

令和元年6月16日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04350

研究課題名(和文)600GHz帯無線通信のための送受信基盤技術の研究

研究課題名(英文)600-GHz-band Transceiver Technologies

研究代表者

永妻 忠夫(NAGATSUMA, Tadao)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：00452417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年、無線通信技術の高速化に対するニーズが高まる中、200GHz～300GHz帯を利用した「テラヘルツ無線」の研究開発が国内外で本格化している。100GHzを超える周波数帯では、大気吸収による電磁波の減衰が顕著となるが、吸収が小さくなる大気の窓が625 GHz～725 GHzに存在する。本研究では、この100GHzもの超広帯域幅を利用できる可能性のある600GHz帯を、次なるテラヘルツ無線の学際的研究領域として位置づけ、光技術に基づく広帯域送信技術とホモダイン・ヘテロダイン検出技術を用いた高感度受信技術を開発することにより、従来を大幅に上回る12.5Gbit/sを超える伝送速度を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

21世紀に残された最後の電磁波領域であるテラヘルツ波の通信応用の研究が活発化し、我が国においては、300GHz帯までは総務省プロジェクトの下、産業界による研究開発が始まっている。したがって、次なる学術研究のターゲットとして、600GHz帯電波を無線通信に応用するための手法と応用上の課題を追究することの意義は大きい。本研究は、マイクロ波技術、光技術、MEMS技術等を融合した独創的なアプローチにより、600GHz帯電波の制御技術を確立し、将来100Gbit/sを超えるリアルタイム無線リンクの実現に世界に先駆けて挑戦したものである。

研究成果の概要(英文)：Terahertz (THz) communications research has recently become very active over the world to meet an urgent demand in high-speed wireless links. Carrier frequencies from 200 GHz to 400 GHz have been hot spots for researchers, mainly because of the availability of high-performance enabling devices for transmitters and receivers. One of the critical problems in the use of carrier frequencies of over 100 GHz is an atmospheric attenuation. There are three windows, where the attenuation becomes low and relatively flat over 100-GHz bandwidth; (I) 200 GHz-300 GHz, (II) 625 GHz-725 GHz, (III) 800 GHz-900 GHz. This study aimed at an exploration of the band (II) as the next center stage of THz communications research, developing wideband transmitters based on photonics and highly-sensitive receivers using homodyne and heterodyne detection, and successfully achieved a record data rate of over 12.5 Gbit/s up to 720 GHz.

研究分野：工学

キーワード：テラヘルツ波 無線通信

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

報告者等は、2008~2010年(H20~22)年度に科研費において「300GHz帯を利用した20Gbit/s級高速無線技術に関する研究」を行い、国際的に周波数利用割り当てがなされていない275GHz以上の周波数帯の無線通信応用を世界に先駆けて提案した。その後、100GHz~400GHz帯を利用した無線通信技術は、所謂「テラヘルツ無線」として研究開発が世界的にブレイクし、100Gbit/sを超える伝送速度を目指した研究開発が活発化していた。

テラヘルツ無線のメリットのひとつは、50~100GHzもの広い帯域を活用し、比較的簡単な変調方式(OOKやQPSK)で高速無線を実現できることである。一方、図1に示すように、大気中にはO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>O分子の吸収線が存在するため、100GHzの帯域を確保できる周波数帯の「窓」は、(I)200GHz~300GHz、(II)625GHz~725GHz、(III)800GHz~900GHzの3領域に限られているが、(II)や(III)の周波数帯を使った研究はほとんどなされておらず、また600GHz帯において2~3Gbit/s程度の伝送速度(エラーフリー伝送時)が限界であった。

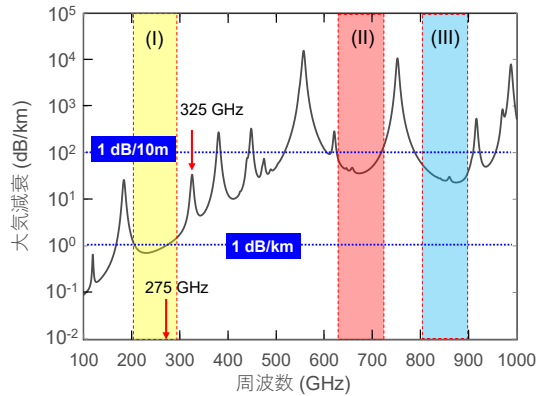


図1 大気減衰の周波数依存性.

