

## 研究課題別評価書

### 1. 研究課題名

光伝導アンテナによる光電場の直接検出

### 2. 氏名

芦田昌明

### 3. 研究のねらい

アンテナは電波の入口として日常生活の様々な場面、例えばテレビや携帯電話などで多用されている。一方、光も電波と同様、電磁波であり、同様にアンテナで検出することができるはずである。アンテナの特徴を活かし、これまでの光検出器にない新奇機能を実現するのが本研究の狙いである。最近、光と電波の境界領域であるテラヘルツ電磁波(0.1-10THz)が注目を集めている。この周波数帯では、時間領域分光という手法が用いられている。電磁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もので、強度のみしか検出できないこれまでの分光法と比べて、位相情報も得られるのが特徴である。例えば、誘電率などの応答関数の測定の際、実部と虚部、二つの情報が同時に得られるという他の手法にない利点を有している。

これほど高い周波数帯では、通常のエレクトロニクス技術は使えないため、光伝導アンテナと呼ばれる半導体基板上に作製されたアンテナ構造を用いる。即ち、その間隙部分に超短パルスレーザーを照射し、いわば回路の開閉を行う(パルス光が当たった瞬間に電流を担うキャリアが発生する)ことを行う。パルス光を照射する時間を少しずつ走査し、ストロボ写真を撮るように、被測定電磁波の電場の瞬間値を記録していく。その結果をパルス光がアンテナに照射される時間を横軸にして描くことで、時間波形を再現できる。これはサンプリングスコープと同じ原理である。この手法をテラヘルツ領域を遙かに超え、光通信波長帯を含む近赤外域、いわゆる光の領域にまで拡張することが本研究の目的である。従来にない検出法として分光技術に画期的な発展をもたらす他、情報通信技術への広い応用が期待される。

#### 4. 研究成果

図1に実験配置の概略図を示す。チタンサファイア(Ti:Sapphire)レーザー(Nanolayers社Venteon UB)は本課題の研究費で購入したもので、チタンサファイア結晶のほぼ全ての利得領域、即ち0.6-1.2 $\mu\text{m}$ の波長範囲で発振するモード同期レーザーであり、時間幅 6fs以下の超短パルスを実現する。これは同種の商用レーザーの中で世界最短のものである。空气中や光学素子を通ずる際、波長によって群速度が異なることから生じるパルスの歪み(チャープ)を補正するため、ダブルチャープミラー(DCM)とBaF<sub>2</sub>結晶を組み合わせ、最適な条件になるように調整した。その際、パルスの時間波形をSPIDER(spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction)法を用いて観測した。得られた最短パルスを図中に示す。余剰成分も存在するが、幅 5fs程度の超短パルスが得られていることが分かる。

