



Title	超広帯域テラヘルツ波領域分光法
Author(s)	芦田, 昌明
Citation	大阪大学低温センターだより. 2006, 135, p. 1-6
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/12091">https://hdl.handle.net/11094/12091</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# 超広帯域テラヘルツ波時間領域分光法

基礎工学研究科 芦田 昌明 (内線6507)

## 1. 今なぜテラヘルツか

光と電波の中間領域はテラヘルツ波と呼ばれ、近年盛んに研究されている<sup>[1]</sup>。この名称は、その電磁波帯の周波数がテラヘルツ (THz) 領域にあることに由来し、具体的には、0.1THzから10THz程度を指すことが多い。図1にその様子を示す。法律によれば電波は3THzまでと規定されている。サブミリ波より高周波側から遠赤外域が始まることになる。THzという周波数は、次世代超高速光エレクトロニクスターゲットになっており、光ファイバを使った通信技術は10THzを超えるデータ転送を可能にしている。残念ながら、THz帯の電磁波を直接通信に使う場合は、水蒸気の吸収が非常に大きいため、長距離伝播は困難であるという問題を抱えている。しかし、見方を変えれば、傍受されにくい室内用超高速通信へ応用できるとも考えられる。

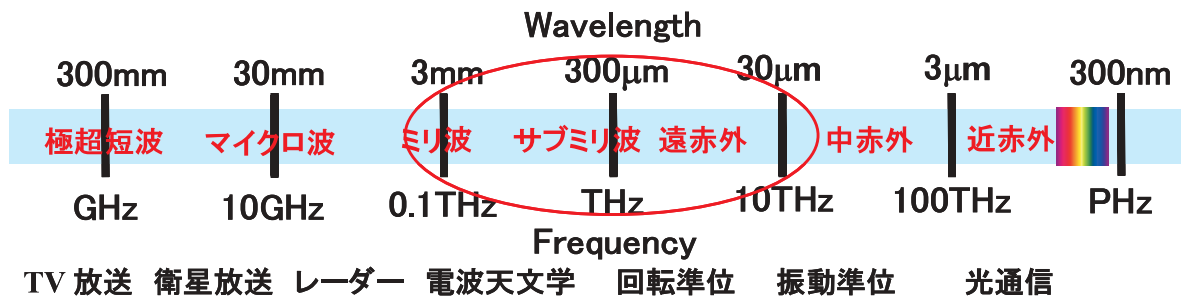


図1 テラヘルツ波を中心に見た電磁波スペクトル

一方、基礎科学にとっては他の周波数帯と同様、重要な領域であり、赤外線あるいは電波天文学における数多くの発見は有名である。また、キャリアの応答、超伝導ギャップ、高分子 (DNA、蛋白質、糖など) の吸収の指紋領域などが存在し、物性科学にとっても欠かせない周波数帯である。最近では、バイオテクノロジーへの適用、例えば、薬品の同定 (特に結晶多形の解析)、ラベルフリーDNA分析などが検討されている。

さらに、(A) 可視域で不透明な多くの物質 (プラスチック、紙、セラミック、脂肪、半導体等) を透過する、(B) 可視・近赤外光よりも散乱の影響を受けにくい、従って、(C) 粉体を透過する、といった特性を有するため、安心・安全を指向する現代社会において、セキュリティチェック装置への応用が始まっている。同様の用途に使われてきたX線に比べて人体への安全性が格段に高いこ

とも関心が集まっている一因である。

こうした幅広い関心・需要を喚起するに至ったのは、最近の超短パルスレーザー技術、非線形光学の急速な発展と相俟って、テラヘルツ波技術がここ十年で目覚ましい発達を遂げたからである。最近の展開の1つとして、本稿では光伝導アンテナを用いた超広帯域時間領域分光法について紹介させていただきたい。