2. 研究の目的

本研究では、100GHzもの超広帯域幅を利用できる可能性のある、(II)625GHz~725GHzの周波数帯を、次なるテラヘルツ無線の学際的研究領域として位置づけ、600GHz帯電波の発生・変復調技術を開発し、高速化ならびに長尺化に向けた限界を追求し、その技術課題を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究においては、報告者等がこれまでに培ってきた独自技術である「光技術を用いたテラヘルツ波の発生技術」を発展させ、①600GHz帯電波を広帯域、高出力、高安定、低雑音で発生する技術の確立、②電気技術に基づく高感度検波技術の開発を行う。次に、これらの送受信技術を用い、③600GHz帯の大気減衰特性の実測と通信に及ぼす影響の検討を行った後、④伝送実験(通信距離として最大10m)を実施する。最後に、マルチチャネル化による高速化に向けて、⑤周波数合分波技術(マルチプレクサ、デマルチプレクサ)に関する検討を行う。

4. 研究成果

(1) 600GHz帯電波の発生技術

図2は、本研究で検討を行った送受信系の簡略化したブロック図である。送信系におけるひとつめのコアブロックは、コヒーレント2波長光信号発生器である。破線で囲んだ構成の「光周波数コム」技術に基づき、サイドモード抑圧比(キャリア電力と側帯波スプリアス電力の比)として、560GHz~720GHzにおいて>45dB(従来技術では30dB程度)を得た。光周波数コム生成において、光変調器の帯域、半波長電圧、基本周波数f<sub>0</sub>の変調器駆動電力、ならびに光増幅器(未記載)のNFを最適化することが鍵であった。

もうひとつの重要なコンポーネントは、上記の差周波数を有する2波長の光信号を差周波数に対応したテラヘルツ波に変換するフォトダイオードである。従来の市販のフォトダイオードでは、十分な出力と帯域が得られないことから、600GHz帯の導波管出力型のフォトダイオードモジュールを新たに開発した。その結果、400GHz~900GHzで動作し、3dB帯域として世界最高となる340GHz、最高出力-19dBm(500GHz)のモジュールの開発に成功した(図3)。

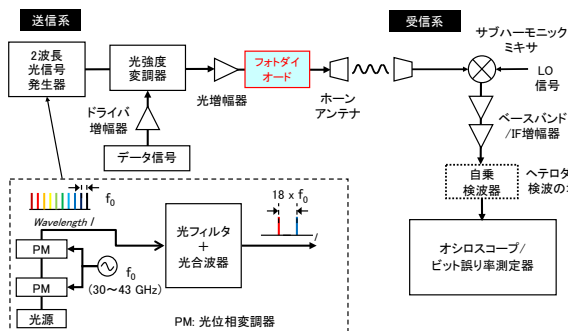


図2 送受信系のブロック図.

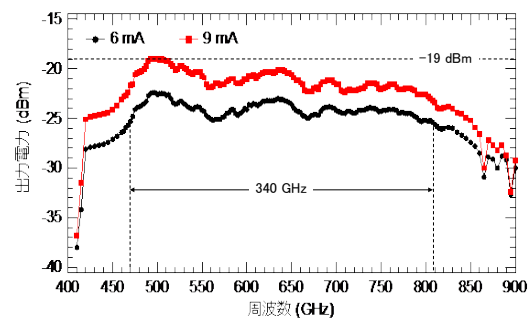


図3 フォトダイオードの周波数特性.

## (2) 600GHz 帯電波の検出技術

受信系は、LO 信号で励起するサブハーモニックミキサ(SHM)を用いることにより、600GHz 帯での直接検波(自乗検波)に比べて 20dB 以上の高感度化を図った。LO 周波数の 2 倍とキャリア周波数を等しくするホモダイン検波(ダイレクトコンバージョン)方式と、LO 周波数の 2 倍とキャリア周波数の間に数 GHz~20GHz 程度の周波数差(IF 周波数)を与えるヘテロダイン検波方式の双方について検討を行った。後者のヘテロダイン検波方式では、IF 周波数帯において復調を行う。OOK 変調の場合には、図 4 に示すように、IF 周波数において自乗検波器を用いることから、2 波長光信号はフリーランで良くシステムの簡素化が可能となる。この方式では、上記の IF 周波数で動作するダイオード自乗検波器がキーコンポーネントであることから、図 5 に示すようなモジュールを試作し、3dB 帯域:8GHz、6dB 帯域:15GHz を実現した。

