テラヘルツテクノロジーの将来展望

斗内 政吉

大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Future Prospect of Terahertz Technology

Masayoshi TONOUCHI

Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received June 13, 2005)

Terahertz (THz) technology is becoming increasingly important in both science and technology. THz time-domain spectroscopy (THz-TDS) and THz quantum cascade lasers (QCLs) provide a powerful tool to explore the nature of various kinds of materials for a low energy excitation and ultrafast dynamics; the THz imaging is expected to be applicable to security, factory testing and so on. Thus THz-TDS and QCLs have triggered the research field of THz-technology-based basic research and application research. In addition to those activities, the development of ultrafast devices and logic circuits in the fields of THz photonics and THz electronics has accelerated the growth of the THz research field such as THz wireless communication, THz network system, ultrafast ADCs and so on. This paper reviews the future prospect of such THz-technology-based research fields.

Key Words: Terahertz technology, Terahertz waves, Terahertz photonics, Terahertz electronics

1. はじめに

光と電波の間には、これまで利用が困難であった未開拓領域“テラヘルツ (THz)”帯 ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) が存在する。光通信で利用される波長 $1.55 \mu\text{m}$ は、周波数でいうと約 200 THz に対応し、また、 $10,000 \text{ THz}$ を超える光技術は、最先端の半導体ナノ加工技術、 30 nm 領域を支えている。一方、 1 GHz (0.001 THz) 近傍は、携帯電話などの無線通信として、 $60 \sim 80 \text{ GHz}$ は、車載用ミリ波レーダとして、また、数 GHz で動作する CPU も広く普及しており、約 100 GHz を上限として、電波応用・情報処理技術など、様々に利用されている。その様な周波数利用の観点から、 100 GHz から 100 THz にあるテラヘルツ帯は、電子デバイスの動作上限周波数に近く、良質の信号源や光源がなく、また、水の吸収が大きく影響するなど、利用に大きな障害があり、電波天文など宇宙の観測、フーリエ・ラマン分光など、特殊な計測・分析分野に限られていた。しかし今、科学技術の発展に伴い、テラヘルツ帯利用への道が開かれつつあり、次世代の産業に大きな役割を果たすことが期待されている。

テラヘルツ技術は、新しいセンシング機能を提供し、工業・医療・バイオ・農業・セキュリティなど様々な分野における応用が見込まれている。また、情報通信分野においては、利用電磁波のますますの高周波化が進んでおり、数百 GHz の無線通信が実現される時期も遠くはな

い。ナノ技術の発展に伴って、テラヘルツ動作を目指す半導体デバイス、動作周波数 200 GHz を目指す超伝導単一磁束量子 (SFQ) 論理回路の開発も急速に進展し、高速信号処理技術などテラヘルツ帯信号処理が可能になりつつある。テラヘルツ技術は、そのような次世代の機能センシング・情報通信・エレクトロニクスの基盤となるべき科学技術分野を切り開くとともに、基礎科学の分野においても不可欠な分野である。テラヘルツ帯には、固体中の光学フォノン散乱・プラズマ周波数、イオン分極・配向分極などの誘電性、超伝導体エネルギーギャップ、分子・固体中の各種振動/分子間相互作用など興味深い物性が存在し、また、生体温度領域にもあることから、バイオ・生体活動を科学する重要なプラットフォームであり、更に、テラヘルツ波を観測することで宇宙誕生の鍵を解く情報収集が期待されるなど、サイエンスの宝庫でもある。1893年に発刊された米国物理学会誌“*The Physical Review*”第1巻第1号第1ページは、赤外分光に関する論文から始まっており、古くから光と電波の境界領域は研究者の興味を引いてきた¹⁾。今、100年の時を超え、テラヘルツ研究は新たなステージへと発展を始めている。

以上のような背景において、2004年度、総務省からの委託を受け、(財)テレコム先端技術研究支援センター (SCAT) がテラヘルツテクノロジー動向調査委員会を設置し、同調査を実施した。本報では、その“テラヘルツテクノロジー動向調査報告書”²⁾の中から、テラヘルツ技術を

