

テラヘルツイメージング： 応用分野を模索する技術

ヴィアチェスラフ・M・ムラヴェフ、ゴンボ・E・ツイディンジャポフ、
イゴール・V・ククシュキン、イアン・マクニー、ウラジミール・G・コズロフ

がん診断やセキュリティ検査の分野では勢いを失っているものの、テラヘルツイメージングは引き続き、農業や産業の複数の分野をターゲットに開発が進められており、それらの分野でようやくテラヘルツ装置ベンダーに利益をもたらす可能性がある。

0.1～3.0THzの周波数で動作し、3.0～0.1mmの波長範囲に対応するテラヘルツ光源の最初の進歩は、1970年代にさかのぼる。当時登場したのが、0.1～0.3THzで最大100mW、それ以上の周波数で最大1mWの電力を生成する後進波発振器（BWO：Backward Wave Oscillator）という真空電子デバイスだった。さらにコンパクトで信頼性の高い固体テラヘルツ電子デバイスが1990年代に開発され、現時点で同等の性能を備えるが、それよりも高い出力レベルの達成は、いまだ課題として残るままとされている。

1990年代には、超高速レーザーによるテラヘルツ波の生成に基づく時間領域のテラヘルツ技術が開発され、テラヘルツイメージングの可能性が再び脚光を浴びることとなった。この手法によって生成された皮膚がんの画像は、医療分野でのテラヘルツ技術の活用が高い期待感を抱かせたが、進展はいまだ遅いままである。テラヘルツ波は水に強く吸収されることから、細胞組織への浸透深さはせいぜい1mmまでに制限される。また、時間領域テラヘルツイメージングでは、1度に1ピクセルからデータが取得されるため、サンプルのラスタースキャンが必要で、これがリアルタイム診断に向けたもうひとつ

の課題となっている。

その次にテラヘルツイメージング技術が脚光を浴びたのは、カナダINO社とNECが2005年頃に開発したマイクロボロメータ検出器アレイによって、ビデオレートのテラヘルツイメージングが実現されたときである。マイクロボロメータをベースとするテラヘルツカメラは、中赤外（mid-IR）スペクトル範囲用に開発された技術を活用したものだだったが、低周波におけるそれらのデバイスの感度を改良して、1THzまでを達成した。

中赤外量子カスケードレーザ（QCL：Quantum Cascade Laser）の性能をテラヘルツ範囲まで拡張することにより、QCLを利用したテラヘルツ光源が開発されたのも2005年頃で、スペクトル範囲の面で、マイクロボロメータベースのテラヘルツカメラ用に完璧であるように思われた。こうしたデバイスを組み合わせることは確かに、さらに高出力の極低温冷却QCLによって2.8THzを超える周波数で十分に高いコントラストを達成するビデオレートのテラヘルツイメージングを実現するための実行可能な解決策だった。しかし問題は、それだけ高い周波数ではほとんどの材料の透過率が低下すること、また、先ほどと同様に、水吸収率

が非常に高くなることにある。

テラヘルツ技術が進歩しても、QCLと極低温冷却のコストが高いことが、応用分野開拓の妨げとなった。また、他のあらゆるフォトンクス技術と同様に、テラヘルツイメージングをめぐる開発活動には浮き沈みがあり、製品開発は現在、控えめな状態にある（図1）。

2015年には、時間領域テラヘルツシステムの主要メーカーの1社だった米ゾメガ・テラヘルツ社（Zomega Terahertz）が事業を廃止し、他の複数のベンダーが人員を削減した。しかしこの状況は改善されつつある。

災害救助における テラヘルツの応用

テラヘルツ製品開発者にとっての機会はこれまで、災害とともに訪れることが多かった。最初に訪れたのは、2001年9月11日の悲劇的な事件である。空港のセキュリティスキャナにテラヘルツイメージ装置が適用できるかもしれないという期待から、2002～2010年には多額の政府補助金が投じられたが、その分野で最終的に選ばれたのは、高周波数マイクロ波イメージング技術だった。

多くの空港に現在、20～30GHz（波長15～10mm）の信号源と検出器を

利用するミリ波スキャナが備えられており、搭乗者の3次元(3D)画像を生成して隠し持っている物体を検出する。これらのスキャナの次世代版には、80~90GHzの技術が採用される可能性が高く、テラヘルツ範囲にさらに近づく見込みである。無線通信というはるかに大規模な市場でミリ波技術が利用されたことが、技術開発に対する投資の拡大と、製品コストの低下につながった。

忘れもしない2つ目の出来事は、2003年のスペースシャトル「コロンビア号」の事故である。宇宙探査機の機体に対する断熱材の接着に欠陥があったことが原因とされている。テラヘルツイメージングは、その後のミッションの安全性を確保するための診断ツールの1つとしてNASAによって導入された。このプロジェクトにおいてコストは問題ではなく、米ピコメトリクス社(Picometrix)は、数台の時間領域スキャナをNASAに供給した。断熱材はテラヘルツ範囲における透過性が非常に高く、このケースにおいてテラヘルツイメージングは、X線や超音波画像装置を補完する実行可能な技術だった。

