

実用化に向けて加速するテラヘルツ技術

Terahertz Technologies Accelerating towards Practical Applications

永妻忠夫



テラヘルツ技術は、1990年代初頭の分光技術とイメージング技術への応用を皮切りに研究開発がブレイクし、間もなく四半世紀を迎えようとしている。主としてパルスレーザ技術と非線形光学によってけん引されてきたテラヘルツ技術は、その後、光通信分野で開発された技術や半導体エレクトロニクス技術の進展によって、高性能化と高信頼化が図られ、通信応用も現実のものとなりつつある。本稿では、テラヘルツ技術が注目されている背景と、最近の技術動向を概説する。

キーワード：テラヘルツ波、分光、イメージング、無線通信

1. はじめに

人類の電磁波開拓の幕開けは、19世紀末期から20世紀初頭にさかのぼる。また、電磁波の存在自体は1864年にJ.C. Maxwellによって予言され、今年で150年を迎える。その後、電磁波は、情報通信、センシング、計測、エネルギー、医療など、様々な分野で私たちの生活を豊かにしてきた。特に今日、私たちのごく身近な存在となったFTTH (Fiber To The Home)^(用語)とセルラ電話は、このおよそ四半世紀に発展した「光」ファイバ通信技術と「マイクロ波」通信技術が支えている。

これら光波とマイクロ波の境界に位置する電磁波領域(100 GHz から 10 THz の周波数領域)は、「テラヘルツ電磁波 (あるいはテラヘルツ波)」と呼ばれ、21世紀に残された最後の未開拓電磁波として注目されている(図1)。また過去から、30~300 GHz をミリ波、300 GHz 以上、電波の上限である3000 GHz (3 THz) までをサブミリ波という名称が存在しており、テラヘルツ波という言葉が頻りに聞くようになったのは、筆者の知る限り、1 THz を超える周波数成分を有するテラヘルツパルス波を分光⁽¹⁾やイメージング⁽²⁾に利用し始めた1990年代

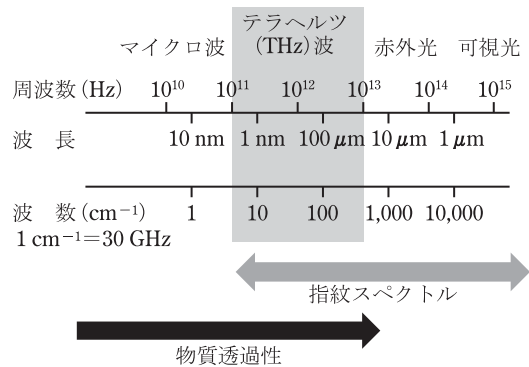


図1 テラヘルツ波の定義

頃からではないかと思われる。

ミリ波は既に私たちの生活の中に浸透しつつある。最近の代表例を挙げるとすれば、76 GHz 帯を利用した車載ミリ波レーダであろう。近年の半導体エレクトロニクス技術の進展により、システムとしての高機能化並びに低コスト化が進み、今後、「カーナビ」並みに普及すると言われている。テラヘルツ波の利用においては、コンシューマ向けのプロダクトはもう少し先になると考えられるが、分光、イメージングシステムの実用化が進んでいる。そして最近の特筆すべき進展の一つは、これまで化合物半導体トランジスタがけん引していたテラヘルツ帯の集積回路(発振器や増幅器等)が、シリコン(CMOS/Si-Ge)トランジスタで実現できつつあるとい

永妻忠夫 正員：フェロー 大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻
E-mail nagatuma@ee.es.osaka-u.ac.jp
Tadao NAGATSUMA, Fellow (Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka-shi, 560-8531 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.97 No.11 pp.918-923 2014年 11月
©電子情報通信学会 2014

