

高強度テラヘルツ波パルスを用いた実時間イメージング

筑波大学
服部利明

1 はじめに

テラヘルツ波は波長が $30\ \mu\text{m}$ から $3\ \text{mm}$ 程度の電磁波であり、その波長程度の空間的な分解能を有する。そのためイメージング¹⁾を行うことにより、単なる強度測定や波形測定と比較して、得られる情報量が大幅に増加し、またその結果、対象物の直観的な把握を行うことができる。しかし、その実現のためには障害も多い。通常、十分に高出力のテラヘルツ波源や十分に高感度の検出器が簡単に利用できないため、画像の取得には非常に時間がかかることが多い。テラヘルツイメージングに関する論文等で報告されている多くのテラヘルツ画像は数 10 分以上の時間をかけて取得されている。本稿のテーマである実時間での画像取得のためには、高出力のテラヘルツ波源を用い、かつ高感度・高速の画像検出器または検出法を用いなければならない。波源と検出器または検出法の組み合わせはいくつかありうるが、ここではおもにテラヘルツ波パルスと電気光学 (EO) サンプリング法の組み合わせについて述べることにし、その他の方法については、最後に簡単に触れることとする。

2 高強度テラヘルツ波パルス

実時間イメージングに用いられる高強度のテラヘルツ波パルスは、おもに増幅されたフェムト秒レーザーパルスをテラヘルツ波発生装置に照射することによって得られる。フェムト秒レーザーパルスとしては、モード同期チタンサファイアレーザー（中心波長約 $800\ \text{nm}$ ）の出力を再生増幅したものが通常用いられる。レーザーパル

スの典型的な特性は、パルス幅が 100 から 200 fs, パルスエネルギーが 100 μ J から 1 mJ, 繰り返し周波数が 10 Hz から数 10 kHz 程度である。

テラヘルツ波発生装置としては、いくつかのタイプのものが用いられる。低出力のテラヘルツ波パルスの発生によく用いられている光伝導アンテナは、照射光パルスの強度に対して容易に飽和するので、大出力のテラヘルツ波を得るためには大面積にする必要がある。半導体基板（おもに半絶縁性 GaAs）に 3 cm 程度の間隔で 2 つの電極を取り付けただけの大口径光伝導アンテナ^{2,3)}がよく用いられるが、半導体微細加工技術を用いて楕形電極構造を形成した大口径光伝導アンテナ⁴⁾も報告されている。どちらの場合も、半導体に超短光パルスを照射することにより生成されるキャリアが印加電場により加速されることによって生じる電流から電磁パルスが発生する。

もう一つの方法として、ZnTe などの EO 結晶を用いた光整流法⁵⁾も利用されている。光整流は一種の非線形光学過程であり、超短光パルスの広いスペクトルの中の周波数成分の間の差周波の電磁波を発生させるものである⁶⁾。また最近では EO 結晶として LiNbO₃ を用いたパルス面傾斜型の光整流⁷⁾により、格段に強力なテラヘルツ波パルスが得られるようになってきたので、今後は広く用いられるようになるであろう。上記のいずれの方法によっても、1 ピコ秒程度の間に電場が半周期から数周期の振動をする超短電磁パルスが得られる。

3 実時間イメージングの例

テラヘルツ波パルスを用いると、その時間波形を測定することで、いわゆるテラヘルツ時間領域分光法（THz-TDS）により広帯域のコヒーレントな分光情報が得られる。THz-TDS では波形測定法として光伝導スイッチと EO サンプリングが用いられるが、このうち EO サンプリングはテラヘルツ波の電場を光の強度に変換することにより測定する方法であるので、光の 2 次元検出器を用いてそのまま 2 次元化することにより、テラヘルツ

波の実時間イメージングが実現できる。プローブ光の遅延時間を止めた測定では、あるタイミングにおける電場分布（いわゆるスナップショット）が得られ、遅延時間をスキャンすれば時間変化やスペクトル情報も得られる。ただし、イメージング測定ではテラヘルツ波が空間的に広がることにより電場が小さくなることと、波形測定で用いられる高感度なバランス検出法の利用が困難であることから、上記のような高強度のテラヘルツ波パルスが必要とされる。