時間領域テラヘルツイメージングシステムを開発する企業は、産業プロセスや製品品質管理の分野でそれを上回る成功を収めたが、X線や超音波イメージングとの競争は激しい。確立されている技術ほど、価格と信頼性の面で勝る傾向にある。そのため、テラヘルツシステムの方が性能が高い場合が多いとはいえ、顧客は、より実証された手法を選択する傾向が高く、新しい技術を扱うことによるリスクを負うことを望まない。

災害以外にも、農業や産業分野におけるテラヘルツイメージングの需要は高まりつつあるようだ。技術開発も引

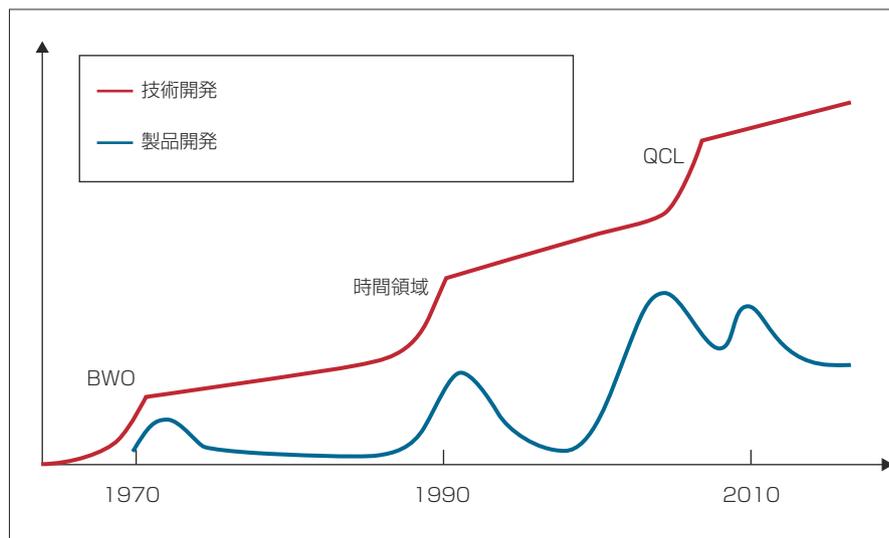


図1 テラヘルツ関連の技術開発と製品開発のサイクルを示したグラフ。(提供:マイクロテック社)

き続き着実に進歩している。ビデオレートでのイメージングに対する2つの新しいアプローチとして、プラズモン検出器の2次元(2D)アレイと、テラヘルツ画像を近赤外(near-IR)領域にアップコンバートする方法がある。ほかのスペクトル帯域では成し遂げられなかった、目に見えない世界を明らかにすることができる。

プラズモン検出器とアップコンバージョンイメージング

半導体アルミニウムガリウムヒ素/ガリウムヒ素 (AlGaAs/GaAs) ナノ構造の純度が近年高まったことで、スペクトルの光学領域におけるプラズモンの概念を、マイクロ波帯やテラヘルツ帯に適応させることが可能になっている。残念ながら、標準的な2次元プラズモンが観測できるのは、その周波数が $\omega > 1/\tau$ の場合のみである。ここで、運動量緩和時間 τ は基本的に、温度の上昇とともに短くなる。したがってプラズモン効果は、周波数が十分に大きく温度が十分に低い場合のみ観測される⁽¹⁾。

実際、 $f < 500\text{GHz}$ の応用分野で有用

な周波数における2次元プラズマ波は、 $T < 80\text{K}$ の極低温でしか観測されていない⁽²⁾。この事実は、プラズモンエレクトロニクスにおけるテラヘルツ応用の進歩に対する深刻な妨げとなっている。

この制約を回避するための1つの方法が、相対論的プラズマの励起を利用することである。相対論的プラズマとは、ゲート型2次元電子システムで最近発見された新しい種類のプラズマ波である⁽³⁾。弱く減衰されたこのプラズマ波は、 $2\pi\sigma > c$ (σ はガウス単位の2次元導電率)という高導電率の電子システムで励起され、強いポラリトンの性質を持つ。このような相対論的プラズモンは、マイクロ波とテラヘルツ周波数未満の範囲で、室温まで存続することが実証されている。

米テラセンス社(TeraSense)の検出器では、テラヘルツ放射が、結晶表面上に蒸着された広帯域アンテナ構造を介して相対論的プラズマ波の交番電位に変換される。さらに、プラズモン導波路が非対称であることから、プラズマ波の交番電位は整流されて、測定された光応答信号が生成される。検出器

