



展 TENBO 望

小型半導体素子 “共鳴トンネルダイオード”を用いた テラヘルツイメージング



田中 覚
Tanaka Satoru

(パイオニア(株)研究開発部)



向井 俊和
Mukai Toshikazu

1 はじめに

電波は放送用途や無線通信用途などで古くから広く活用されてきている。近年、携帯電話や無線 LAN など高周波帯での無線通信利用が増大したため帯域が逼迫してきている。さらに、高画質映像などの大容量データの利用増加やスマートフォンなどの普及に伴い、無線通信の更なる高速化が求められている。将来の高速無線通信実現のためには周波数の向上が不可欠であり、マイクロ波やミリ波よりも更に高周波の電磁波であるテラヘルツ波（1テラヘルツは 10^{12} Hzに相当し、テラヘルツ波は $0.1\sim 10\times 10^{12}$ Hzの帯域の総称）に大きな期待が寄せられている。光はテラヘルツ波より高い周波数を持つので、テラヘルツ波は電波領域と光領域の間に位置する（図1）。このことからテラヘルツ波は、電波の特性（主に物質透過性）と光の特性（主に制御容易性）の両方を備えていると考えられ

る。近年のファイバーレーザーや電子デバイスの進展によりテラヘルツ波を簡単に発生、検出できるようになり、テラヘルツ波領域の研究開発が活発化してきた。

2 テラヘルツ波

テラヘルツ波はプラスチックや紙、繊維、セラミックを透過可能だが、水分では大きく減衰し、金属は完全導体として振る舞うため透過することはできない。また、光と同様にミラーによる反射や、レンズによる集光など制御は容易である。電磁波としては、光よりも波長が長いため解像度の点では劣るものの、エネルギーは可視光よりも2桁以上低く非侵襲検査用途などに適している。また、テラヘルツ帯では分子の水素結合状態や結晶構造変化によって吸収スペクトルが変化するため、近赤外光による分光分析と同様に物質の同定や分析を行う用途につい

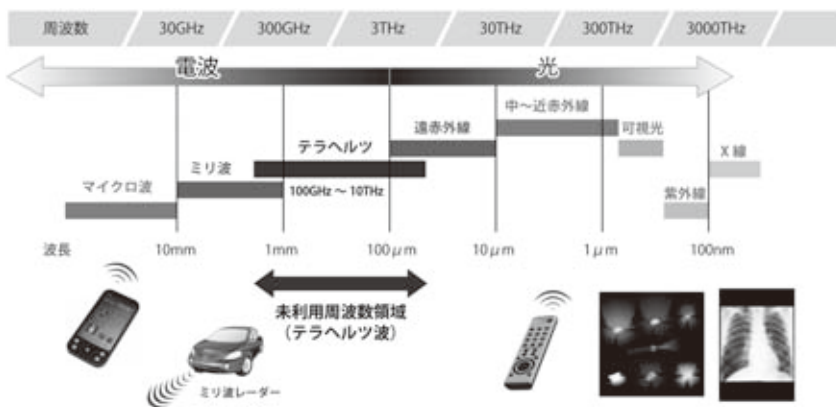


図1 テラヘルツ波と電波、光の領域

でも大きく期待されている。このようにテラヘルツ波は、様々な分野で応用を期待されている。

テラヘルツ波を発生、検出する方法は、電波技術と光技術の双方から研究開発が進められている。光技術を用いた代表的な方法は、半導体の電子を超短パルス光で励起してテラヘルツ波を発生させる技術で、1984年に D.H. Auston らによって提案された光伝導アンテナ (Photoconductive Antenna, 以下 PCA と呼称) である¹⁾。これは光励起により導電性が変化する半導体上にアンテナ電極を形成してバイアス電圧を印加し、その電極間に数十～数百フェムト秒 (10^{-15} 秒) の励起用超短パルス光を照射してキャリアを励起する。これによりパルス状のテラヘルツ波を発生、放射させるという手法である。PCA により発生したテラヘルツ波は、0.1～10 THz といった広い帯域を有する。さらに、PCA は検出デバイスとしても動作可能である。研究当初はチタンサファイアレーザーなどの比較的大型な高出力パルスレーザーが必要であったが、近年はファイバーレーザー技術の進展もあり、パームトップサイズの光源が入手可能となった。これにより、PCA を用いたテラヘルツシステム全体の小型化も着実に進展しているが、本質的にキャリア励起用の外部光源が必要なため、ポータブルタイプのシステム実現にはもう少し時間が必要と考えられる。