図 1 に EO サンプリングを用いた実時間テラヘルツイメージングの装置配置の例を示す⁸⁾。ZnTe 等の EO 結晶にテラヘルツ波パルスが入射するとその電場により EO 結晶に複屈折性が生じる。そこに入射したプローブ光パルスは、複屈折性により偏光状態に変化を受ける。それを波長板や検光子と CCD 等のイメージ検出器により観測する。単純なクロスニコル配置（偏光子と検光子が直交した配置）では、テラヘルツ電場の 2 乗に比例した信号が得られるので、電場に線形な検出をおこなうために、何らかの工夫が必要である。我々は、図 1 のように検光子を回転させる方法を用いている^{8,9)}。この配置では、検光子を透過するプローブ光強度 I の入射光強度 I_0 に対する比は、

$$\frac{I}{I_0} = (\theta + \Gamma + \delta)^2 + \eta \quad (1)$$

のように表される。ここで θ , Γ , δ , η はそれぞれテラヘルツ電場によって生じた複屈折性によるプローブ光の位相変化、EO 結晶の残留複屈折性等による位相変化、検光子の回転角、光学系全体の不完全性による偏光解消度である。このうち θ が観測したい量である。一般に Γ と η は光学系によって決まっており、また画像の中の各点ごとに異なる。テラヘルツ波が入射していないときに δ を変化させながら上記の量を測定することで、各点ごとの較正曲線を求めることができ、それにより高精細なテラヘルツ画像を得ることができる。図 2 に、この手法による画像補正の効果を表す画像を示した。

図 2 は集光したハーフサイクル・テラヘルツパルスの

電場分布のスナップショットであり、きれいなリング状の分布が観測されている。これはハーフサイクルパルスを集光したときの特徴であり、シミュレーションによる再現も可能である¹⁰⁾。また、遅延時間を変えながらこのような画像を取得し、各点ごとにフーリエ変換を施すことで、各周波数成分の空間分布を得ることができる¹¹⁾。そのようなテラヘルツ波パルスの時間空間的振る舞いは、テラヘルツ波をガウスビームと仮定することで、おおよその理解を得ることができる¹²⁾。次に、このような電場分布に対して空間的なコヒーレント波面合成をおこない、その実時間観測をおこなった結果について記す⁹⁾。

図 3 に示すような 7 つのユニットからなるテラヘルツ波エミッターを用いた。それぞれのユニットは楕円電極構造を持つ光伝導アンテナである⁴⁾。各ユニットには独立に電圧を印加できる。すべてのユニットに同一の電圧を印加し全体にフェムト秒レーザーパルス照射すれば、全体として単一の大きなエミッターとして働き、その出力を集光すると、回折限界で決まるサイズのスポットに集光される。その結果が図 4 の上段(a)–(c)である。それに対して、中央のユニットのみ印加電圧の向きを反転させると、図 4 下段(d)–(f)の結果が得られる。特に電場振幅がピークになる時間 0 ps に注目すると、中央ユニットの電圧を反転させることにより、テラヘルツ波のスポットサイズが小さくなっていることがわかる。これは、回折限界を超えるスポットサイズが実現されたことを表しており、いわゆる超解像効果である。ここでは示さないが、周波数分解した画像からはその効果がより明瞭にわかる。

EO サンプリングによるテラヘルツイメージング法を用いると、原理的にはフェムト秒パルスの 1 ショットの間にテラヘルツ波発生からイメージング検出までがすべて終わることになる。(もちろんイメージデータの読み出しなどのエレクトロニクスに時間がかかるので、フェムト秒ですべてが終了するというわけではない。)これを実際におこなった例について以下に述べる。この方法では、まずプローブ光パルスの遅延時間を 1 か所に固定して測