## 2 . 時間領域分光法とは

テラヘルツ周波数帯では、時間領域分光という新規手法が広く用いられ始めている。テラヘルツ波パルスの電場の時間応答を直接測定し、そのフーリエ変換からスペクトル情報を求めるというもので、強度のみしか検出できないこれまでの赤外分光法と比べて、位相情報も得られるのが特徴である。実は、こうしたパルス電磁波を用いた測定はNMRでは既に標準的になっているが、ラジオ波と違ってテラヘルツ波電場を直接検出することは不可能で、超高速レーザーの利用が必須となる。近年の超短パルスレーザー技術の広がりがテラヘルツ時間領域分光法の普及をもたらした。具体的な手法は次節で紹介するが、その利点は以下の通りである。(A) 透過または反射測定の際に電場の位相変化も分かり、強度変化と併せて2つの情報を得ることに対応する。従って、誘電関数の実部と虚部、例えば吸収係数と屈折率などが同時に求められ、この際、クラマース - クローニッチ変換、エリプソメトリーなどを行う必要がない<sup>[1]</sup>。パルス波を使用しているため、(B) 背景輻射の影響がなく、検出素子は室温で動作、(C) 広いスペクトル領域を一度に測定可能、(D) 試料内部のパルス波伝播の様子を追跡しながら解析処理が可能(具体的には、試料表面での多重反射の影響を分離可能など) (E) 超高速ポンプ - プロブ分光\*への展開が容易、などの特徴をもつ。

これまで、この分光法の適用範囲は数THz程度までに限定されていたが、最近、中赤外域をカバーして100THzを超える超高周波域まで時間領域分光法を拡張する試みが行われつつある<sup>[2]</sup>。以下では、我々のグループが独自に開発を進めている、電波領域でお馴染みのアンテナを使って赤外光の電場を直接検出する手法について紹介する。

## 3 . 光伝導アンテナ

テラヘルツ波時間領域分光法は大きく分けて2通りある。光伝導アンテナと呼ばれる素子を使う方法と非線形光学を用いるEOサンプリング法である。前者の概略を図2に示す。低温成長GaAsのようなキャリアの寿命が短い基板上に、金などでアンテナ構造を作製する。その中央部にはギャップが存在し、そこにゲート光が照射されたときに光キャリア $N(t)$ が生成される。その部分にテラヘルツパルス電場 $E(t)$ が入射すると、キャリアは電場によって加速され、平均電流 $J$ が流れることになる。その関係は以下の式で表される。

$$J = e\mu N(t)E(t) \quad (1)$$

ここで $e$ ,  $\mu$ はキャリアの電荷、移動度である。また、 $\tau$ はゲート光とテラヘルツパルスの時間遅延に対応する。ここで、ゲート光パルスの時間幅と基板の光キャリアの寿命が入射電場の時間変化

に対して無視できる程短ければ、 $N(t)$ をデルタ関数で置き換えて、

$$J(t) = e\mu E(t) \quad (2)$$

となる。従って、アンテナからの平均電流は、符号も含めて入射テラヘルツ電場の瞬間値に比例し、ゲート光パルスと入射パルス電場の時間差を走査しながら電流値を測定すれば、テラヘルツ電場の時間応答が得られることになる。

一方、EOサンプリング法（以下、EO法）の原理は以下の通りである。テラヘルツ電場によって電気光学(EO)

効果\*がEO結晶に生じ、屈折率が変化する。この変化を同時に入射するプローブ光パルスの偏光状態の変化として検出し、テラヘルツパルスとプローブ光パルスの時間遅延を走査することによって電場の時間応答を得る。純光学的測定であるため、100THzに及ぶ超高周波検出には有利と考えられてきたが<sup>[2]</sup>、一方の光伝導アンテナを用いる手法の利点は以下の通りである。(A) 滑らかなスペクトル応答が得られる。EO法では、EO結晶のフォノン吸収で検出できない領域が存在する。(B) 素子が丈夫である。EO法の広帯域測定では、位相整合条件\*のため、非常に薄く(< 0.1mm)脆弱な結晶を使用する必要がある。(C) 単一の素子を使用しているため、光学調整が容易である。EO法では偏光子と光検出器の組合せが必要で、調整は複雑かつ困難になる。我々はこうした特徴に注目し、光伝導アンテナ検出の広帯域化を進めてきた。