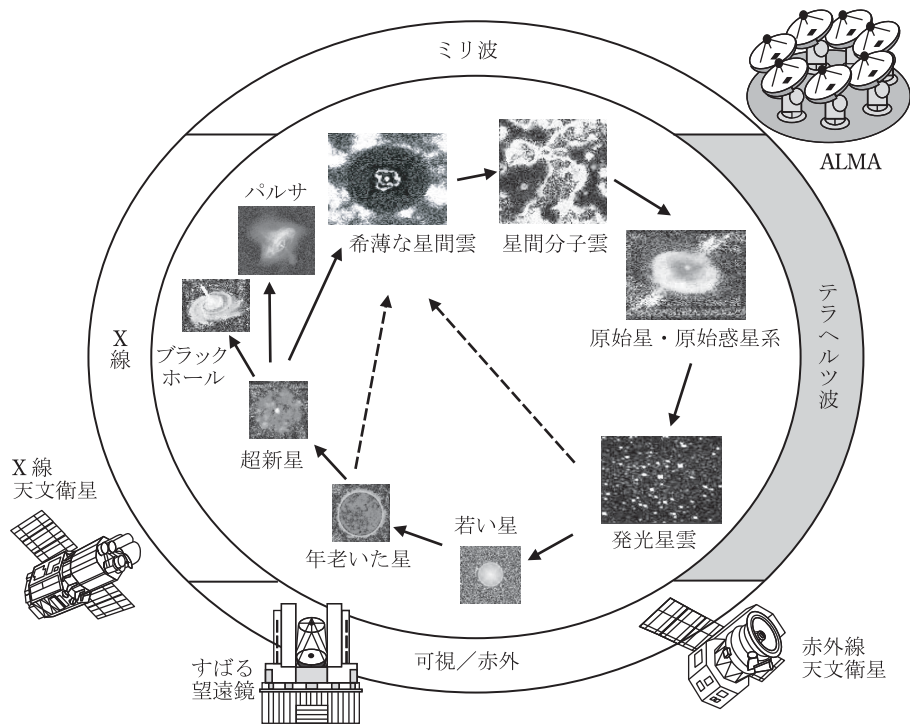


図2 星の一生とテラヘルツ波との関係

う点である。

本稿では、テラヘルツ波の応用という観点から注目されている理由や電磁波としての特徴、応用を実現するための部品・材料技術の最近の進展、並びに非破壊検査や情報通信市場ほかに向けた応用技術の動向についてその概要を紹介する。

2. テラヘルツ波とは

テラヘルツ波がこれまで暗黒の電磁波帯として長きにわたり利用できなかった理由は、電磁波の発生、検出技術が未熟であったからにはほかならないが、実は、この周

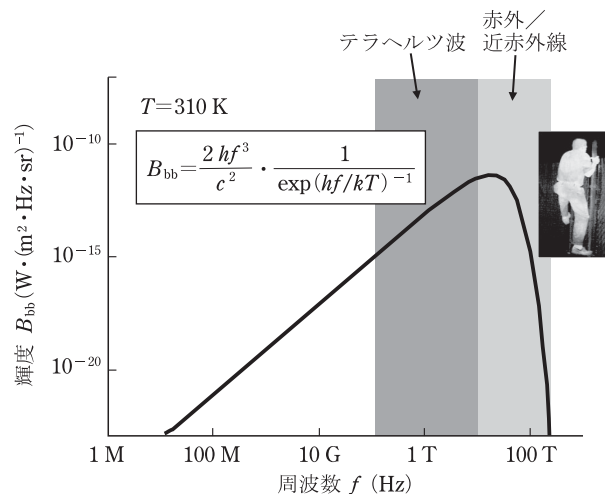


図3 黒体ふく射による人からの電磁波の放射

用語解説

FTTH Fiber To The Home (ファイバトゥザホーム) を略して FTTH (エフティーティーエイチ) と呼び、光ファイバを通信事業者から一般個人宅へ直接引き込み、ブロードバンド通信サービスを提供する。

黒体ふく射 温度を上げると、物体は電磁波を放出する。このことを(熱)ふく射と言ひ、特に、電磁波を反射しない黒色の物体(正確には、それで作られた箱や空洞)からのふく射を黒体ふく射と言ひ。

ショットキーバリアダイオード 金属と半導体との接合によって生じるショットキー障壁を利用したダイオードで、半導体 pn 接合ダイオードに比べると、多数キャリアのみによる非常に高速な動作が可能になり、高周波領域での利用に適している。

