高強度テラヘルツ波を用いた実時間テラヘルツイメージング

筑波大学 服部利明

アブストラクト

高強度のテラヘルツ波パルスおよび連続波の発生法と、それを用いた実時間テラヘルツ イメージングの手法について記した。超短テラヘルツ波パルスではおもに電気光学サンプ リング法が、連続波では、マイクロボロメータアレイや焦電型カメラが用いられる。

1. はじめに

テラヘルツ波は、近年非常に注目を集めており、また盛んに研究がなされている。しか し、他の周波数領域の電磁波と比べると、まだまだ技術的に未熟な分野が多く、容易に日 常的な分野に応用できる状態とは言いがたい。画像計測(イメージング)技術もそのうち の一つである。現在我々は、中赤外から X 線までのほとんどすべての周波数領域で、電磁 波の実時間イメージングが可能であり、その多くは、日常的な応用に使うことができる。 それに対して、テラヘルツ領域では、ほとんどその域に達していない。そこで、ここでは、 おもに実験室の中でのみ実現している、実時間テラヘルツイメージング技術と、その光源 として用いられる高強度テラヘルツ波発生技術について述べる。

テラヘルツイメージングの有用性は、早くから注目されてきた[1]。しかし多くの場合、 光源となるテラヘルツ波の強度が弱いため、画像取得のためには 1 点ごとのデータを取得 しながら光源あるいは対象物をスキャンしなければならず、一つの画像を得るのに数 10 分 から数時間を必要とすることも珍しくない。それに対して、高強度のテラヘルツ波源を用 い、その検出にアレイ型の検出器を用いることにより、実時間での測定を可能とする手法 が、研究されている。以下では、そこで用いられる高強度テラヘルツ波発生法と検出法に ついて述べ、またいくつかのイメージング例について記す。なお、従来型のスキャン法を 用いている市販品でも、稼動部の操作とデータ取得の高速化によって、最近では実用に耐 えるレベルに達しているが、ここではそれについては述べない。

2. 高強度テラヘルツ波発生

高強度のテラヘルツ波を発生する方法と、それを用いた実時間イメージングの方法とその特徴を、表1にまとめた。大きく分けてこれらは、発生されるテラヘルツ波が広帯域の 超短パルスであるか、そうでないかによって分けられる。出力の値として、超短パルスで はピーク電場、連続波では平均出力を記したが、これらはそれぞれのテラヘルツ波の検出 方法に対応している。 なお、表に記した出力の値は典型的なものであり、周波数やその他の条件に依存する。 また今後の研究によって大きく進展することも考えられる。

(1) 超短パルス

超短テラヘルツ波パルスは、ハーフサイクルから数サイクル程度の極限的に短い時間幅 を持ち、それに伴い非常に広帯域なスペクトルを持っている。発生には多くの場合フェム ト秒レーザが用いられる。以下に述べるようにいくつかの手法があるが、いずれの場合も、 フェムト秒レーザ・パルスにより生じた何らかの超高速現象により、テラヘルツ波パルス が発生する。これらのテラヘルツ波パルスは、0.1 THz から数 THz に至る幅広い周波数成 分からなっており、テラヘルツ時間領域分光測定などの方法で、それらの周波数成分ごと の情報を得ることができることが、大きな特徴である。高強度のテラヘルツ波を発生させ るためには、モード同期レーザから出力されるフェムト秒レーザ・パルスを、再生増幅器 などで増幅した光が用いられる。

大口径光伝導アンテナ[2]では、図1に示すように、半導体などの光伝導性を有する材料 に電圧を印加し、そこにフェムト秒レーザ・パルスを照射することで、急激に光電流を誘 起し、それによりテラヘルツ波パルスを発生する。これは、多くのテラヘルツ時間領域分 光装置などで用いられている、テラヘルツ波発生法として最も普及している方法である。 ただし、光伝導アンテナは照射する光の強度に対して、出力が容易に飽和する特性を持っ ている。そこで大口径にして光を照射する面を大きくし、数キロボルト程度の高電圧を印 加することで、大きな出力を得る。また、図2に示すように、電極を櫛形構造[3]にするこ とにより、比較的低電圧で動作させることもできる。

空気やその他の気体中に、強力なフェムト秒レーザ・パルスを細長く集光すると、気体 がプラズマ化し、フィラメントが形成される。このフィラメントの中では、高い光強度が 長距離にわたって保たれるので、さまざまな非線形光学現象が生じる。レーザ光の基本波 と第 2 高調波を同時にフィラメントに照射することで、高強度のテラへルツ波パルスを発 生させることができる[4]。この方法を用いると、レーザから離れた位置でテラへルツ波を 発生させることが可能であり、危険物の検査やテロ対策など、容易に近寄れない場所での 測定への応用が期待されている。

