with temporal window of pulse period(=12.1ns). (b)Amplitude spectra measured by AOS-THz-TDS. (c) Amplitude spectra measured by stage-scanning THz-TDS.

#### 5. まとめ

従来のTHz-TDSにおける周波数分解能向上と測定時間短縮のトレードオフを解消する手段として、フェムト秒非同期光サンプリング法を用いた高速・超高分解テラヘルツ時間領域分光法に関して報告した。本手法は、超高分解THz分光やTHz周波数標準として有用と考えられる。

本研究は総務省SCOPE（戦略的情報通信研究開発推進制度）より援助を受けた。

#### 文献

- [1] Y. Takagi and S. Adachi, "Subpicosecond optical sampling spectrometer using asynchronous tunable mode-locked lasers", Rev. Sci. Instrum., Vol. 70, No.5, p2218-2224 (1999).
- [2] 實吉永典, 安田敬史, 安井武史, 荒木勉, "非同期光サンプリング式テラヘルツ時間領域分光法のためのフェムト秒光サンプリング光源の開発", Optics Japan 2004 講演予稿集, 5aP6, pp.372
- [3] T. Yasui, E. Saneyoshi and T. Araki, "Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition", Appl. Phys. Lett., Vol. 87, 061101 (2005).