波数帯の電磁波は昔から私たちにとって大変身近な存在であった。

その一つは、ミリ波・テラヘルツ波電磁波(電波)が宇宙から地球に降り注いでいるというものである。現代の天文学においては、宇宙から到来する電磁波を図2に示すようにミリ波、テラヘルツ波、可視・赤外線、X線といった様々な波長で観測している。中でもミリ波からテラヘルツ波領域では、初期宇宙期の生まれつつある銀河や、銀河の形成・進化の過程、更には宇宙における物質の進化や生命の起源などに関する大変重要な知見を

得ることができる。ビッグバン以来、宇宙に放出された全フォトンの98%がテラヘルツ波であるとも言われているように宇宙はテラヘルツ波で満ちている。

もう一つ興味ある事実として、人体をはじめ温度を有する全ての物体は、黒体ふく射^(用語)としての電磁波エネルギーを放出している。図3は、絶対温度310 Kの物体(摂氏37度の人体に相当)が発する電磁波のスペクトル強度をプランクの黒体ふく射の式により計算したものである。近赤外線カメラを使うと暗闇でも人間が発する電磁波でその姿を見ることができると同じように、ミリ波・テラヘルツ波に感度を持つカメラ(電波カメラ)を使うと、例えば、壁、カーテン、炎の向こうの人物を写し出すことができる⁽³⁾。

3. テラヘルツ波の特徴と注目される理由

上述したように、人類の100年余にわたる電磁波の開拓と利用の歴史において、テラヘルツ波を除く全ての電磁波を、それぞれの特徴や性質に応じて利活用してきた。テラヘルツ波が現在注目されている理由を、テラヘルツ波が有する特徴を基に整理すると以下の3点になる。

第1は、テラヘルツ波領域には、気体や固体分子の固有の振動周波数(「指紋」スペクトル)が存在することから、X線(波長1 pm~10 nm)のように単に形状や構造を見るだけでなく、物質の周波数特性を調べること(分光と呼ぶ)で、その物質の種類が何なのかを決定する(同定と呼ぶ)ことができる。図4はビタミンの種類の違いで、吸収スペクトルが異なることを計測した例である⁽⁴⁾。もちろん、テラヘルツ波帯の材料開発を進める上で、材料の複素誘電率(損失と屈折率)を正確に知ることが重要であり、テラヘルツ分光の必要性は言をまたない。

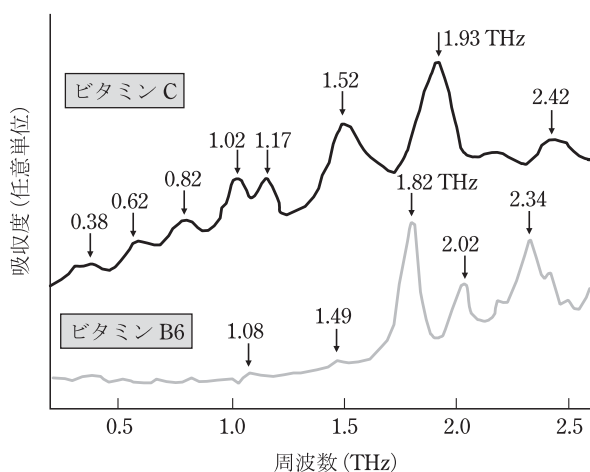


図4 ビタミンのテラヘルツ帯での吸収特性

第2は、テラヘルツ波は、赤外線などの光波に比べて、衣服、プラスチック、紙、(薄い)壁、霧、煙を透過する能力が高いということである。図5に示すように、衣服の材料であるナイロン、綿、ポリエステルは、おおむね1~1.5 THz程度までは10%以上の透過率を有する⁽⁵⁾。X線ほどの強力な透過性はないものの、物質をイオン化するほどのエネルギーはなく、特にイメージングへの応用において安全性の点で有利である。

上記二つの特徴は、分光、イメージングへの応用に直結するものであったが、第3の特徴は、無線通信応用における搬送波としての高周波性である。図6は、1900年頃にG. Marconiによって始まった無線通信の歴史を、開拓してきた搬送波周波数についてプロットしたものである⁽⁶⁾。これによると、2020年までにテラヘルツ波無線が使われるということになる。一方、図7のように、現在の主な無線通信の伝送速度と搬送波周波数との関係をプロットしてみると、伝送速度が搬送波周波数にほぼ比例して増加していることが分かる。今後、全ての周波数帯において、多値変調や空間多重による周波数利用効