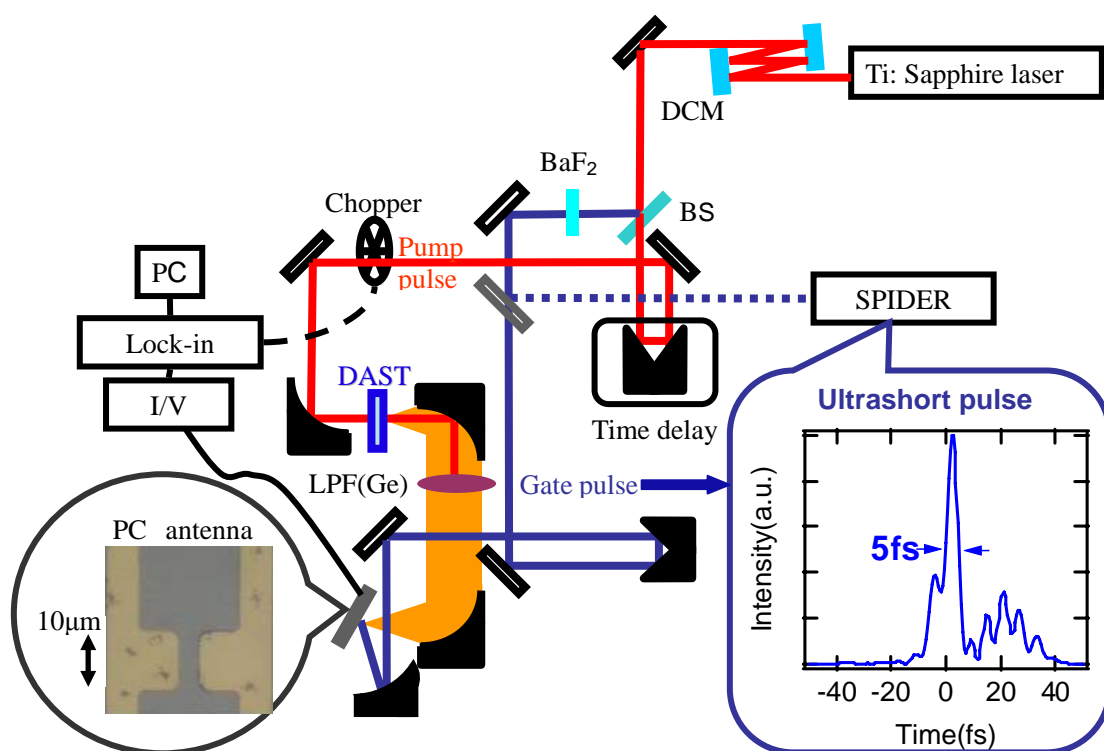


図 1. 実験配置

##### A. 超広帯域赤外パルス光発生

本さきがけ領域の研究総括である伊藤宏昌先生のグループが作製された、非線形性が非常に大きな有機光学非線形結晶 DAST (4-(4-dimethylaminostyryl)-1-methyl pyridinium tosylate)を使用して、光整流過程(パルス光の高い振動数成分が非線形効果の一種である差周波発生によって消失、即ち整流され、その包絡線に対応する電場が発生する過程)によって超広帯域赤外パルス光発生を行った。結晶の厚さが0.4mm程あるため、5fs程度の超短パルスを用いた場合は、結晶内部でのパルス形状の歪み(チャープ)が避けられない。このため、レーザーパルスに予め結晶内部

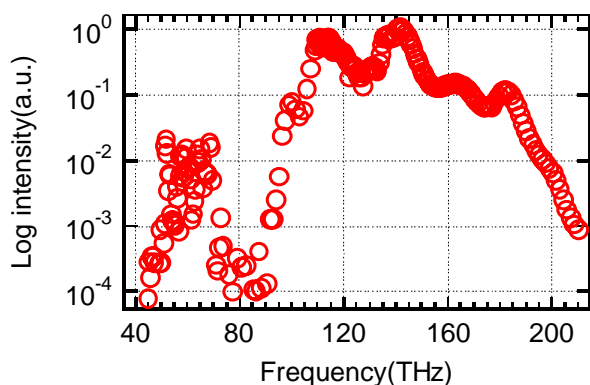


図 2. DAST 結晶による赤外パルス光のスペクトル

で生じる効果を打ち消すようにチャープを施し、最適な状況を得るように工夫した。その結果、コヒーレント赤外光として世界で最も広い帯域、即ち 0.5THz から 200THz に至るパルス光の発生に成功した。近赤外域のスペクトルを図 2 に示す。なお、この測定は、図 1 と異なり、標準光源を用いてスペクトル感度較正がなされた測定系(半導体赤外検出器と分光器の組み合わせ)で行った。