非線形光学結晶にフェムト秒レーザ・パルスを照射すると、非線形光学現象の一つであ る光整流現象[5]が起こり、それによりテラヘルツ波パルスが発生する。非線形光学効果で 一般に必要となる位相整合条件を満足させるために、特にパルス面傾斜法[6]という手法を 用いることより、高強度のテラヘルツ波パルスを発生することができる。

(2) 連続波

上記の超短テラヘルツ波パルスが超広帯域であるのに対し、比較的単色性の高い連続波 を用いると、特定の周波数成分の情報のみを捉えることができる。 量子カスケード・レーザ[7]は高度な半導体結晶成長技術を用いて作製される半導体レー ザの一種であり、さかんに研究がなされている。その特徴は非常に小型であること、出力 が狭帯域であることなどである。現在のところ、短所としては、液体窒素での冷却が必要 であること、周波数帯によって発振できなかったり、低い出力しか得られないことが挙げ られる。今後の技術開発の成果が期待される。

気体レーザ[8,9]は、古くからあるテラヘルツ波源であり、炭酸ガス・レーザの出力(波 長 10.6 µm)をメタノールなどの気体分子に照射し、テラヘルツ帯の周波数でのレーザ発振 を達成するものである。離散的ではあるが、テラヘルツ帯で多くの発振可能周波数があり、 高出力で狭帯域のテラヘルツ波が得られる。

自由電子レーザ[10]は、光の速度近くまで加速された電子を用いて電磁波を発振する装置 であり、テラヘルツの周波数領域でも、非常に高出力の電磁波が得られる。ただし非常に 大型の装置であり、米国やヨーロッパなどでテラヘルツ帯の出力を発振する装置が稼動し ている。得られるテラヘルツ波は、およそ 10 ps 程度のパルス(ミクロパルス)のパルス列 であり、それが数µs 程度のマクロパルスを形成している。

表には記していないが、高温超伝導体[11]から、テラヘルツ波の発振が得られることが最 近報告されている。今後の研究開発が待たれる。

3. 実時間テラヘルツイメージング

上に述べた高強度テラヘルツ波を用いたイメージングの測定手法について以下に述べる。

(1) 超短パルス

超短テラヘルツ波パルスは、非常に広帯域のスペクトルを有するコヒーレントなパルス であることが特徴であり、それを生かすためには、時間領域での測定が有効である。一般 に超短テラヘルツ波パルスの測定には、光伝導スイッチを用いる方法と電気光学サンプリ ングを用いる方法が用いられるが、そのうち電気光学サンプリングは、2次元化による同時 測定が可能であるので、これを用いて実時間テラヘルツイメージング[12-18]が実現されて いる。電気光学サンプリング法では、テラヘルツ波の電場によって電気光学結晶の屈折率 に異方性(複屈折性)が生じることを用いる。図 3 のように、電気光学結晶にプローブ光 としてフェムト秒レーザ・パルスを入射し、透過光の偏光状態を見ることで、テラヘルツ 電場を時間分解して観測することができる。

(2) 連続波

連続波のテラヘルツ波では、上記のパルスと比較すると瞬間的な電場は小さいので、応 答時間の長い検出器を用いたほうが有利になる。実時間テラヘルツイメージングには、テ ラヘルツ波帯で感度のある検出器の2次元配列として、焦電型カメラ[9]とマイクロボロメ ータアレイ[7,8]が用いられている。

これ以外に、超伝導体を用いた検出器であるSISミキサの2次元配列が研究されており、 おもに電波天文学での微弱なテラヘルツ波のイメージングへの応用が期待されている。

4. いくつかの例

(1) 高速テラヘルツビデオ

テラヘルツ波パルスを用いた実時間イメージング測定では、フェムト秒レーザ・パルス の1パルスごとに1つの高強度テラヘルツ波パルスが発生するので、1パルスごとに1枚の 画像を得ることが可能である。毎秒1000コの光パルスを発生するフェムト秒レーザ増幅シ ステムを用いて、毎秒1000コマの高速テラヘルツビデオの撮影をした例を図4に示す。こ こでは、金属棒が高速に異動する様子を、実時間で捉えている。図では4 ミリ秒ごとの画 像が示されているが、実際には、高速CCDカメラを用いて1ミリ秒間隔で画像が得られて いる。測定された画像を用いて、金属棒の動きをスローモーションで再生するビデオが再 構築された[15,16]。