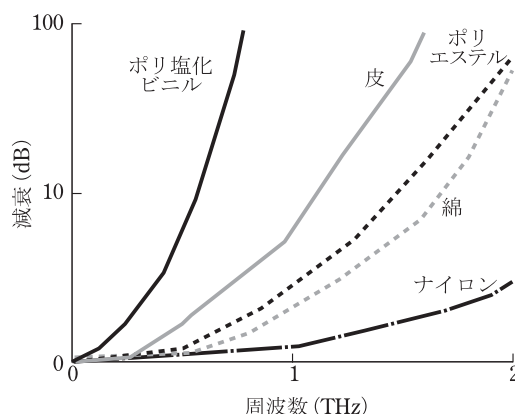


図5 衣服の材料のテラヘルツ波透過特性

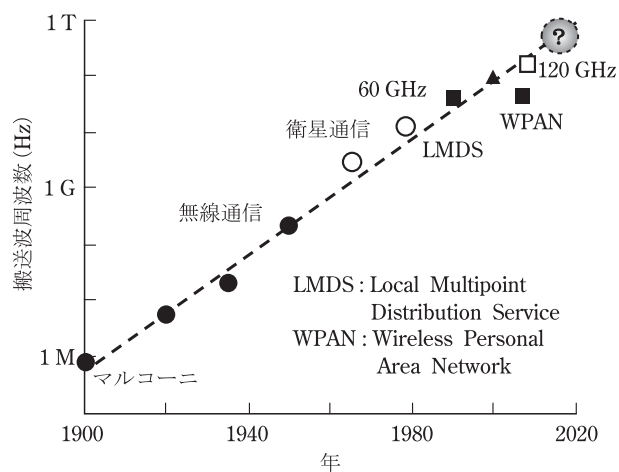


図6 無線通信における搬送波の高周波化の歴史

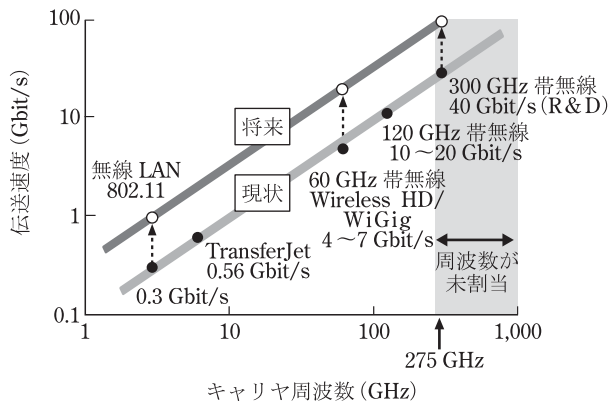


図7 無線システムと搬送波と伝送速度との関係

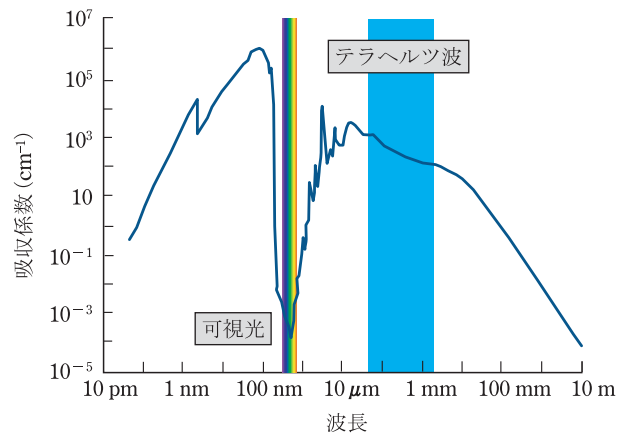


図9 水の電磁波に対する吸収特性

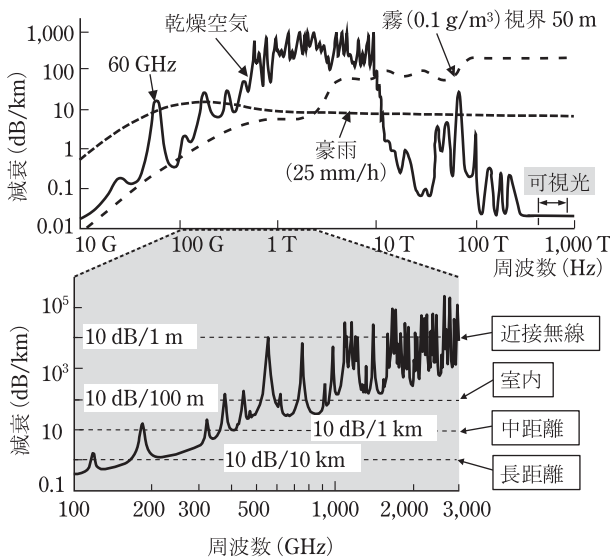


図8 電磁波の大気減衰特性

率の改善が進み、各伝送速度が数倍程度向上すると想定すると、2020年頃のテラヘルツ無線は100 Gbit/sを超える技術になっているのではないかと期待される。また、くしくも275 GHz以上の周波数領域は、これまで無線通信等の能動業務の国際的な周波数割当がなされておらず、最近、国際電気通信連合 (ITU) や IEEE において周波数割当の議論が活発化してきた⁽⁷⁾。

ここで、テラヘルツ波が持つ二つの重要な側面について触れておきたい。一つめは図8に示す大気による減衰である。周波数が1 THzを超えると、大気中の水蒸気や酸素分子による著しい吸収を受け、1 m伝搬するだけで1/10以上減衰する。この伝送媒体としての複雑な周波数特性は、通信応用だけでなく、遠隔センシングにおいても十分な考慮が必要である。更に、降雨による減衰も無視できない。降雨減衰は、100 GHzを超えると周波数にほとんど依存しなくなり20 mm/h程度の大雨で

は、上記の大気吸収に加えて約10 dB/kmの減衰を受ける。更に水のみに対する吸収特性を見ても、図9に示すように、人体を含め、水分を含有した物質をほとんど透過できないことが分かる。

4. テラヘルツ波技術の発展の経緯