## B. 超広帯域赤外パルス光電場検出

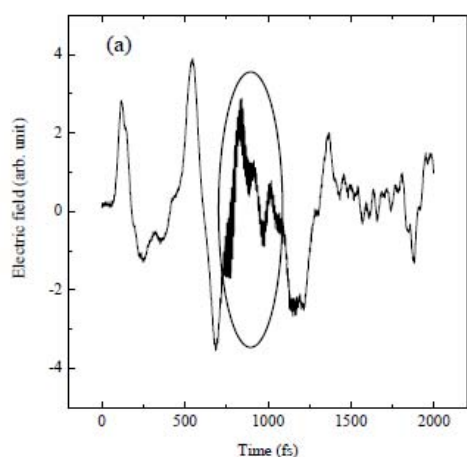


図 3 (a). 光伝導アンテナを用いて検出した時間波形の例

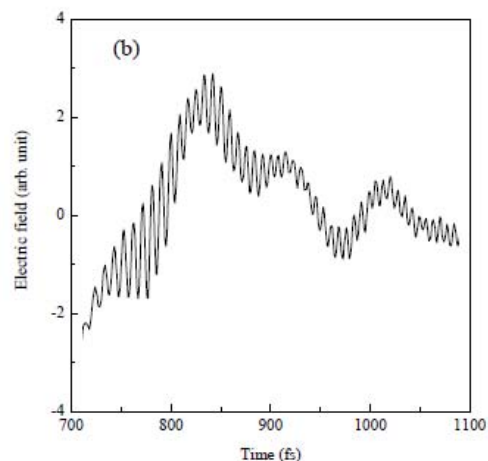


図 3 (b). 図 3(a)の枠で囲んだ部分の拡大図

図 1 左下部に顕微鏡写真を示す光伝導アンテナ(PC antenna)を用いて、A. で発生した赤外パルス光の電場形状を直接測定した。光伝導アンテナに照射した Gate pulse は図 1 に示すような超短パルスを用い、DAST 結晶へは A. で述べたチャープを施した Pump pulse をチョッパー(Chopper)を通して用いた。なお、両パルスはビームスプリッタ(BS)で元のレーザーを二分して得、時間差はステージ(Time delay)で走査した。光伝導アンテナからの信号は電流電圧変換アンプ(I/V)とロックインアンプ(Lock-in)で増幅した後、パソコン(PC)に記録した。その結果を図 3(a)に示す。DAST 結晶が厚いため、A. で述べたチャープの効果により、発生した電場の形状は複雑であるが、楕円で囲んだ領域を拡大した図 3(b)から分かる通り、周期が 10fs 以下の非常に高い振動数成分を含んでいることが分かる。図 3(a)をフーリエ変換した結果を図 4 に示す。100THz 以上の

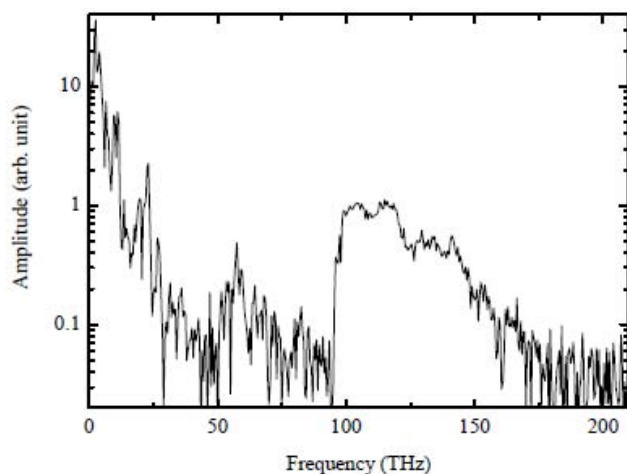


図 4. 図 3(a) のフーリエ変換スペクトル

高周波成分が見られるが、これは図 3(b)の細かな振動に対応している。このように、世界最高周波数となる 170THz に至る検出に成功した。また、この限界はレーザーの裾を切るために使用したローパスフィルターである Ge 基板の透過特性によって決まっており、その改善でさらなる高帯域化が可能となると考えられる。一方、100THz 以下で強度が減少しているのは DAST の吸収によるものである。なお、これまで、パルス幅 10fs のレーザーを用い、GaSe 結晶、あるいは光伝導アンテナを用いた広帯域赤外

パルス光発生を行い、それぞれ 10-100THz, 0.1-10THz の検出に成功していたので、今回の成果と合わせ、1 個の光伝導アンテナでサブミリ波から近赤外域(0.1-170THz)をカバーすることが可能であることが分かった。実に三桁以上の周波数範囲をカバーする他に例を見ない検出器であると考えられる。