(2) テラヘルツ波電場分布イメージング

テラヘルツイメージングでは、何らかの対象から反射・散乱または透過したテラヘルツ 波の空間分布を観測する以外に、テラヘルツ波の電場の空間分布そのものを測定すること が必要になることがある。対象物のイメージングの場合は、測定系の感度ムラを容易に補 正することができるが、テラヘルツ電場そのものの測定では、それは容易ではない。電気 光学サンプリング法では、電気光学結晶に存在する小さな複屈折性などが画質に悪い影響 を与える。図 5 では、あらかじめ較正曲線を求めることで、そのような感度ムラを補正で きることを示している[17]。

5. おわりに

実時間テラヘルツイメージングの手法とそれに用いられる高強度テラヘルツ波の発生法 について、簡単に記した。これらはすでに実験室では実現されているが、日常的な応用に は至っていない。今後より高強度のテラヘルツ波の発生がなされ、またより高感度の検出 器・検出法が開発されることにより、より広い分野で、これらが応用されることが期待さ れる。

〈参考文献〉

- (1) B. B. Hu and M. C. Nuss : Opt. Lett. 20, 1716 (1995)
- (2) T. Hattori, K. Tukamoto, and H. Nakatsuka : Jpn. J. Appl. Phys. 40, 4907 (2001)

- (3) T. Hattori, K. Egawa, S. Ookuma, and T. Itatani : Jpn. J. Appl. Phys. 45, L422 (2006)
- (4) D. J. Cook and R. M. Hochstrasser, Opt. Lett. 25, 1210 (2000)
- (5) 服部利明:非線形光学入門(裳華房、2009)
- (6) 服部利明:レーザー研究、37、345 (2009)
- (7) B. N. Behnken, G. Karunasiri, D. R. Chamberlin, P. R. Robrish, and J. Faist, Opt. Lett. 33, 440 (2008)
- (8) A. W. M. Lee and Q. Hu, Opt. Lett. 30, 2563 (2005)
- (9) Y. Ueno, R. Rungsawang, I. Tomita, and K. Ajito, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 1315 (2008)
- (10) G. R. Neil and G. P. Williams, Infrared Phys. & Tech. 45, 389 (2004)
- (11) L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, N. Gopalsami, Q. Li, M. Tachiki, K. Kadowaki, T. Yamamoto, H. Minami, H. Yamaguchi, T. Tachiki, K. E. Gray, W.-K. Kwok, and U. Welp : Science 318, 1291 (2007)
- (12) R. Rungsawang, K. Ohta, K. Tukamoto, and T. Hattori : J. Phys. D 36, 229 (2003)
- (13) T. Hattori, K. Ohta, R. Rungsawang, and K. Tukamoto : J. Phys. D 37, 770 (2004)
- (14) R. Rungsawang, K. Tukamoto, and T. Hattori : Jpn. J. Appl. Phys. 44, 1771 (2005)
- (15) R. Rungsawang, A. Mochiduki, S. Ookuma, and T. Hattori : Jpn. J. Appl. Phys. 44, L288 (2005)
- (16) R. Rungsawang, A. Mochiduki, S. Okuma, and T. Hattori : in "Ultrafast Phenomena XIV" (Springer 2005) p.750
- (17) T. Hattori and M. Sakamoto : Appl. Phys. Lett. 90, 261106 (2007)
- (18) A. Doi, F. Blanchard, H. Hirori, and K. Tanaka : Opt. Express 18, 18419 (2010)

| 登 生注 | 特徴 | 出力 | 榆出注 |
|-------------|-------|------------|---------------|
| 五二14 | 和臣 | ЩЛ | |
| 大口径光伝導ア | | 00111/ | |
| ンテナ | 超短ハルス | 30 kV/cm | |
| レーザ・フィラ | 招毎パルス | 100 kV/cm | 電気光学サンプリング |
| メンテーション | | 100 K V/em | |
| パルス面傾斜法 | 超短パルス | 300 kV/cm | |
| 量子カスケー | 演练述 | 10 mW | マイクロボロメータアレイ |
| ド・レーザ | 建税极 | 10 11 W | |
| 気体レーザ | 連続波 | 50 mW | マイクロボロメータアレイ、 |
| | | | 焦電型カメラ |
| 自由電子レーザ | パルス | 20 W | 焦電型カメラ |

表1 高強度テラヘルツ波の発生法と実時間イメージングのための検出法



図1 大口径光伝導アンテナによる高強度テラヘルツ波パルスの発生



図2 櫛形電極構造をもつ光伝導アンテナ



図3 電気光学サンプリング法



図4 テラヘルツ高速ビデオ



(a) 補正前の電場分布画像

(b)補正後の電場分布画像

図5 テラヘルツ波の電場分布イメージングにおける画像補正