#### 4 . 超広帯域テラヘルツ波検出

式(1)において、 $E(t)$ の時間変化に対して $N(t)$ が有限の幅を持つ場合、アンテナからの電流はどのようなようになるであろうか。例えば、レーザーのパルス幅は十分に短い、生成された光キャリアの寿命が非常に長い場合、 $N(t)$ はヘヴィサイドの階段関数と見なすことができる。この場合の電流 $J$ は以下のように表せる。

$$\frac{dJ(t)}{dt} = e\mu E(t) \quad (3)$$

両辺にフーリエ変換を施すと、角振動数を  $\omega$  として、

$$j\omega J(\omega) = E(\omega) \quad (4)$$

となる。従って、感度は振動数に逆比例して低下するものの、レーザーのパルス幅が短ければ、キャリアの寿命に制限されず高周波成分まで計測可能であることがわかる。

こうした予想の元に、我々はパルス幅10fs程度と非常に短いモード同期チタンサファイアレーザー\*を用い、光伝導アンテナの検出限界を調べた。超広帯域赤外光パルスの発生法も重要で、ここでは厚さ30  $\mu$ mのGaSe結晶の光整流\*を用いた。その結果を図3(a)に示す<sup>[3]</sup>。10fs程度の超高周

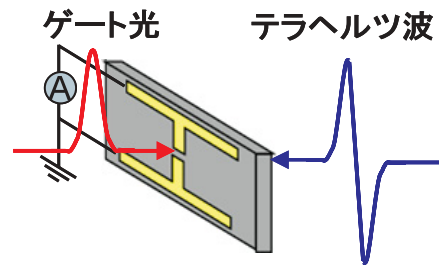


図2 光伝導アンテナによる検出の概念図  
本研究で用いたアンテナ構造は図の通りダイポール型で、長さは30  $\mu$ m、ギャップは5  $\mu$ mであった。本実験ではこの図と異なり、ゲート光とテラヘルツ波は同方向から入射した。

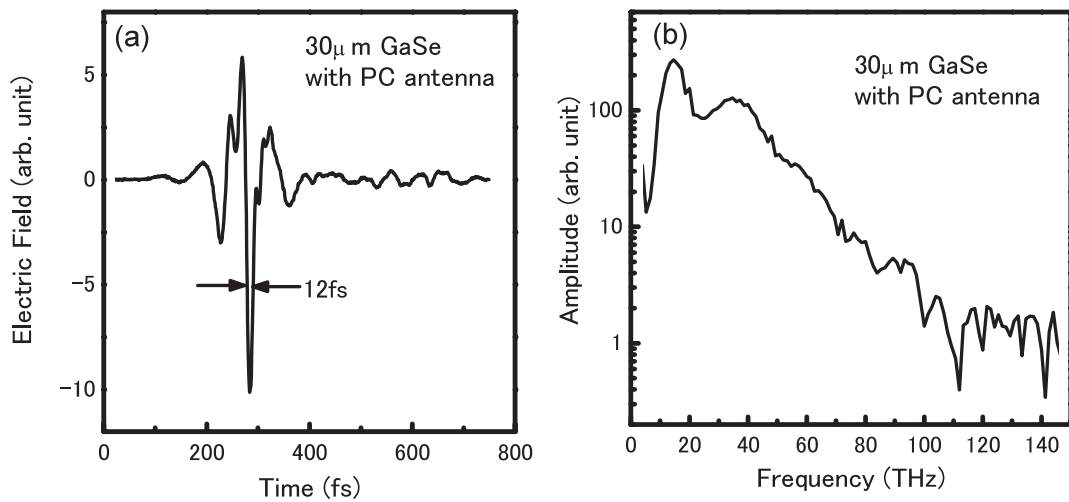


図3 光伝導アンテナで検出したテラヘルツパルス電場の時間応答 (a) とそのフーリエ変換スペクトル (b) 20-30THz付近のディップは位相整合条件\*によるものである。10THz以下の強度低下はGaSe結晶の吸収による。