図10は、テラヘルツ波技術の進展の歴史を年代ごとに整理したものである。1980年代に発展したフェムト秒パルスレーザー光と、非線形光学結晶あるいはフォトコンダクタとの組合せによる「テラヘルツパルス波の発生・検出技術」(図11)は、1990年代前半、分光技術⁽¹⁾とイメージング技術⁽²⁾へ応用されたのをきっかけに、テラヘルツ波研究のブレイクを引き起こした。また同年代半ばには、パルス波だけでなく、周波数可変の連続波 (CW) の発生技術として、パラメトリック発振器⁽⁸⁾や、フォトダイオード⁽⁹⁾やフォトコンダクタ⁽¹⁰⁾を用いたフォトミキシング技術が生まれている。2000年代になると、いよいよテラヘルツ波の産業応用の第一歩として、分光器の商品化と通信応用に向けた研究が始まった⁽¹¹⁾。また、量子カスケードレーザー^{(12),(13)}やボロメータアレーによるテラヘルツカメラ^{(14),(15)}が開発された。またパルスレーザーについては、1980~1990年代に光ファイバ通信で培われたファイバレーザーが利用され始めたのもこの頃である。

2010年代になると、分光・イメージングシステムの高性能化のために、発生デバイスの広帯域化と高出力化、検出デバイスの高感度化が進められてきた。高出力(強度)化に関して最近の重要なトピックスは、非線形光学結晶にレーザー光パルス照射する際に、パルス光の波面を制御することで、発生したテラヘルツ波を効率良く集めることに成功したことである^{(16),(17)}。これにより、従来よりも数桁高い電界強度 (>1 MV/cm) のテラヘルツパルス波を発生できるようになった。この値

2010年代：実用化に向けた新たな展開

電子デバイス・集積回路技術の進展(Siでも…)
計測技術の進展
(スペクトルアナライザ・ネットワークアナライザ)
周波数割当の議論

2000年代：テラヘルツ波の産業応用の萌芽

通信応用(2002), テラヘルツ量子カスケードレーザ(2002)
分光システムの商品化, テラヘルツカメラ(2008)