融合させることで切り拓かれる新しい応用分野や研究課題について簡単に紹介する。

2. テラヘルツテクノロジーの新展開

テラヘルツに関する研究は様々な分野で行われてきた。大きく分けると3つの分野に整理できる。まず、現在注目される“テラヘルツ”を牽引しているのが、テラヘルツ波(Terahertz Waves), また、次世代の情報通信の鍵を握るのがテラヘルツフォトンクス(Terahertz Photonics), そしてあらゆる基盤となるのがテラヘルツエレクトロニクス(Terahertz Electronics)分野である。その対象となる応用分野も情報通信, デジタルエレクトロニクス, セキュリティ, 固体物性, バイオ, 生体分析など多岐にわたっている。それらが, 科学技術の進展によりテラヘルツ帯において共存・融合を始めた。今まさに“テラヘルツテクノロジー”を基盤とした新研究開発領域を創成し, 総合的な融合産業応用分野の開拓を目指すことを提案する。(Fig. 1)

テラヘルツ波研究分野においては, 2つの重要な進展があった。第一は, 時間領域テラヘルツ電磁波発生・検出手法の開発である。これは, フェムト秒レーザーを用いることで, 超高速電流変調を実現し, 超高速光スイッチを用いて, 超短電磁波パルスの発生と時間遅延を用いたその電磁波波形の時間領域検出を実現したもので, 現在ではそのフーリエ成分が数 GHzから百THzを超える超ブロードバンドテラヘルツ波が実現されており, 様々な分析応用やそのシステム開発が行われている³⁻⁵⁾。第二のエポックメイキングは, 量子カスケードレーザー(QCL)^{6,7)}である。ナノ技術の進展により, 高精度に制御された半導体量子井戸構造の作製が可能となった。レーザー発振は, 井戸型構造におけるサブバンド間遷移を利用したもので, 現在までに2.1 THzまでの発振が確認され, QCLを用いた分光研究なども始まっている。

テラヘルツフォトンクス研究分野では, 光・電磁波変換の研究が急速に進展し, フォトミキシング技術を用いて, 高出力のテラヘルツ波の発生が可能となっている⁸⁾。また, 現在, 波長多重技術で行われている光通信において, 将来の大容量化を目指し, ソリトン通信などの研究開発も進んでおり, 1チャネルあたりサブテラビットの情報伝達が可能となっている。これらは, テラヘルツ技術が, 情報通信技術にブレークスルーを与え, 新しい応用

展開も含めて大きな進展をもたらすことを示している。テラヘルツエレクトロニクス研究分野では, 超高速半導体を用いたHEMTの最大発振周波数が0.5 THzを超え, また, 集積化により超高速AD変換器の開発も進んでいる⁹⁾。また, SFQ論理回路の研究では, 動作周波数20 GHzのマイクロプロセッサが, 既に実現されており¹⁰⁾, まさに, テラヘルツデジタル信号処理技術を利用できる環境が整いつつある。

これらの研究が個々に進めてきた研究開発を統合的に推進することで, 研究開発を更に加速できるとともに, 新しい応用が切り開かれることが期待される。本テラヘルツテクノロジーが目指す新産業展開の概念をFig. 2にまとめている。

3. テラヘルツ技術が切り拓く新しい応用分野像

3.1 応用が見込まれる分野

テラヘルツテクノロジーが切り拓く応用は, 主要3分野, テラヘルツ波・テラヘルツフォトンクス・テラヘルツエレクトロニクスの融合により, 情報通信・生命・医療・安全・健康・産業・環境・宇宙・科学など幅広い展開が期待され, 主な応用分野の観点からは, 情報通信(ICT)分野とセンシング分野に大別できる。ICT分野では, 今後ますます発展が要望されるユビキタスネットワーク社会における主要技術として, 不可欠な存在となることが期待される。センシング分野では, 生体・高分子・電子材料など様々な物質の分光分析, ならびにイメージング技術と組み合わせた医療診断・隠匿物検査・バイオメトリクスなどへの応用が研究されている。以下それぞれの分野における応用イメージを紹介する。