波成分が検出されている。また、主たる構造の幅も200fs以下で、超高速現象の追跡が可能であることが分かる。この時間応答のフーリエ変換を行ったスペクトルが図3(b)である。予想通り高周波側の強度が低下しているが、100THz程度まで検出できている。これはアンテナを用いた電場時間応答の直接検出としては最も周波数の高い実験結果であり、膨大な蓄積のあるアンテナ工学の成果を赤外域にまで適用できる可能性を秘めている重要な成果であると考えている。

ここで、10THz以下の強度の低下はGaSe結晶の吸収によるものである。低周波側の感度を明らかにするために、発生源にも光伝導アンテナを用いた実験結果を図4に示す<sup>[4]</sup>。図2において、電流計の代わりに電源をつなぎ、電圧を印加した状態で超短パルスレーザーをギャップに入射すると、瞬時電流が流れると同時に電磁波が発生する<sup>[1]</sup>。まさにヘルツの実験そのものである。これまでのところ、光整流よりは低周波域までしか発生できていないが、スペクトル応答は0.1THzか

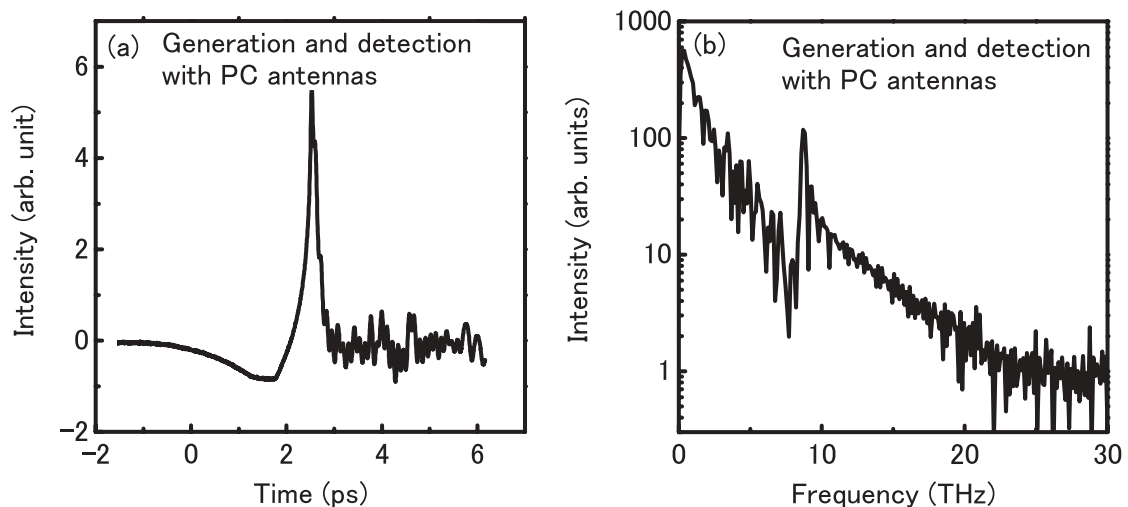


図4 光伝導アンテナで発生・検出したテラヘルツパルス電場の時間応答 (a) とそのフーリエ変換スペクトル (b) 10THz以下に見られる多くの鋭いスペクトル構造は水蒸気や炭酸ガスの吸収による。

