

光伝導アンテナを用いた非同期光サンプリング テラヘルツ時間領域分光法の広帯域化

古澤慧^A, 松原英一^A, 芦田昌明^{A, B}
阪大院基礎工^A, JSTさきがけ^B

Enhancement of spectral bandwidth in asynchronous optical sampling
Terahertz time-domain spectroscopy

K. Furusawa^A, E. Matsubara^A, M. Ashida^{A, B}
Osaka University^A, PRESTO JST^B

We have demonstrated terahertz time-domain spectroscopy system with an enhanced spectral bandwidth based on an asynchronous optical sampling using photoconductive antennas for emitter and detector. The spectrometer uses two mode-locked Ti: sapphire lasers whose repetition rates are controlled and no mechanical delay line. The lasers' pulse durations were approximately 20fs at a repetition rate of 80MHz. We observed high-resolution spectra up to 3THz without tradeoff between frequency resolution and data acquisition time.

1. はじめに

テラヘルツ領域 (周波数 0.1~10THz) には様々な物質の振動モード、超伝導ギャップなどが存在し、それらの物性情報を調べるために、盛んに分光測定が行われている [1]。この周波数帯でパルス電場を用いた方法としてテラヘルツ時間領域分光法 (Terahertz time-domain spectroscopy: THz-TDS) がある。この分光法ではテラヘルツ電場の時間波形を観測するので、それをフーリエ変換することによって各周波数の振幅・位相を同時に得ることができる。そのため Kramers-Kronig 変換することなく複素誘電率などを直接得ることが可能である。

THz-TDS において、テラヘルツ電場の時

間波形を得るためにはポンプ光とプローブ光の間の時間差を変える必要がある。一般的に、この時間遅延を得るためには機械式のステージを使って、一方のレーザー光の光路長を変える。しかし、この機械式のステージを使った THz-TDS の場合、より広い時間領域で電場波形を観測するには、ステージをより大きく動かさなければならない。結果、広い時間窓で電場波形を得るには測定時間がかかることになる。THz-TDS における周波数分解能はフーリエ変換する測定時間窓の逆数で決まる。つまり、機械式のステージを使った THz-TDS では周波数分解能と測定時間の間にトレードオフの関係が生じてしまうことになる。

このトレードオフの問題を解消するため

に、非同期光サンプリング法 (AOS: **Asynchronous optical sampling**) を応用した THz-TDS が近年報告されている[2][3]。AOS では繰り返し周波数のわずかに異なる 2 台のレーザーを用いる。この 2 台のレーザーをポンプ光、プローブ光のそれぞれに用いる場合、繰り返し周波数の差によって時間差が自動的についていくことになる。そのため AOS-THz-TDS では周波数分解能と測定時間の間のトレードオフの関係は緩和され、従来の手法に比べて、短い測定時間で高い周波数分解能を達成できる。

我々は光伝導アンテナを用いた広帯域 THz-TDS システムを開発している[4]。そこで本研究では光伝導アンテナを用いて AOS-THz-TDS におけるスペクトルの広帯域化を目的とした。現在報告されている光伝導アンテナを用いた AOS-THz-TDS のスペクトル帯域は 3THz 程度であり、この時パルス幅 50fs の Mode-locked Er-doped fiber レーザーを用いている[5]。本研究ではパルス幅約 20fs の Mode-locked Ti:Sapphire レーザーと広帯域検出に有効なダイポール型の光伝導アンテナを用いてスペクトル帯域の広帯域化を目指した。

2. 実験方法

本研究ではプローブ光 (laser1) にパルス幅 16fs の Mode-locked Ti: Sapphire レーザーを、ポンプ光 (laser2) にパルス幅 25fs の Mode-locked Ti: Sapphire レーザーを用いた。繰り返し周波数はどちらも 80MHz 程度である。テラヘルツ波発生にはストリップライン型 (ギャップサイズ: ~500 μ m) の光伝導アンテナ、検出にはダイポール型 (ギャップサイズ: ~6 μ m) の光伝導ア

