

## 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

### Femtosecond optical sampling light source for terahertz time domain spectroscopy based on the asynchronous optical sampling method.

○實吉永典, 安田敬史, 安井武史, 荒木勉

○Eisuke Saneyoshi, Takashi Yasuda, Takeshi Yasui and Tsutomu Araki

阪大院・基礎工

Grad. Sch. of Engg. Sci., Osaka Univ.

E-mail: saneyoshi@sml.me.es.osaka-u.ac.jp, <http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/>

We propose a high-frequency-resolution terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) based on asynchronous optical sampling method. To achieve the proposed method, we develop a femtosecond optical sampling light source comprised of two mode-locked Ti:Sapphire lasers, whose difference of mode-locked frequency is stabilized by a PLL control. The basic characteristic is evaluated by optical-sampling SHG cross-correlation measurement of the two lasers.

#### 1. はじめに

テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) はテラヘルツ電磁波パルスを用いた代表的な周波数計測法である<sup>[1]</sup>. この手法では, まず THz パルスの電場時間波形を取得し, これをフーリエ変換することにより振幅と位相のフーリエスペクトルを得る. この場合の周波数分解能は時間遅延量 (時間窓) の逆数により決定されるが, 時間遅延に機械式ステージを用いる従来の THz-TDS システムでは限られたステージストローク量のため, 高い周波数分解能を得ることが困難であった. 分解能向上のためには時間遅延量の増大が必要となるが, 機械式時間遅延操作法では時間遅延量と走査速度にトレードオフが存在するため現実的ではない. 我々は, このようなトレードオフを解消し高周波数分解能 THz-TDS を実現する手法として非機械式時間遅延操作法を可能にする光サンプリング法<sup>[2]</sup>に着目し, これに基づいた非同期光サンプリング式 THz-TDS に関する研究を行っている<sup>[3]</sup>. 今回は, 本手法を実現するために必要なフェムト秒光サンプリング光源の開発に関して報告する.

#### 2. 測定原理

測定原理を Fig.1 に示す. 光サンプリング法では, 繰り返し周波数のわずかに異なる 2 台の独立したパルスレーザーを用いる. 2 台のレーザーを THz 発生用 (THz パルス) と THz 検出用 (プローブパルス光) の各々に用いると, THz パルス (繰り返し周波数  $f_1$ ) とプローブパルス光 (繰り返し周波数  $f_2$ ) の重なるタイミングはパルス毎に自動的にずれていくことになり, 非機械的な時間遅延が可能となる. この時のサンプリング間隔  $S$  は  $S=1/f_2-1/f_1=\Delta f/f_2$  であるので, THz-TDS の周波数レンジ  $F_{range}$  は  $F_{range}=1/S=f_2/\Delta$  となる. 最大時間遅延 (パルス周期) を得るために必要な時間は, 両レーザーの繰り返し周波数の最小公倍数  $1/\Delta$  である. また, 本手法では常に最大時間遅延 (= パルス周期) を与えることになるので, 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が達成可能である.

#### 3. フェムト秒光サンプリング光源

光サンプリング法を実施するためには 2 台のフェムト秒レーザー光源の繰り返し周波数差 ( $\Delta$ ) が常に一定に保たれる必要があるが, 一般にフリーラン状態では繰り返し周波数は一定ではなく共振器長の機械的振動や熱ドリフトにより変動する. したがって, 両者の周波数差を任意の値に制御可能なフェムト秒光サンプリング光源が必要となる.

Fig.2 にフェムト秒光サンプリング光源の構成を示す. ここで, Laser#1 (Spectra Physics, MaiTai, 繰り返し周波数 =  $f_1 \approx 80\text{MHz}$ ) は参照用モード同期 Ti:S レーザー, Laser#2 (Avesta Project, TiF-Kit-100, 繰り返し周波数 =  $f_2 \approx 80\text{MHz}$ ) は制御用モード同期 Ti:S レーザーである. Laser#2 のアウトプット・カプラーに貼り付けた piezo素子 (PZT, ストローク =  $6\mu\text{m}$ , 共振周波数 =  $5\text{kHz}$ ) で共振器長を制御することにより,  $f_2$  を  $250\text{Hz}$  の範囲内で可変できる. 両レーザー光の繰り返し周波数信号は高速フォトダイオード (PD) により検出される. ここでは繰り返し周波数の変動を拡大するため, 第 10 次高調波 ( $10f_1, 10f_2$ ) を制御信号に用いる. 両レーザーの 10 次高調波信号は電圧制御発振器 (VCO,  $f_{VCO} \approx 800\text{MHz}$ ) とダブル・バランスド・ミキサ (DBM) で乗算され, ローパスフィルター (LPF) を通すことにより両者の差周波信号 ( $10f_1 - f_{VCO}$ ,

$10f_2 - f_{VCO} < 100\text{kHz}$ ) が生成される。さらに、アナログ乗算器と LPF によって両信号の差周波信号 ( $10f_1 - 10f_2 = 10(f_1 - f_2) = 10\Delta \approx 1\text{kHz}$ ) を抽出する。この信号を制御信号として PLL 回路で PZT 共振器長制御を行うことにより、両レーザーの繰り返し周波数がある値で一定に保たれる。