ら25THz程度まで(8-10THz付近のGaAs基板の反射構造を除いて)滑らかな減衰曲線を示していて、光伝導アンテナはこの範囲においても切れ目なしに感度をもっていることがわかる。先の結果と合わせると、光源の取り替えは必要なものの、0.1THzから100THzの3桁にも及ぶ周波数領域(エネルギーでは0.41meVから410meVまで)を1個の光伝導アンテナで検出可能であることが明らかとなった。図1で見ると、ミリ波から中赤外までの広い領域をカバーしている。また、スペクトル応答は単調な変化をしているため、光伝導アンテナによる検出は超広帯域赤外分光測定に適している。

## 5 . おわりに

現在はさらなる広帯域化の可能性を探ると共に、物性研究への適用を進めている。本研究で検出に成功した周波数範囲は、高温超伝導体のギャップもカバーしており、広いエネルギースケールで大きな変化を示す強相関電子系などの光学測定に応用が可能であると考えられる。また、この手法を用いてポンプ - プローブ分光\*を行い、金属 - 絶縁体転移、超伝導転移など、光誘起相転移現象の時間分解測定を行うことを準備中である。

以前、強相関電子系の研究を本誌<sup>[5]</sup>で紹介させていただいた際に、「広帯域光源とその検出系の開発を進めており、詳細は別の機会に紹介させていただければ...」と書いた。本稿はまさにそれに当たるものである。

本稿の内容は、伊藤研究室の大学院生、土井厚志君と下里弘君の修士論文の仕事が中心となっており、伊藤正教授、並びに独立行政法人情報通信研究機構未来ICT研究センターの齋藤伸吾主任研究員、阪井清美元特別研究室長らとの共同研究によるものである。また、本研究は文部科学省科学研究費補助金、並びに科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業さきがけの援助を受けて行われた。

## 参考文献

- [ 1 ] K. Sakai ed., *Terahertz Optoelectronics*, ( Springer, 2005 ) テラヘルツ波研究の現状が紹介されている。
- [ 2 ] R. Huber, F. Tauser, A. Brodschelm, M. Bichler, G. Abstreiter and A. Leitenstorfer, *Nature* 414, 286 ( 2001 )
- [ 3 ] M. Ashida, A. Doi, H. Shimosato, S. Saito, K. Sakai and T. Itoh, *Conference on Laser and Electro-Optics ( CLEO ) 2005*, CFD3.
- [ 4 ] H. Shimosato, M. Ashida, S. Saito, T. Itoh and K. Sakai, *Ultrafast Optics V*, ( Springer, 2006 ) in press.
- [ 5 ] 芦田昌明、低温センターだより No.126, 11 ( 2004 )

## 用語説明

### ポンプ - プローブ分光

ポンプ光で生成された光励起状態をプローブ光によって探索する分光方法であり、ポンプ光とプローブ光の時間遅延を走査することによって、励起状態の時間変化を追跡できる。使用するパルス光の時間幅で時間分解能が決定するため、fs域に至る超高分解能が得られる。

### 位相整合条件

非線形光学効果を効果的に生じさせるために、入力光と出力光の位相が満たすべき条件であり、本稿では非線形結晶の角度を変化させることにより、その条件を変化させている。一般に広い波長範囲で条件を満足させるためには薄い結晶が必要となる。

### モード同期チタンサファイアレーザー

Tiをドープしたサファイア結晶は650-1100nmの広い領域でレーザー発振を生じる。モード同期という方法を用いるとパルス発振が得られる。発振可能な波長範囲全てを利用することで10fs以下の超短パルスも発生できる。

### 光整流

2次の非線形光学効果によって、2つの入力光のエネルギー差に相当する光 ( $\omega = \omega_1 - \omega_2$ ) を生成する差周波発生の特別な場合で、入力光のエネルギーが縮退している場合である。通常は  $\omega = 0$  の直流電場発生を意味するが、ここでは超短パルス光の広いスペクトル幅  $\Delta\omega$  に対応して、 $\omega$  程度までの周波数をもった光が発生することを表している。