ンテナを用いた。図 1 に実験配置の概略図を示す。

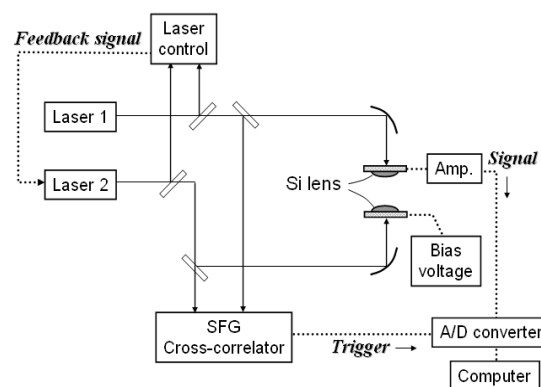


図 1 実験配置概略図。和周波光(SFG)の信号をトリガーとして使い、アンテナからの信号と同時に A/D 変換して時間波形を取得する。

本研究では信号強度を上げるため、テラヘルツ波がアンテナ基板を透過する配置を取り、シリコンレンズを用いてテラヘルツ波の集光を行った。レーザーの繰り返し周波数の安定化制御と和周波光 (SFG) 発生のために、レーザー光の一部をビームスプリッターで分けており、2 台のレーザーの繰り返し周波数差 ($\Delta=f_1-f_2$) はフィードバック回路によって安定化制御されている ($\Delta \approx 80\text{Hz}$)。制御の精度向上の為に、本研究ではモード同期周波数の 42 倍高調波を同期に用いている。また、それぞれのレーザー光を BBO 結晶 ($4 \times 4 \times 7\text{mm}$) にレンズで集光し、発生する和周波光を高速のフォトダイオードで検出している。得られた和周波光の信号はテラヘルツ電場波形の時間原点を決めるトリガーの信号として用いられる。検出アンテナからの信号はアンプで増幅した後、トリガーの信号と同時に A/D 変換することで電場波形を取得している。

3. 実験結果と考察

図 2 に実験で得られたレーザー光同士の相互相関波形を示す。

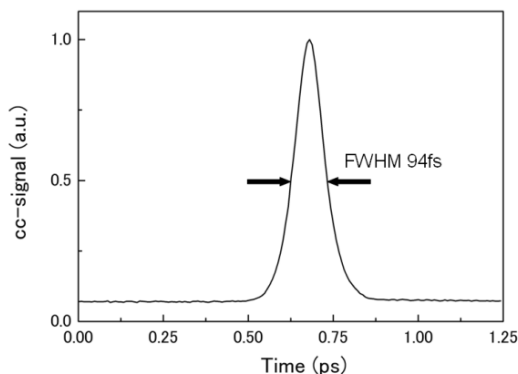


図 2 レーザー同士の相互相関波形(512 回積算)。得られた波形の半値全幅は 94fs である。

実験で得られた相互相関波形の半値全幅は 94fs であった。レーザーのパルス幅がそれぞれ 16fs、25fs であり、半値全幅がレーザーのパルス幅に比べて広がっているのが分かる。これは同期している 2 台のレーザーの繰り返し周波数差の揺らぎによるものである。つまり、この和周波光の信号のパルス幅が、繰り返し周波数差の制御の精度を示している。この信号を時間原点を決めるトリガーとして用いるので、この実験で得られる時間波形の原点付近での時間分解能は 100fs 程度であると考えられる。

図 3 (a)に AOS-THz-TDS で得られたテラヘルツ電場の 400ps の時間波形を示す(20000 回積算、測定時間 250 秒)。(b)は(a)の時間波形の原点付近 40ps を拡大したものを示している。機械式のステージを使う手法の場合、時間遅延にして数十 ps のものが一般的であるが、AOS を THz-TDS に応用することによって、ステージを使う手法に比べて 400ps という長い時間領域を短い測定時間で観測できていることが分かる。

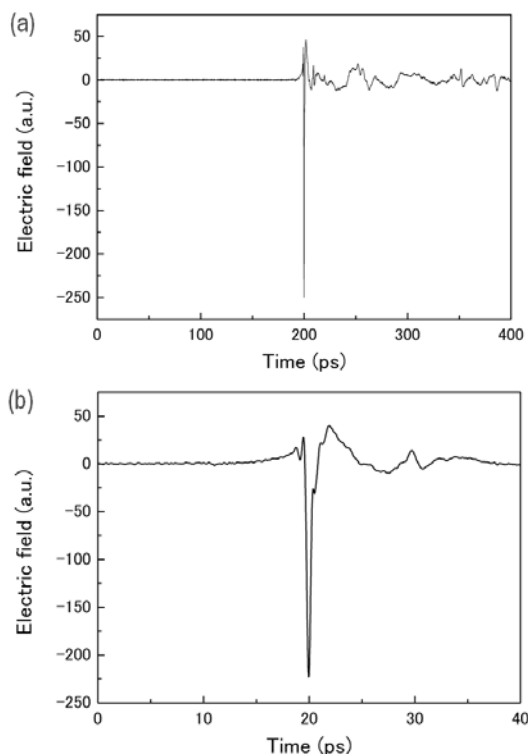


図 3 (a) AOS-THz-TDS で得られたテラヘルツ波の時間波形 (時間窓 400ps、20000 回積算、測定時間 250 秒)。(b) 時間波形の原点付近を拡大したものを示している (時間窓 40ps)。