3.2 テラヘルツICT分野

より高速で, より大容量で, より自由な情報通信環境実現に向けて多くの努力がなされている。光通信の分野では, 10 GbpsのEthernetが有線系LANとして普及が始まっており, それらの進展に伴って, 基幹ネットワークでは, 毎秒数百Gbpの伝送量実現を目指して, 開発が進んでいる。近い将来, 基幹ネットワークノードやサーバーにおける大容量情報処理が不可欠であり, そのためにはテ

Fig. 1 Concept to form THz technology research field.

Fig. 2 Basic and application research fields due to the unification of THz waves, THz photonics, and THz electronics.

Fig. 3 Application images in the field of Information Communication Technology (ICT).

ラヘルツデバイス・集積回路の実現が重要な鍵を握る (Fig. 3)。現在では、その様な開発に向けて、化合物半導体集積回路による高速ADCや、SFQ回路による40 GHz $\times$ 4 = 160 Gbpsの光パケットスイッチ¹¹⁾の開発が進められている。

一方、無線LANはUWB (Ultra-Wide Band) や60 GHz無線などにより1 Gbpsの通信速度が実現されようとしており、10 Gbps無線開発に向けた研究開発も開始されている。将来、光ファイバ基幹ネットワークと無線通信システムがシームレスに連結されれば、大きな応用分野を開拓するものと期待される。例えば、F1レーシングカーとピットをつなぐ大容量・超高速データ通信、ファイバ敷設が困難なビル間通信、災害時の移動大容量無線などの実用化が望まれる。現在までに、NTTの永妻らは、UTC-PDとフォトミキシング技術を用いて、125 GHz (10 Gbps) 無線のフィールド実験を始めており、10 Gbpsの無線開発を進めている。テラヘルツ無線において問題となるのが、水蒸気による電磁波吸収である。Fig. 4にテラヘルツ電磁波の水による減衰量を示す。屋外の短距離の無線では、300 GHz程度までが現実的な無線通信帯であり、40 Gbps程度までは実現される可能性が高い。一方、屋内の短距離無線等では、0.9 THz帯まで利用可能範囲が広がる可能性がある。

3.3 センシング分野

テラヘルツ波は、様々な物質を透過し、X線・レーザー光などと比較して安全であり、物質固有の透過・吸収・反射特性 (指紋スペクトル) を示すなど、様々な利点を有している。特に、テラヘルツ帯時間領域分光法 (THz-TDS) の実現により、テラヘルツ帯における複素屈折率・複素誘電率・複素導電率などが容易に計測・評価できるようになり、様々な物質のテラヘルツ帯固有の物性を明らかにする手段が、大きなエポックメイキングをもたらした。

電子材料のテラヘルツ帯における物性を明らかにすることは、電子デバイスの高周波動作極限を明らかにし、高分子における分子間相互作用や水素結合の振る舞いなども探索できる。医薬品における結晶多形評価の可能性も

Fig. 4 Electromagnetic wave attenuation due to atmospheric absorption as a function of frequency. H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CO , CH_4 , and O_2 are taken into account in the 1976 U.S. standard atmospheric model @ sea level at a temperature of 288 K, a pressure of 1 atm, and a relative humidity of 55 %.

Fig. 5 Application images in the field of THz spectroscopy.

Fig. 6 Application images in the field of THz imaging spectroscopy.