1990年代：光技術によるテラヘルツ研究のブレイク

テラヘルツパルス波の進展→イメージング, 分光の提案
テラヘルツパラメトリック発振器(1996), UTC-PD(1996)

1980年代：超高速光エレクトロニクス

ピコ秒・フェムト秒パルスレーザ, フォトコンダクタ
化合物半導体デバイス→光通信の発展をけん引

図10 テラヘルツ波の研究開発の変遷

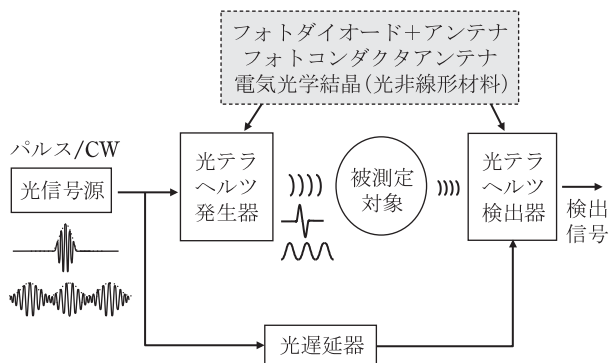
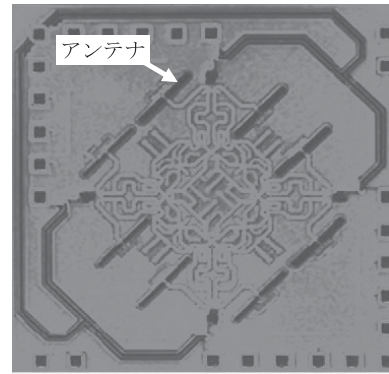


図11 光技術を利用したテラヘルツ分光・イメージングの構成例

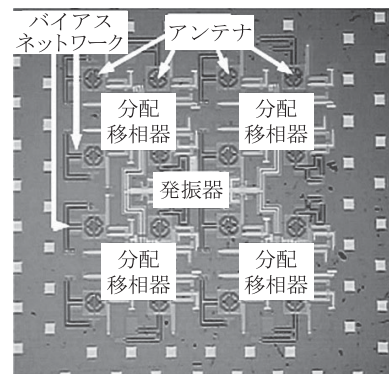
は、絶縁体の破壊強度に匹敵するものである。

2010年代のテラヘルツ技術における最も重要なブレイクスルーと言えば、電子デバイス技術の急速な進歩であろう。100 GHzを超える周波数領域では、高いチャネル移動度を生かした化合物半導体が、トランジスタのカットオフ周波数並びにICの動作周波数において、常に最高記録を塗り替えている。米国ノースロップグラマン社は、2011年に、ゲート長30 nmのInP-HEMTで、620~670 GHz帯で動作する受信機IC⁽¹⁸⁾、最近では、850 GHz帯の受信機ICを発表している⁽¹⁹⁾。また、フラウンホーファー研究機構の応用固体物理研究所が、ゲート長20 nmのGaAsメタモルフィックHEMTを用いて、220~480 GHzの通信用MMICチップセットを開発している⁽²⁰⁾。

100~300 GHz帯においては、この2~3年、Siデバイスの台頭が始まりつつあり、CMOS ICによる発振器



(a) 260 GHz帯 8素子アレーアンテナ



(b) 280 GHz帯 16素子アレーアンテナ

図12 Si-CMOSによるアレーアンテナ集積型の発振器

の出力が化合物半導体IC並みに大きくなった。それを可能にした一つの技術は、アレーアンテナと一体化した電力合成技術である。図12(a)は、米国Cornell大学のAfshariのグループが、65 nm CMOSプロセスを用いて試作した、アレー発振器(8素子、出力1.1 mW@260 GHz)のチップ写真である⁽²¹⁾。図12(b)は、CaltechのHajimiriのグループによる280 GHz帯の16素子アレーアンテナで、各アンテナに給電される信号の位相を制御することで、角度80°のビームステアリング機能(出力190 μW)を実現している⁽²²⁾。アナログ設計技術の粋を集めたものと言っても過言ではない。