一方の電波技術による方法は半導体を用いた電子デバイスであり、常温駆動でのテラヘルツ波の発振や検出、高周波数化の研究開発が盛んである。1957年に発明されたエサキダイオードが先駆けとなり、量子効果を活用してより高速で動作する各種構造が検討されてきた。マイクロ波発生技術の延長として、ガンダイオードやインパットダイオードなどの各種半導体デバイスが開発された。当初は極低温環境下や二次高調波、三次高調波でのテラヘルツ発振が主であった。そのような中で、共鳴トンネルダイオード (Resonant Tunneling Diode, 以下 RTD と呼称) は、1989年の E.R. Brown らによる基本波で 420 GHz の室温発振実現に始まり²⁾、2010年には 1 THz を超える 1.04 THz の発振が実現され³⁾、2012 年末時点ではその周波数は 1.4 THz にまで達しており、高速無線通信用テラヘルツ電子デバイスとして有力である。実際に発振周波数 0.3 THz の RTD を用いた 1.5 Gbps の非圧縮デジタル動画の高速無線伝送も検証済である⁴⁾。

3 RTD

今回、ローム(株)が開発した RTD の大きな特長は、1) 励起光源が不要、2) デバイスが小型で低消費電力、3) 同一デバイスで発振と検出の両方が可能な点である。その素子サイズは SMA コネクタを含めても、 $10 \times 20 \times 8$ mm と非常にコンパクトである (図2)。SMA コネクタ先端に配置されたチップが RTD 素子である。このデバイスの消費電力は約 15 mW 程度と非常に低消費電力である。

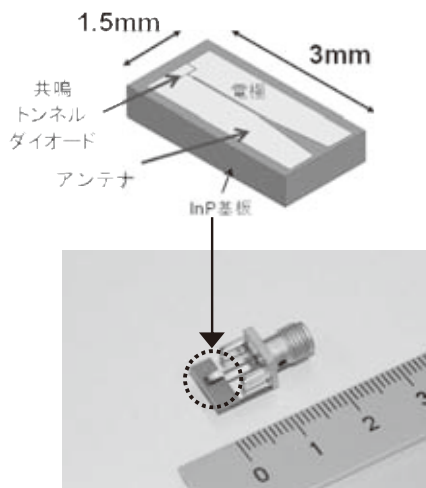


図2 共振トンネルダイオード素子外観



図3 RTDの電圧電流特性

RTDの電圧電流特性を図3に示す。動作電圧設定を切り替えるだけで、同一デバイスをテラヘルツ波の発生と検出に使い分けることが可能である。テラヘルツ波の発生にはRTDの負性抵抗領域を用いる。この領域では共振トンネル効果による単一周波数での発振動作となり、今回の素子では0.3 THzを発生している。テラヘルツ波の検出についてはデバイスの非線形性を用いる。極性が反対の負性抵抗領域近傍にバイアス電圧を調整したRTDにテラヘルツ波を入射させると、非常に高感度でテラヘルツ波を検出することができる。これらの動作は直流電源を接続するだけで実現可能であるため、高速通信用途だけではなく、より幅広い用途への展開が期待できる。

4 RTDを用いたテラヘルツ波イメージング

現在、テラヘルツ波は物質透過性などの特徴を生かし、無線通信以外の分野で既に利用され始めている。その分野は、セラミック内部の空隙の有無を判断する断面イメージの取得や、文化財修復における壁画や仏像の内部構造検査などの非破壊検査分野であり、主にイメージングが行われている。しかしながら、テラヘルツ波の産業応用はまだ一般的であるとは言えず、普及には安価な小型システムの実現が必要と考えている。そのため、我々は高速無線通信用テラヘルツデバイスとして期待されている小型半導体素子RTDのイメージングへの適用可能性を検証した。