定をおこなうことになるが、テラヘルツ波の電場がピークになる時間よりは、電場の時間変化が最大になる時間に固定したほうが、より高周波成分が多く含まれ、その結果、高い空間分解能が得られる¹³⁾。また、我々のレーザーシステムは繰り返しが 1 kHz であるので、レーザー 1 ショットごとに画像が取得できるように、毎秒 1000 コマの画像取得が可能な高速ビデオカメラを用いた。これをレーザーシステムと同期させることにより、レーザー 1 ショットごとに 1 枚のテラヘルツイメージが取得でき¹⁴⁾、さらにそれを連続しておこなうことにより、毎秒 1000 コマの高速テラヘルツビデオを取得することができた¹⁵⁾。図 5 には、そのシステムを用いて金属棒の運動する様子をとらえたものを示す。ここでは、動きがよくわかるように、4 ms ごとの画像を示している。

上に記さなかったが、CMOS 検出器を用いて画像データの実時間演算をおこなうことでノイズを減少させることができる¹⁶⁾。またテラヘルツ波の波形測定で通常用いられているバランス検出法を 2 次元検出器の出力に対してデジタル演算によって実現することもおこなわれている¹⁷⁾。

4 その他の高強度テラヘルツ波源による実時間イメージング

高強度テラヘルツ波パルスと EO サンプルリングを用いた実時間テラヘルツイメージング法は、テラヘルツ波が超短パルスであることの特徴をうまく生かしたイメージング法であるが、連続波のテラヘルツ波源と比較的高感度のイメージ検出器を用いた実時間イメージング法もいくつか報告されている。それらについて、簡単に紹介する。

量子カスケードレーザーによるテラヘルツ波発生はさかんに研究されており、周波数によっては 1 mW を超える連続波発振が可能である。その出力を、こちら最近開発が進んでいるマイクロボロメータアレーで検出することにより、実時間イメージングが行われている¹⁸⁾。マ

マイクロボロメータアレーは、小型であるが比較的感度が高く、室温で動作する。テラヘルツガスレーザーは、大出力の連続テラヘルツ波源として古くから使われている。焦電型イメージ検出器などによってイメージングを行うことができる¹⁹⁾。自由電子レーザーは大型な装置であるが、テラヘルツ帯で非常に大きな出力が得られるので、各種の熱的検出器²⁰⁾を用いてイメージングができる。

5 まとめ

テラヘルツ波を用いたイメージング技術は、今後ますます応用範囲が広がっていくことであろう。空港などでのセキュリティ検査、生産現場における製品検査、医療診断、美術品・文化財の検査など、いろいろな場面での応用がすでに進んでいる。今後ますますの発展が期待される。本稿でおもに述べた実時間テラヘルツイメージング手法は、どちらかというとそのような現場での測定手段には不向きであり、今のところ実験室での利用にとどまっており、基礎科学の幅広い分野で用いられていくことであろう。たとえば、メタマテリアルやその他の微細構造近傍の近接場の分布を調べたり、テラヘルツ波発生器の特性を調べたりするためには、強力な手段となる。また、さまざまな現場における諸問題の基礎づけのためにも有用であり、広く用いられていくと期待される。