ITRSロードマップによると、配線のハーフピッチが10~12 nmを迎える2020年頃には、量産レベルのSi-CMOSデバイスの最大動作周波数が1 THzに達するとされており、300 GHzを超える各種RF ICがCMOSでラインアップされるであろう。しかしながら、GaNやInPデバイスは耐圧の観点から、Siデバイスを大幅に凌駕する性能を有しており、高出力が要求される応用では不可欠な存在である。究極のテラヘルツICは、化合物半導体とSi半導体ICを融合したものになるのではないかとと思われる。

電子デバイスによるテラヘルツ波の検出に関しては、ボロメータやショットキーバリアダイオード^(用語)

(SBD: Schottky-barrier diode) の利用が主流である。いずれも数 THz 以上の帯域を有している。また、プラズマ波効果^{(23), (24)}や共鳴トンネル効果^{(25), (26)}を利用したテラヘルツ波帯ならではの電子デバイスの研究開発が進んでいる。これらは、発生、検出の双方に利用できる点で興味深い。

最後に特筆すべきこととして、デバイスやシステム開発を支える計測技術の進展が挙げられる。計測機器メーカーの努力により、1 THz 内外までのネットワークアナライザ、スペクトルアナライザ、パワーメータ等のラインアップがそろいつつある。

5. まとめと今後の展望

本稿では、近年、実用化が加速し、今後もその発展が期待されているテラヘルツ波技術の動向についてまとめた。誌面の都合で、その一端しか紹介できなかったが、Si 半導体デバイス技術でテラヘルツ IC が実現できるようになった意義は大きい。また、フォトニクス技術もテラヘルツシステムの性能や利便性の向上のために不可欠である。今後、これらの技術に加えて、シリコンフォトニクス技術、Si-化合物半導体・異種デバイス融合技術、更には MEMS 技術、メタマテリアル、フォトニック結晶など、最近の様々な先端技術を、特定の応用に向けて組み合わせ、集積化していくことで、テラヘルツ波の応用と市場が拡大していくものと期待される。

文 献

- (1) D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter, and Ch. Fattinger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 7, no. 10, pp. 2006-2015, Oct. 1990.
- (2) B.B. Hu and M.C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 16, pp. 1716-1718, Aug. 1995.
- (3) M. Sato and K. Mizuno, "Millimeter-wave imaging sensor," in *Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications*, I. Minin, ed., pp. 331-349, InTech, 2010.
- (4) G. Zhao, B. Yu1, and C. Zhang "Terahertz spectroscopic investigation of four kinds of vitamins," *J. Appl. Phys.*, vol. 106, 104702, Nov. 2009.
- (5) M.C. Kemp, "Millimetre wave and terahertz technology for the detection of concealed threats : a review," *Proc. SPIE 6402*, 64020D, 2006.
- (6) T.S. Bird, "Recent progress in microwave antennas for wireless communications," *Proc. Asia-Pacific Microwave Conference 2011*, Keynote address, Melbourne, Australia, Dec. 2011.
- (7) <http://www.ieee802.org/15/pub/SGthz.html>
- (8) K. Kawase, M. Sato, T. Taniuchi, and H. Ito, "Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO3 with monolithic grating coupler," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 18, pp. 2483-2485, 1996.
- (9) T. Ishibashi, N. Shimizu, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, and T. Furuta, "Uni-traveling-carrier photodiodes," *Tech. Dig. Ultrafast Electronics and Optoelectronics (1997 OSA Spring Topical Meeting)*, pp. 166-168, Incline Village, Nevada, USA 1997.
- (10) K.A. McIntosh, E.R. Brown, K.B. Nichols, O.B. McMahon, W.F. DiNatale, and T.M. Lyszczarz, "Terahertz measurements of low-temperature-grown GaAs photomixers coupled to resonant-planar