検証に当たり、RTD素子から放射されるテラヘルツ波を小さく集光するため2枚のリレーレンズを内蔵したRTDモジュールを試作した(図4)。モジュールに搭載されたRTDの発振周波数は0.3THzである。このRTDモジュールを対向配置するだけでテラヘルツ波の透過イメージングシステムを構成できる(図5)。2つのモジュールをバイアス電圧によりそれぞれテラヘルツ波発生用、検出用として動作させた。また、これらのRTDモジュールの焦点位置にサンプルを配置しサンプルをX-Yの2軸で走査することで、二次元透過イメージを取得した。実際に目視では内部を見ることができない不透明樹脂ケース内にクリップや硬貨などの金属とタブレット菓子を配置(図6(a))し、ケースを閉じた状態で透過画像を取得した(図6(b))。金属部分はテラヘルツ波が反射されるため、透過像としては影となる。逆にテラヘルツ波が透過した部分は明るく表示される。透過像から、クリップの細い金属線の重なりも判別でき、また非金属であるタブレット菓子の形状も判別できることが分かる。空間分解能としては、1mm弱程度の物体が識別可能であったが、今回用いた0.3 THzよりも発振周波数が高いRTDを用いることで改善が可能である。これ

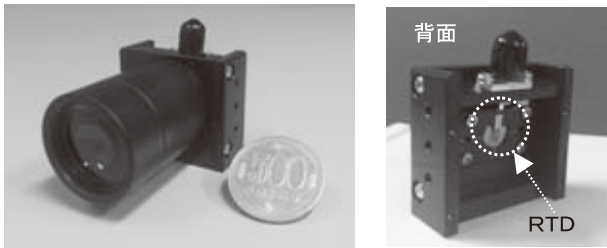


図4 レンズを装着した RTD モジュール

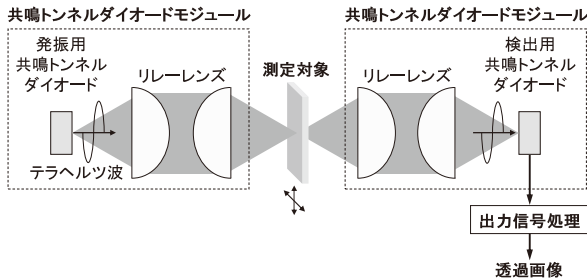


図5 透過イメージング測定系



(a) 不透明樹脂ケース開時



(b) テラヘルツ波透過画像 (ケース閉)

図6 不透明樹脂ケース透過イメージング例

らの結果は、テラヘルツ発生・検出用小型電子デバイスである RTD はイメージング応用が可能であり、将来的に小型・安価なテラヘルツイメージングシステムの実現が可能であることを意味している。

5 今後の展望

今回の結果から、将来のハンディタイプなど非常に小型なテラヘルツイメージングシステムの実現に向けた第一歩を踏み出すことができたと言える。現在、テラヘルツ波はデバイスの研究開発はもとより応用調査研究も活発に行われており、今後いろいろな分野で実際に利用される段階に入ってくると考える。我々も高解像度イメージングに向けた発振周波数の向上や更なる小型化などの技術検討を進めていく。今後は、具体的なアプリケーションに対してのデバイスやシステムの最適化などが望まれている。

参考文献

- 1) Auston, D.H., Chung, K.P., and Smith, P.R., *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 284-286 (1984)
- 2) Brown, E.R., Sollner, T.C.L.G., Parker, C.D., Goodhue, W.D. and Chen, C.L., *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1777-1779 (1989)
- 3) Suzuki, S., Asada, M., Teranishi, A., Sugiyama, H., and Yokoyama, H., *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 242102-242104 (2010)
- 4) Mukai, T., Kawamura, M., Takada, T., and Nagatsuma, T., Tech. Dig. Optical Terahertz Science and Technology 2011 Meeting, MF42, Santa Barbara (2011)