今回は、周波数差 ( $\Delta$ ) として  $97.6\text{Hz}$  を設定した。この場合の光サンプリング式 THz-TDS で、 $F_{\text{range}}$  は  $66\text{THz}$ 、最大時間遅延量を得るのに必要な時間は約  $10\text{ms}$ 、また周波数分解能は  $80\text{MHz}$  となる。

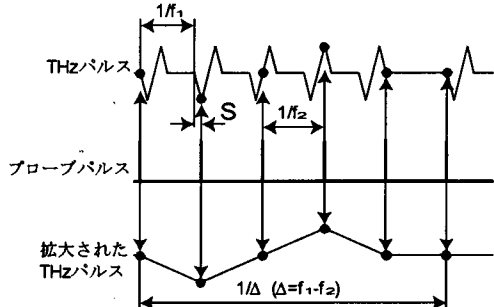


Fig. 1 Principal of optical sampling method

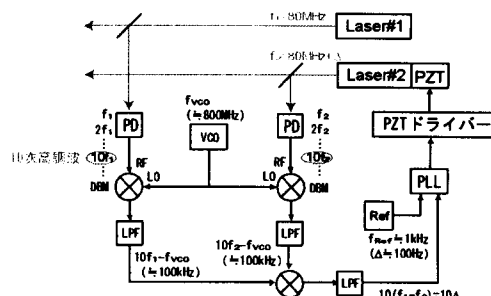


Fig. 2 Experimental setup.

#### 4. 実験結果

まず、今回開発を行ったフェムト秒光サンプリング光源の基本特性評価を行った。Fig.3 は、レーザー制御前後の周波数差の時間変動を表している。lock をかけると直ちに設定値 (=97.6Hz) に安定化されている様子が確認できる。

次に、光サンプリング式 THz-TDS の予備実験として、フェムト秒光サンプリング光源を構成する両レーザーを用いた光サンプリング式 SHG 相互相関測定を行った。Fig.4 は測定結果を示しており、Fig.4(a)はパルス周期に相当する時間波形 (フルスケール 12ms)、Fig.4(b)は SHG 相互相関波形のみを拡大したもの (フルスケール 500ns) である。パルス周期に相当する時間遅延量をリアルタイム (10ms) で得られている様子が確認できる。

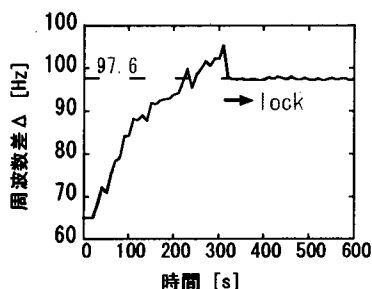
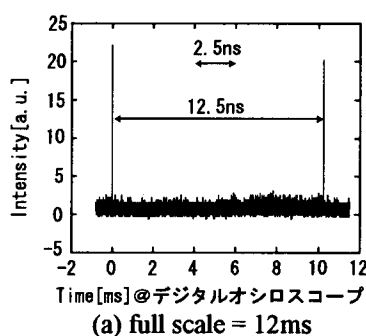
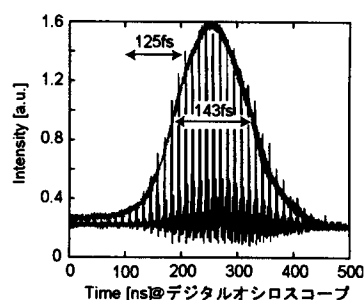


Fig. 3 Temporal change of frequency difference



(a) full scale = 12ms



(b) full scale = 500ns

Fig. 4 Results of optical-sampling SHG cross-correlation measurement.

#### 5. まとめ

THz-TDS の高周波数分解能化を実現する手段として光サンプリング式 THz-TDS を提案し、本手法を実現するために必要なフェムト秒光サンプリング光源の開発を行った。制御信号として繰り返し周波数の第 10 次高調波を用いることにより、2 台の独立したフェムト秒モード同期 Ti:S レーザーの繰り返し周波数差が高度に安定化された。また、予備実験として光サンプリング式 SHG 相互相関測定を行い、パルス周期に等しい時間遅延量をリアルタイムに与えることが可能であることを確認した。今後はフェムト秒光サンプリング光源と THz-TDS を複合した光サンプリング式 THz-TDS に関する研究を行っていく予定である。

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] 阪井清美, “テラヘルツ時間領域分光法”, 分光研究, 第 50 巻 (第 6 号), pp. 251-273 (2001).
- [2] 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).
- [3] 實吉永典, 安田敬史, 安井武史, 荒木勉, “光サンプリング式テラヘルツ時間領域分光法 (I) - フェムト秒光サンプリング光源の開発 -”, 平成 16 年秋季応物学会予稿集, 3p-ZD-2, pp. 985.