- antennas," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, no. 24, pp. 3632-3634, 1996.
- (11) A. Hirata, T. Kosugi, H. Takahashi, R. Yamaguchi, F. Nakajima, T. Furuta, H. Ito, H. Sugahara, Y. Sato, and T. Nagatsuma "120-GHz-band millimeter-wave photonic wireless link for 10-Gb/s data transmission," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 5, pp. 1937-1944, 2006.
- (12) B.S. Williams, H. Callebaut, S. Kumar, Q. Hu, and J.L. Reno, "3.4-THz quantum cascade laser based on longitudinal-optical-phonon scattering for depopulation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 2, pp. 1015-1017, Feb. 2003.
- (13) G. Scalari, C. Walther, M. Fischer, R. Terazzi, H. Beere, D. Ritchie, and J. Faist, "THz and sub-THz quantum cascade lasers," *Laser & Photon. Rev.*, vol. 3, no. 1-2, pp. 45-66, Feb. 2009.
- (14) A.W.M. Lee and Q. Hu, "Real-time, continuous-wave terahertz imaging using a microbolometer focal-plane array," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 19, pp. 2563-2565, Oct. 2005.
- (15) N. Oda, H. Yoneyama, T. Sasaki, M. Sano, S. Kurashina, I. Hosako, N. Sekine, T. Sudou, and T. Irie, "Detection of terahertz radiation from quantum cascade laser using vanadium oxide microbolometer focal plane arrays," *Proc. SPIE 6940*, pp. 69402Y-69402Y12, 2008.
- (16) K.-L. Yeh, M.C. Hoffmann, J. Hebling, and K.A. Nelson, "Generation of 10 μ J ultrashort terahertz pulses by optical rectification," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, 171121, 2007.
- (17) H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka1, "Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO₃," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, 091106, March 2011.
- (18) W.R. Deal, K. Leong, V. Radisic, S. Sarkozy, B. Gorospe, J. Lee, P.H. Liu, W. Yoshida, J. Zhou, M. Lange, R. Lai, and X.B. Mei, "Low noise amplification at 0.67 THz using 30 nm InP HEMTs," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 21, no. 7, pp. 368-370, June 2011.
- (19) W.R. Deal, K. Leong, A. Zamora, V. Radisic, and X.B. Mei, "Recent progress in scaling InP HEMT TMIC technology to 850 GHz," *Tech. Dig. IEEE Intern. Microwave Symposium (IMS2014)*, no. WE2G-1, 2014.
- (20) <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/12/15-12-0323-00-0thz-mmichip-sets-for-wireless-communication-up-to-480-ghz.pdf>
- (21) R. Han and E. Afshari, "A CMOS high-power broadband 260-GHz radiator array for spectroscopy," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 12, pp. 3090-3104, Dec. 2013.
- (22) K. Sengupta and A. Hajimiri, "A 0.28 THz power-generation and beam-steering array in CMOS based on distributed active radiators," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 47, no. 12, pp. 3013-3031, Dec. 2012.
- (23) M. Dyakonov, "Generation and detection of Terahertz radiation by field effect transistors," *C.R. Phys.*, vol. 11, pp. 413-420, 2010.
- (24) T. Otsuji, T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, A. Satou, W. Knap, V. Popov, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Emission and detection of terahertz radiation using two-dimensional electrons in III-V semiconductors and graphene," *IEEE Trans. Terahertz Science and Tech.*, vol. 3, no. 1, pp. 63-71, Jan. 2013.
- (25) H. Kanaya, H. Shibayama, R. Sogabe, S. Suzuki, and M. Asada, "Fundamental oscillation up to 1.31 THz in resonant tunneling diodes with thin well and barriers," *Appl. Phys. Express*, vol. 5, 124101, 2012.
- (26) T. Shiode, T. Mukai, M. Kawamura, and T. Nagatsuma, "Giga-bit wireless communication at 300 GHz using resonant tunneling diode detector," *Proc. Asia-Pacific Microwave Conference 2011*, no. WE6A-01, pp. 1122-1125, Melbourne, Australia, Dec. 2011.

(平成 26 年 7 月 22 日受付 平成 26 年 8 月 5 日最終受付)



ながつま なたか (正員:フェロー)

昭 56 九大・工・電子卒。昭 61 同大学院博士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。平 19 阪大大学院基礎工学研究科教授。マイクロ波フォトニクス、テラヘルツ波フォトニクスの研究に従事。工博。平 19 年度本会業績賞、平 23 年度文部科学大臣賞各受賞。