指摘されており、その応用も期待されている。テラヘルツ電磁波は、水の吸収係数が大きく、その点から水の分析や、食品検査・管理手法としても期待される。また、テラヘルツ波を用いた光源抗体反応分析など新しい展開も期待される (Fig. 5)。

テラヘルツ波のもう一つの大きな特徴に、ビームとし

での取扱が容易であり、イメージング技術への応用が期待されている点がある。M. Nussらが葉の水分分布イメージングを報告して以来、様々な試みがなされてきた。深澤らは、THz-TDSによる半導体評価を可視化することで、半導体ウェファーの評価に応用できることを示した。また、川瀬らは、テラヘルツ分光による封筒内の禁止薬物検査技術を開発し、欧州Star-Tigerチームは94 GHzパッシブカメラを開発し、隠匿物検査への応用を勧めており、テラヘルツ技術の安全安心社会への貢献が期待されている (Fig. 6)。

テラビュー社を中心とした欧州プロジェクトでは、皮膚がん検査などへの応用を進めており、また、日本固有の応用として、テラヘルツ放射顕微鏡のLSI故障箇所検査器開発も進められており、テラヘルツイメージングの幅広い応用が期待されている。

以上の応用研究に先立ち、古くからテラヘルツ研究を牽引してきた分野として、宇宙・天文研究におけるテラヘルツ技術がある。ALMA計画におけるテラヘルツ検出器の開発は、世界的課題であり、着々と進められており、SMILESプロジェクトにおける衛星からのテラヘルツ帯地球環境計測、ならびにASTRO-Fにおけるテラヘルツイメージングアレーの開発など、大きなプロジェクトが推進されている。

このようなセンシング応用に加えて、テラヘルツICTとの融合による新しい研究開発分野の創成も期待される。センシングと無線を組み合わせたバイオメトリクス技術や、センサネットワークの新しい構築など分野融合によるシナジー効果も期待されている。

4. 取り組むべき課題

テラヘルツ産業を展開するに当たっては、様々な研究課題が存在する。一例として、周波数と各種デバイスの出力をまとめたものをFig. 7に示す。電氣的発生では、低周波から高周波に向かって周波数の-2乗に比例して減少し、光デバイスでは、高周波から低周波に向かって同様

に、周波数の2乗に比例して減少しており、特に0.5-30 THz帯域の高周波デバイスの開発が重要である。一方、テラヘルツ帯の計測機器の開発は、国内ではほとんど実施されていないことから、テラヘルツ工学の発展には、計測機器開発への投資が欠かせない。現在、アジレントテクノロジーは、250 GHz帯のネットワークアナライザーの販売を計画し、500 GHz帯の開発も進めていることから、国内における早期の研究開発の推進が望まれる。また、通信応用やセンシング・セキュリティ応用にはテラヘルツ電磁環境両立性(EMC)研究や標準化が不可欠であり、早期の着手が望まれる。更に、テラヘルツ帯における分子間相互作用など、これまで明らかにされていない物理現象に関する情報が秘められており、応用展開に向けて様々な物質のテラヘルツ物性データベースを構築することも必要不可欠である。その他、重要な課題としては、高感度テラヘルツ検出デバイス・テラヘルツカメラなどの開発、量子カスケードレーザーのチューナブル化・高出力化・低しきい値化・高温動作化、集積回路の高密度・低消費電力化、などが挙げられる。各応用分野における重要課題の具体例をTable 1に紹介する。これらを推進

Fig. 7 Typical CW output power from various devices as a function of frequency.

Table 1 Research and development targets for THz application.

Field	Task and Challenge
Information-communication	Tbps communication, THz wireless communication, Ultrafast data processing systems, THz IT devices, THz measurement equipments, THz sensor and Camera, THz sensor network, Biometrics, satellite communication, EMC
Bio/Medical/Medicine/Infrastructure	Cancer diagnosis, Immune array, Crystal polymorph separation, Diagnosis measurement systems, Data-base, Bio molecular, On-site THz imaging system, Bio EMC, FEL for medical service
Security/Environment/Infrastructure	Inspection system for hazardous materials/prohibited drugs, Data-base of hazardous materials/prohibited drugs, THz sensor and Camera, Environmental monitoring system and data-base, Traffic and road monitoring systems, disaster wireless communication, Gas and environmental diagnosis by QCL
Industry/Standards	THz-TDS/imaging system for industrial applications, Evaluation systems for semiconductor materials, nano materials, electronic materials and others, THz sensor and Camera, LSI-testing system, Monitoring, controlling and security handling systems for foods and agriculture, Data-base for foods and agricultural applications, Power, frequency and other THz standard system, EMC
Basic science/Astronomy	Functional THz-TDS/Imaging systems, THz emitting and controlling devices, Quantum-limit THz detectors, THz-FEL, THz local oscillators, Biomolecular structure analysis, data-base, other exploratory research