のジオメトリは、具体的なテラヘルツ周波数帯域に合わせて選択できる。

テラセンス社は、このような検出器の2次元アレイを開発し、4096ピクセルのカメラを実現した。100GHzで最大出力100mWのコンパクトなインパット (IMPATT) ダイオードジェネレータを照射源として使用することで、このテラヘルツカメラによって、ピーナッツやトウモロコシなどの穀類作物や油生産工場に混入している、発がん性のあるマイコトキシン産生菌を検出することができる。別の応用分野として、テラヘルツ画像は、アスペルギルス・フラブスやアスペルギルス・パラシテイクスとして知られるヘーゼルナッツに含まれるカビの存在を示す。これらのカビ

は、非常に危険な発がん性物質であるアフラトキシン B₁ を生成する (図2)。

もう1つのテラヘルツイメージング手法は、テラヘルツ画像をより周波数の高い近赤外光にアップコンバートするものである。CCD (Charge Coupled Device: 電荷結合素子) カメラによるこれらの画像のアップコンバージョンと検出は、フェムト秒レーザーによって生成された広帯域のテラヘルツパルスを用いて、20年以上前に最初に実証されている⁽⁴⁾。

ここでは、ミキシングレーザーと非線形結晶内のテラヘルツパルスによってテラヘルツ画像がアップコンバートされ、電気光学効果によってレーザー波長で直交偏光された信号が生成された。

この信号はテラヘルツ電磁場に比例するため、テラヘルツビームで符号化された画像はレーザーの波長に移すことができる。この画像を検出するには、レーザービームを元の偏光でフィルタ除去する必要があり、偏光フィルタによってこの処理が行われた。得られた画像のコントラストは優れてはいなかったが、この概念を初めて実証するものだった。

米マイクロテック社 (Microtech) が開発した高出力で狭帯域のテラヘルツ波源 (1.5THzで最大平均出力3mW) により、同様のプロセスで生成された画像のコントラストは大幅に改善されている^{(5) (6)}。

狭帯域ピコ秒レーザーとテラヘルツパルスを非線形結晶内でミキシングする

光産業技術マンスリーセミナー



Optoelectronics Industry and Technology Development Association

プログラム (12~1月)

No. / 開催日	講演テーマ / 講師
第415回 12月19日 (火) 15:30-17:30	「太陽電池セル・モジュールの最新業界動向および技術開発動向」 講師： 中村 京太郎氏 (明治大学)
第416回 1月16日 (火) 15:30-17:30	「空間多重光伝送技術の進展 ～光通信も「京」の時代へ～」 講師： 森田 逸郎氏 (株式会社KDDI総合研究所)

- 場所 一般財団法人光産業技術振興協会
- 定員 各60名
- 参加費 光協会賛助会員：1,500円 (税込み) / 一般参加：3,000円 (税込み)
※支払いは、当日受付にて現金でお願いします。

- 申込方法 オンライン申込フォーム >>> http://www.oitda.or.jp/main/monthly/monthly_postmail.html
- 申込締切 定員になり次第締め切ります。なお、締め切った場合にはWeb上にその旨を掲載します。

問い合わせ先

一般財団法人光産業技術振興協会マンスリーセミナー担当 間瀬、潮田
〒112-0014 東京都文京区関口1-20-10 住友江戸川橋駅前ビル7F TEL:03-5225-6431 FAX:03-5225-6435
E-mail: mly@oitda.or.jp URL: <http://www.oitda.or.jp/>

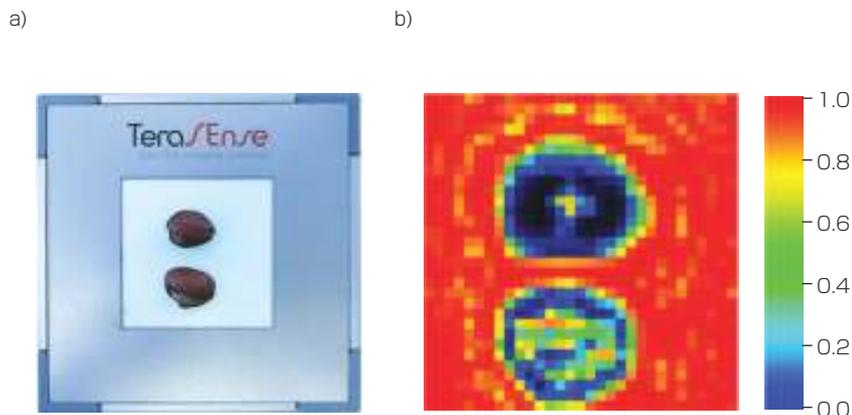


図2 可視光(a)とテラヘルツ範囲(100 GHz、b)のヘーゼルナッツ画像。テラヘルツ画像では、上のナッツがカビで汚染されているのがはっきりとわかる。テラヘルツスペクトル範囲の光の方が、カビに強く吸収されるためである。(提供:テラセンス社)