次に、AOS-THz-TDS で得られた 400ps の時間波形をフーリエ変換したスペクトルを図 4 (a)に示す。実線がテラヘルツ波のスペクトルを表しており、点線はポンプ光を切った時の時間波形をフーリエ変換したものである。時間波形 400ps をフーリエ変換しているのでスペクトルの周波数分解能は 2.5GHz ($=1/400ps$) である。スペクトル帯域はノイズレベルと比較して 3THz 程度まで観測できているのが分かる。次に 40ps の時間波形をフーリエ変換したスペクトルを図 4 (b)に示す。こちらはノイズレベルと比べて 4THz 程度まで帯域が広がっているのが分かる。これは、フーリエ変換する時間領域によってノイズレベルが変化するこ

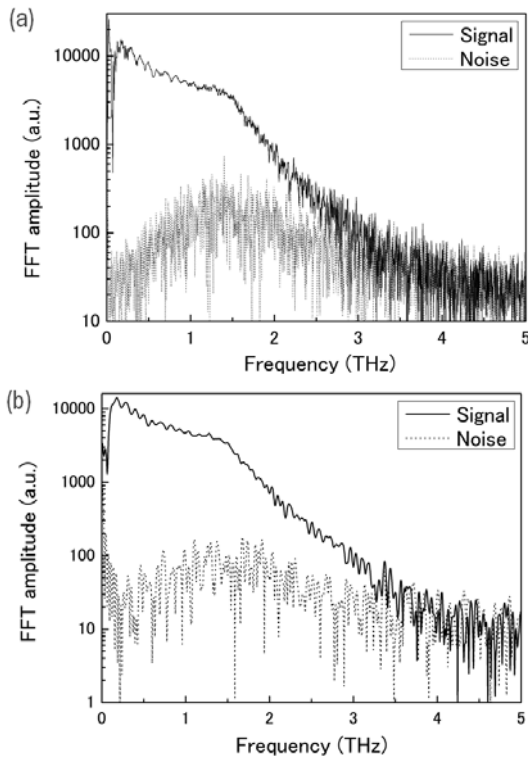


図4 (a) AOS-THz-TDS 得られた時間波形のフーリエ変換スペクトル (周波数分解能 2.5GHz)。
(b) 原点付近 40ps の時間波形のフーリエ変換スペクトル (周波数分解能 25GHz)。

とに起因していると考えられる[6]。本研究でもフーリエ変換の時間領域を変えて、テラヘルツ波の振幅スペクトルに変化は無いが、ノイズレベルは変化しているのが観測されている。結果、40ps の時間波形のフーリエ変換スペクトルでは分解能は下がるが、ダイナミックレンジが上がる事で広帯域化されている。本研究で得られた 4THz 程度のスペクトル帯域は光伝導アンテナの基板である LT-GaAs のフォノン吸収によって制限されていると考えられる。光伝導アンテナ基板の吸収を避ける反射型の配置をとれば更なる広帯域化が可能であると考えられる[4]。

4. まとめ

本研究では、パルス幅 20fs 程度のレーザーと広帯域検出に有効なダイポール型の光伝導アンテナを用いて、AOS-THz-TDS スペクトルの広帯域化を行った。レーザー同士の繰り返し周波数差は 50Hz で安定化制御され、それらの相互相関波形の半値全幅は 94fs であった。AOS を THz-TDS に応用することによって測定時間と周波数分解能のトレードオフは解消され、2.5GHz の周波数分解能のスペクトルを測定時間 250 秒で観測した。短パルスのレーザーを用いることで光伝導アンテナ発生・検出による AOS-THz-TDS で 3THz に及ぶスペクトルの観測を行った。また、25GHz の周波数分解能のスペクトルでは 4THz 程度まで広帯域化に成功した。この帯域は光伝導アンテナの基板である LT-GaAs のフォノン吸収によって制限されていると考えられる。

参考文献

- [1] K. Sakai (Ed.): *Terahertz Optoelectronics* (Springer, Berlin, 2005).
- [2] T. Yasui *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 061101 (2005).
- [3] C. Janke *et al.*, *Opt. Lett.* **30**, 1405-1407 (2005).
- [4] M. Ashida, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47**, 8221 (2008).
- [5] T. Yasui *et al.*, *Opt. Lett.* **35**, 1689-1691 (2010).
- [6] J. Xu *et al.*, *Chin. Phys. Lett.* **20**, 1266-1268 (2003)