するにあたり、テラヘルツ研究分野は未成熟な分野でもあり、探索的・挑戦的要素も多く含むことから、基礎・基盤技術育成と応用分野開拓のため、産学官が協調して研究開発プロジェクトを進めることが重要である。

5. まとめ

テラヘルツテクノロジーの新しい枠組みとそれに基づく展望を紹介した。テラヘルツ波工学、テラヘルツフォトンクス、テラヘルツエレクトロニクスの3分野が融合することによる、情報通信・生命・医療・安全・健康・産業・環境・宇宙・科学など幅広い分野での応用の可能性を紹介した。応用実現に向けた課題の解決にあたり、分野にとらわれないボーダレスな取り組みが必要であることから、各省庁の強い連携のもと、効果的な産学官協調による研究開発プロジェクトが推進されることを強く希望するものである。

謝 辞

本解説は、テラヘルツ動向調査委員会が取り纏めた調査報告書から概要を抜粋したのもので、60名を超える調査委員会メンバー、(財)テレコム先端技術研究支援セン

ター(SCAT)の皆様、ならびに総務省情報通信政策局技術政策課・研究推進室の方々に、心から感謝いたします。

参考文献

- 1) E. F. Nicols: Phys. Rev. **1** (1893) 1.
- 2) テラヘルツテクノロジー動向調査報告書“未来を拓くテラヘルツ技術”，テラヘルツテクノロジー動向調査委員会/財団法人テレコム先端技術研究支援センター(2005年3月)。
- 3) B. Ferguson and X. -C. Zhang: Review Article Nature Materials **1** (2002) 26.
- 4) D. Mittleman (ed.): *Sensing with Terahertz Radiation* (Springer, Berlin 2003).
- 5) K. Sakai (ed.): *Terahertz Optoelectronics* (Springer, Berlin 2005).
- 6) J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho: Science **264** (1994) 477.
- 7) Q. Hu, B. S. Williams, S. Kumar, H. Callebaut, S. Kohen, and J. L. Reno: Semicond. Sci. Technol. **20** (2005) S228.
- 8) F. Nakajima, T. Furuta, and H. Ito: Tech. Dig. Int. Topical Meeting on Microwave Photonics, W4-5, 2004.
- 9) H. Nosaka, M. Nakamura, M. Ida, K. Kurishima, T. Shibata, M. Tokumitsu, and M. Muraguchi: Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International Volume 1 (2004) 101.
- 10) M. Tanaka, T. Kondo, T. Kawamoto, Y. Kamiya, A. Fujimaki, H. Hayakawa, N. Nakajima, Y. Yamanashi, A. Akimoto, N. Yoshikawa, H. Terai, Y. Hashimoto, and S. Yorozu: IEEE Trans. Appl. Supercond. (2005) in print.
- 11) S. Yorozu, Y. Hashimoto, Y. Kameda, H. Terai, A. Fujimaki, and N. Yoshikawa: Proc. IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing (IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2004) p. 20.

レーザーワード

テラヘルツフォトンクス(terahertz photonics)

テラヘルツ周波数帯の様々な機能を創製し、またその信号を利用する光エレクトロニクス分野の総称。光ファイバ通信における、情報伝達容量は、超短パルスを用いることで(光時分割多重方式)、チャンネルあたり毎秒テラビットを越える能力が実現されている。また、フォトミ

キシング技術を用いた、120 GHz(10 Gbps)無線通信のフィールド実験が開催されており、光エレクトロニクスにおけるテラヘルツ信号の利用が急速に開拓されつつある。(斗内 政吉)