ことにより、レーザラインの両側にスペクトル側帯波が生成される(図3)。ノッチフィルタを使用して、1064nmにおけるバックグラウンドを減衰すると、 $\omega_{\text{pump}} + \omega_{\text{THz}}$ (波長1058nm)と $\omega_{\text{pump}} - \omega_{\text{THz}}$ (波長1070nm)に対応する側帯波が観測される。ノッチフィルタをロングパスフィルタに置き換えると、波形の上下振動(と短波長側の側帯波)がほぼ完全に除去され、1070nmの側帯波だけが残る。この実験では、スペクトル側帯波も直交偏光された。

アップコンバートされたこの信号は、画像をテラヘルツビームから近赤外に変換するために使用できる。コリメートされたテラヘルツビーム内に物体を配置し、非線形結晶内で近赤外レーザビームをそれに照射してミキシングすることによって、これが行われる。レーザビームのフィルタ後の側帯波に画像が含まれ、CCDおよびCMOSカメラによってそれが検出される。

スペクトルフィルタと偏光フィルタの組み合わせによって、非常にコントラストの高い画像や映像が得られる。この手法を用いたテラヘルツ映像の例は、<http://mtinstruments.com/movies/>

leafpptvideo.mp4、<http://mtinstruments.com/movies/envelopepptvideo.mp4>、<http://mtinstruments.com/movies/teflonvids.mp4>で参照できる。

側帯波のスペクトル分離は、テラヘルツ周波数によって定義される。1070nm側帯波の実験では、1.5THzだった。このイメージング手法は、より狭帯域のレーザとフィルタを使用することにより、さらに低いテラヘルツ周波数(おそらく100~300GHzまで)へと拡張することができる。そうした

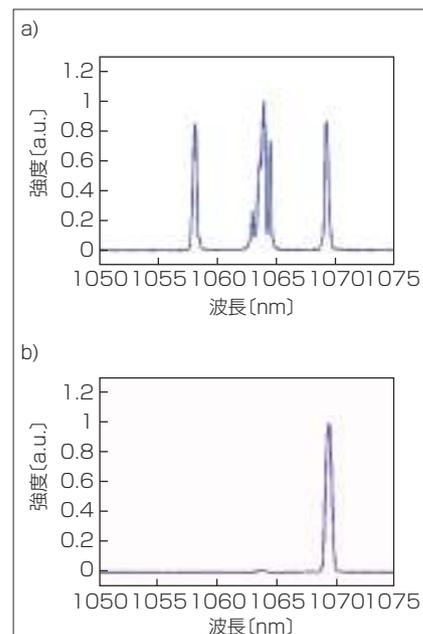


図3 アップコンバートされた信号のスペクトルに対し、(a)はノッチフィルタを使用して1064nmにおける上下振動を減衰した様子。(b)はロングパスフィルタを使用して1064nmにおける上下振動を除去した様子。(提供:マイクロテック社)

低い周波数では、より高出力のテラヘルツ光源が使用できるため、画像コントラストのさらなる改善が可能で、多様な新しい応用分野におけるテラヘルツイメージングシステムの需要拡大が期待できる。

参考文献

- (1) I. V. Andreev et al., Appl. Phys. Lett., 105, 202106 (2014).
- (2) W. Knap et al., J. Infrared Millim. Terahertz Waves, 30, 1319 (2009).
- (3) V. M. Muravev et al., Phys. Rev. Lett., 114, 106805 (2015).
- (4) Q. Wu et al., Appl. Phys. Lett., 69, 1026-1028 (1996).
- (5) P. Tekavec et al., "Terahertz generation from quasi-phase matched gallium arsenide using a type II ring cavity optical parametric oscillator," Proc. SPIE, 8261, 82610V (Feb. 9, 2012).
- (6) P. Tekavec et al., "Video rate THz imaging based on frequency upconversion using a near-IR CMOS camera," Proc. CLEO 2014, STh4F.7 (2014).

著者紹介

ヴィアチェスラフ・M・ムラヴェフ (Viacheslav M. Muravev) は、米テラセンスグループ社 (TeraSense Group) の副社長、ゴンボ・E・ツィディンジャポフ (Gombo E. Tsydynzhapov) は同社シニアエンジニア、イゴール・V・ククシュキン (Igor V. Kukushkin) は同社社長。URL: <http://terasense.com>。イアン・マクニー (Ian Mcnee) は米マイクロテック・インスツルメンツ社 (Microtech Instruments) のアプリケーションエンジニア、ウラジミール・G・コズロフ (Vladimir G. Kozlov) は同社創設者兼CEO。e-mail: info@mtinstruments.com、URL: www.mtinstruments.com。