参考文献

- 1) B. B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," *Opt. Lett.* **20**, 1716-1718 (1995).
- 2) T. Hattori, K. Tukamoto, and H. Nakatsuka, "Time-resolved study of intense terahertz pulses generated by a large-aperture photoconductive antenna," *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 4907-4912 (2001).
- 3) M. Usami, T. Iwamoto, R. Fukasawa, M. Tani, M. Watanabe, and K. Sakai, "Development of a THz spectroscopic imaging system," *Phys. Med. Biol.* **47**, 3749-3753 (2002).
- 4) T. Hattori, K. Egawa, S. Ookuma, and T. Itatani, "Intense terahertz pulses from large-aperture antenna with interdigitated electrodes," *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, L422-L424 (2006).
- 5) T. Yasuda, T. Yasui, T. Araki, and E. Abraham, "Real-time two-dimensional terahertz tomography of moving objects," *Opt. Commun.* **267**, 128-136 (2006).
- 6) 服部利明 「非線形光学入門」 裳華房(2009).
- 7) A. Doi, F. Blanchard, H. Hirori, and K. Tanaka, "Near-field THz imaging of free induction decay from a tyrosine crystal," *Opt. Express* **18**, 18419-18424 (2010).
- 8) T. Hattori and M. Sakamoto, "Deformation corrected real-time terahertz imaging," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 261106 (3 pages) (2007).
- 9) T. Hattori, M. Masuda, M. Sakamoto, K. Egawa, T. Itatani, and A. Ohi, "T-ray profile synthesis using photoconductive emitter array," *Proc. of SPIE Vol.* **6772**, 67720J (8 pages) (2007).
- 10) R. Rungsawang, K. Ohta, K. Tukamoto, and T. Hattori, "Ring formation of focused half-cycle terahertz pulses," *J. Phys. D* **36**, 229-235 (2003).

- 11) T. Hattori, K. Ohta, R. Rungsawang, and K. Tukamoto, "Phase-sensitive high-speed THz imaging," *J. Phys. D* **37**, 770-773 (2004).
- 12) T. Hattori, R. Rungsawang, K. Ohta, and K. Tukamoto, "Gaussian beam analysis of temporal waveform of focused terahertz pulses," *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 5198-5204 (2002).
- 13) R. Rungsawang, K. Tukamoto, and T. Hattori, "Electric field imaging using intense half-cycle terahertz pulses," *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 1771-1776 (2005).
- 14) R. Rungsawang, A. Mochiduki, S. Okuma, and T. Hattori, "Single-shot terahertz imaging," in "Ultrafast Phenomena XIV" (Springer 2005) pp.750-752.
- 15) R. Rungsawang, A. Mochiduki, S. Ookuma, and T. Hattori, "1-kHz real-time imaging using a half-cycle terahertz electromagnetic pulse," *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, L288-L291 (2005).
- 16) F. Miyamaru, T. Yonera, M. Tani, and M. Hangyo, "Terahertz two-dimensional electrooptic sampling using high speed complementary metal-oxide semiconductor camera," *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L489-L491 (2004).
- 17) X. Wang, Y. Cui, W. Sun, J. Ye, and Y. Zhang, "Terahertz real-time imaging with balanced electro-optic detection," *Opt. Commun.* **283**, 4626-4632 (2010).
- 18) A. W. M. Lee and Q. Hu, "Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array," *Opt. Lett.* **30**, 2563-2565 (2005).
- 19) Y. Ueno, R. Rungsawang, I. Tomita, and K. Ajito, "Terahertz images of biological molecules: Frequency dependence of spatial resolution using a tunable terahertz laser source," *Jpn. J. Appl.*

Phys. **47**, 1315-1320 (2008).

- 20) B. A. Knyazev, V. S. Cherkassky, Y. Y. Choporova, V. V. Gerasimov, M. G. Vlasenko, M. A. Dem'yanenko, and D. G. Esaev, "Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: Comparative description of imaging techniques with examples of application," J. Infrared Milli. Terahz. Waves online first (2011).