### C. 光伝導アンテナのスペクトル感度評価

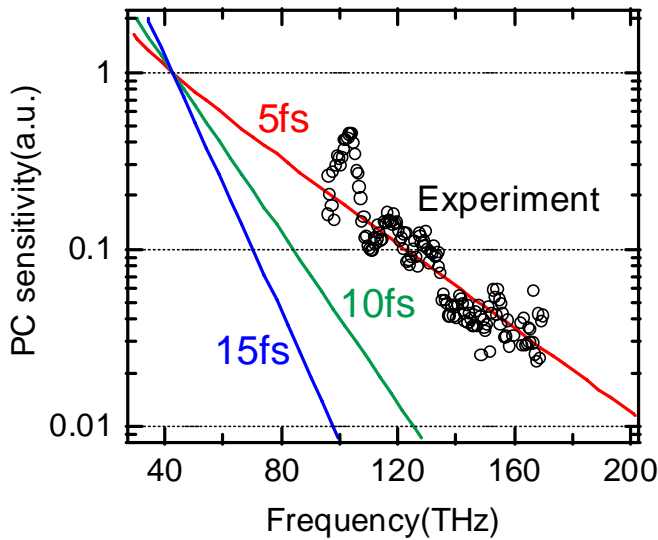


図 5. 光伝導アンテナのスペクトル感度

次に、図 2 の結果と図 4 結果から光伝導アンテナの感度を求めた。図 5 の黒丸がその結果である。このスペクトル感度を決定している要因を探るため、光伝導アンテナの動作原理を吟味した。取り出せる電流  $J$  は以下のようにかける。

$$J(t) = e\mu \int_{-\infty}^{\infty} n(\tau - t)E(\tau)d\tau$$

ここで、 $e$  は電子の電荷、 $\mu$  は移動度、 $n(t)$  はパルス光照射によって生じた電子密度の時間変化、 $E(t)$  は入射パルスの電場である。ここで簡単のため、 $\mu$  の時間依存性は無視した。

先の式をフーリエ変換すると、

$$J(\omega) \propto n(\omega) \cdot E(\omega) \quad (1)$$

となる。従って、 $n(\omega)$  が光伝導アンテナのスペクトル感度を表すことになる。さらに、 $n(t)$  は以下の畳み込み積分で表される。

$$n(t) \propto \int_{-\infty}^{\infty} P(\tau)D(\tau - t)d\tau \quad (2)$$

ここで、 $P(t)$  は照射パルス光の時間波形、 $D(t)$  は生成された電子密度の時間変化である。さらに、式(2)にフーリエ変換を施すと、

$$n(\omega) \propto P(\omega) \cdot D(\omega) \quad (3)$$

となり、パルス光の時間幅が狭く、スペクトル幅が広いほど、帯域が広がることが分かる。同様に、光で生成された電子の減衰が速いほど、やはり帯域は広がることになる。 $D(t)$  は基板材料に用いた低温成長 GaAs の過渡反射応答などから時定数 200fs 程度の指数関数で近似することができることが分かった。また、 $P(t)$  としてはガウス関数を仮定し、そのパルス幅を 5, 10, 15fs の 3 通りに変化した場合の計算結果を図 5 に示す。赤線の 5fs の場合が最もよく実験データを再現しており、このパルス幅は実際に用いたレーザーのものと一致する。このように、ここで仮定した単純なモデルで光伝導アンテナのスペクトル感度がうまく再現できることが分かった。また、図 5 の赤、緑、青線の傾きを比較することで、高帯域検出においてレーザーパルス幅の狭窄化が重要であることが分かる。

## 5. 自己評価

検出された電磁波の最高周波数がいわゆる光の領域である近赤外域 170THz(1.7 $\mu$ m)に至り、世界記録を達成したことで、目的とした光電場のアンテナによる検出に成功したものと評価している。一方で、いわゆる光通信波長帯の中心(1.5 $\mu$ m)までの発生に初めて成功しながら、その検出には、研究期間内において、僅かに及ばなかったことになる。その原因として、購入したレーザーの長期(合計で一年以上)に亘る不良やその整備に時間を取られ過ぎた点などが挙げられる。しかしながら、本研究の多くの成果はパルス幅狭窄化によって得られたものであり、やむを得ない面もあると考えている。

## 6. 研究総括の見解

アンテナは電波を捉える手段として多用されているが、光も電波と同様、電磁波であり、同様にアンテナで検出することができるとの観点で、これまでの光検出器にない新奇機能を実現することを試みた。主たる成果は次の3点である。

(A)超広帯域赤外パルス光発生:有機光学非線形結晶 DAST(4-(4-dimethylaminostyryl)-1-methyl pyridinium tosylate)を使用して、コヒーレント赤外光として世界で最も広い帯域、即ち 0.5THz から 200THz に至るパルス光の発生に成功した。

(B)超広帯域赤外パルス光電場検出:光伝導アンテナ(PC antenna)を用いて、A. で発生した赤外パルス光の電場形状を直接測定し、世界最高周波数となる 170THz に至る検出に成功した。