Real-Time Imaging using Intense Terahertz Pulses

Toshiaki Hattori

Institute of Applied Physics, University of Tsukuba

ハットリ トシアキ

所属：筑波大学 大学院数理物質科学研究科 教授

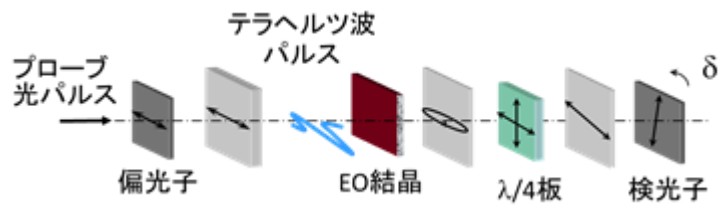
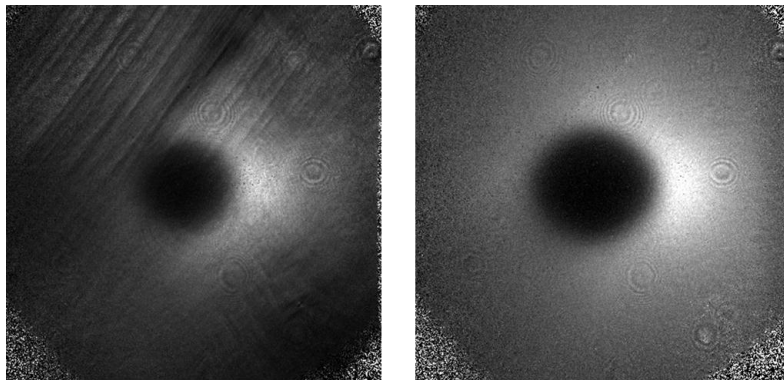


図 1 実時間テラヘルツイメージング測定の様式図



(a) 補正前の電場分布画像

(b) 補正後の電場分布画像

図 2 検光子回転による画像補正の効果

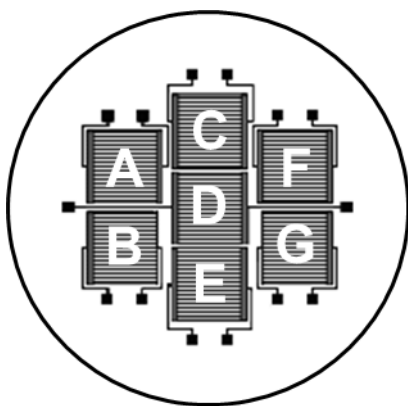


図 3 楕円構造電極エミッター配列の構成

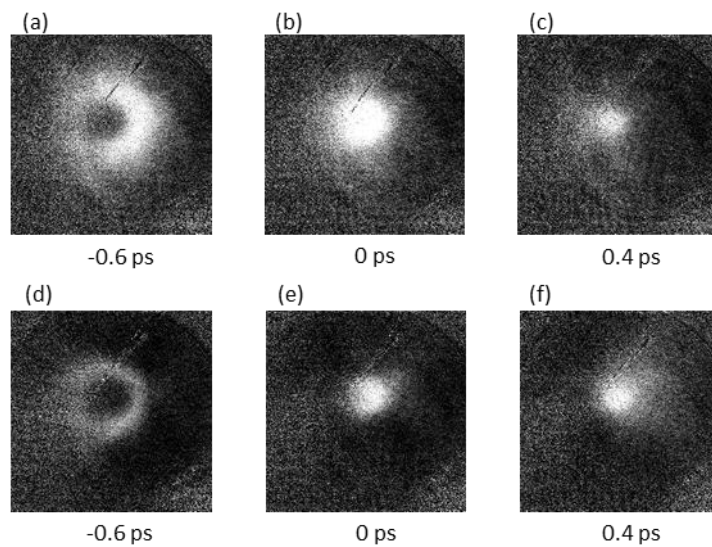


図 4 コヒーレント波面合成の効果。上段が同位相，下段が，中央ユニットのみ逆位相の場合。

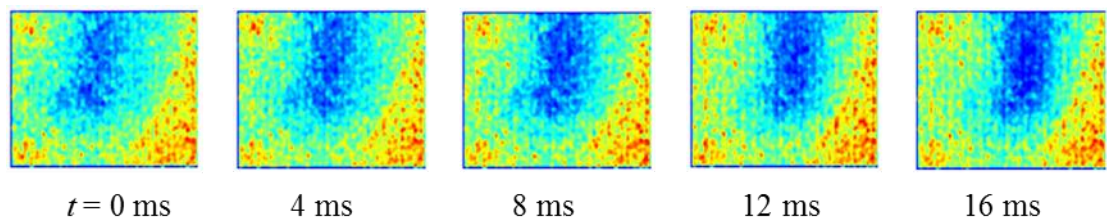


図 5 毎秒 1000 コマの高速テラヘルツビデオによる金属棒の運動のようす