(C)既に、0.1-10THz, 10THz-100THz の検出に成功しているので、今回の研究成果と合わせ、1 個の光伝導アンテナでサブミリ波から近赤外域 (0.1-170THz) をカバーする可能性を示した。

理論的で独創的な研究手法により、光と電波の境界領域で適切な検出手法が無いテラヘルツ電磁波(0.1-10THz)領域での検出手法を確立すると言う成果を得た。

研究成果は、8編の原著論文、6 件の招待講演に纏められているが、著書・解説 5 件、口頭発表 26 件と精力的に発表を行っている。

本手法の検出域がテラヘルツ領域を遙かに超え、光通信波長帯を含む近赤外域、いわゆる光の領域にまで拡張できる見通しも得ており、従来にない検出法として分光技術に画期的な発展をもたらす他、情報通信技術への広い応用が期待される。本研究で開発した技術を用い、高温超伝導体、半導体ナノ構造物質、メタマテリアルなど、興味ある物質の新奇物性解明に適用していくことが望まれる。

## 7. 主な論文等

### (A)さきがけの個人研究者が主導で得られた成果

#### (1)論文(原著論文)発表

##### 論文(国際)

- M. Ashida, R. Akai, H. Shimosato, I. Katayama, K. Miyamoto, and H. Ito, "Electric Field Detection of Near-Infrared Light Using Photoconductive Sampling," *Ultrafast Phenomena XVI* (Springer Series in Chemical Physics, 2009), in press.
- M. Ashida, "Ultra-broadband Terahertz Wave Detection Using Photoconductive Antenna," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47**, 8221 (2008).
- I. Katayama, H. Shimosato, Dhanvir Singh Rana, I. Kawayama, M. Tonouchi, and M. Ashida, "Hardening of the ferroelectric soft mode in SrTiO<sub>3</sub> thin films," *Appl. Phys. Lett.* **93**, 132903 (2008).
- I. Katayama, H. Shimosato, M. Ashida, I. Kawayama, M. Tonouchi, T. Itoh, "Thickness

dependence of the soft ferroelectric mode in SrTiO<sub>3</sub> thin films deposited on MgO,” Journal of Luminescence **128** 998 (2008).

- ・ M. Ashida, R. Akai, H. Shimosato, I. Katayama, K. Miyamoto, H. Ito, “Ultrabroadband THz Field Detection beyond 170THz with a Photoconductive Antenna,” Conference on Lasers and Electro-Optics 2008, Technical Digest, CTuX6.

## (2) 著書

- ・ 芦田昌明

第2章テラヘルツ波の基礎、第4章テラヘルツ検出器

ハンドブック「テラヘルツ技術総覧」、出版:NGT社(分担執筆) 2007.11.30.発行

- ・ M. Ashida,

Part C Measurement Methods for Materials Properties

11. Optical Properties

11.1 Fundamentals of Optical Spectroscopy

11.4 Nonlinear Optics and Ultrashort Pulsed Laser Application”,

Springer Handbook of Materials Measurement Methods, (分担執筆)2006.11.08.発行

## (3) 招待講演

- ・ M. Ashida

“Ultrabroadband THz generation and detection with 5-fs pulses”

第 2 回日韓合同ワークショップ 2008 年 10 月 24-25 日:テラヘルツテクノロジーフォーラム

(三菱ビル コンファレンススクエアエムプラス 丸の内)

- ・ M. Ashida,

“Ultrabroadband terahertz spectroscopy using photoconductive antenna”

The First International Workshop on Material and Information Sciences in High

Technologies, MISHT-2007 , 2007.09.26-29.

- ・ 芦田昌明

“光伝導アンテナによる超広帯域 THz 波の検出”

2007 年春季 第 54 回応用物理学関係連合講演会、2007.03.27.

## (B) その他の主な成果

### (1) 招待講演

- ・ 芦田昌明

「高帯域テラヘルツ波発生と応用」

第 4 回テラヘルツ電磁波産業利用研究会

平成21年(2009年)3月26日(木) (大阪科学技術センター)

- ・ 芦田昌明,

「テラヘルツ時間領域分光法とその超広帯域化」,

大阪府電磁波利用技術研究会 平成19年度 技術講演会『テラヘルツ技術の進展と応用展望』, 2008.03.25.