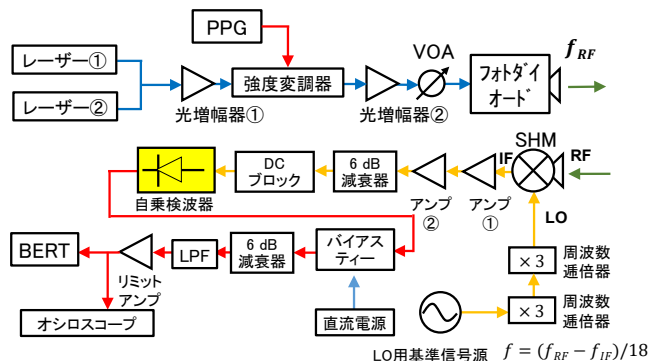


図 4 ヘテロダイン検波方式による送受信系。

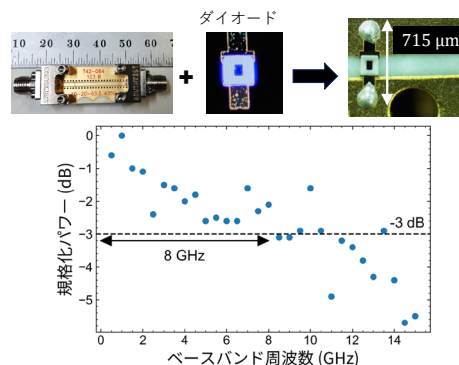


図 5 IF 帯の自乗検波器の特性。

## (3) 600GHz 帯大気減衰の評価

図 1 で示した大気減衰の周波数依存性のグラフは、一般的に利用されている理論モデルを使って計算したものであるが、高度や湿度等にも依存することから、実際に測定してみることが重要である。そこで、(1)(2)で述べた送受信系を使って、大気減衰量を測定した結果を図 6 に示す。損失のピーク値とバレー値の差は 3 桁以上あることから、伝搬距離を 0.5m と 5m で測定し、両者を重ね合わせる手法を考えた。損失の最大となる周波数と、さらに 620GHz 付近の小さなピークの検出も出来ていることが分かる。この結果より、OOK 変調の場合、中心周波数 660GHz~675GHz において 100Gbit/s の伝送速度の実現が期待できる。

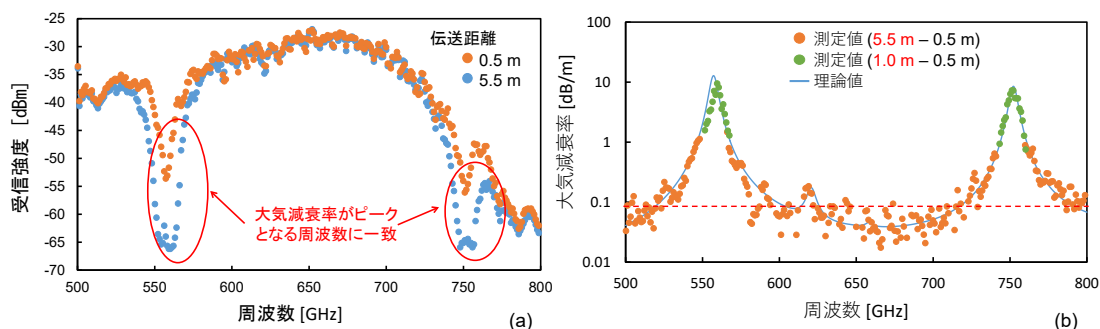


図 6 大気減衰の周波数依存性の測定結果。(a)測定データ。(b)減衰率に換算した結果。

## (4) 600GHz 帯無線伝送実験

ホモダインならびにヘテロダイン検波方式による無線伝送実験を行った。まず、図 7 はホモダイン検波方式を用い、電波の窓の上限に近いキャリア周波数 720GHz で行った無線通信実験において、ビット誤り率(BER)特性を測定したものである。同図の横軸は、送信器のフォトダイオード電流であり、3mA は約 1μW の出力に対応する。通信距離は、5~10cm 程度である。720GHz において、12.5Gbit/s でのエラーフリー伝送に成功した。これはキャリア周波数、伝送速度共に世界初の結果である。12.5Gbit/s は受信系のプリアンプ、リミットアンプの上限に近い。アイの開口は極めてクリアであることから、今後、ベースバンドアンプの広帯域化により超 20Gbit/s の高速化が期待できる。

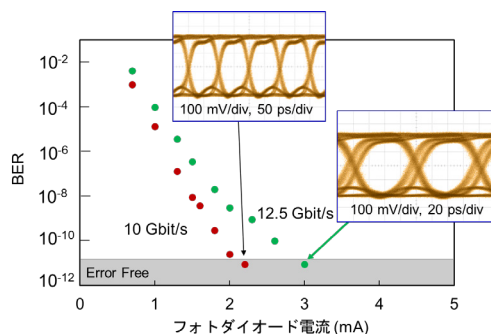


図 7 720GHz 通信実験における BER 特性。

次に、図 4、図 5 で示したヘテロダイン受信器を用いて行った、近接無線(5cm 距離)、ならびにホーンアンテナと放物面鏡との組み合わせによる高利得アンテナ (52.4dBi) を用いた、10m 伝送の結果を図 8 に示す。近接無線では、600GHz 帯でのヘテロダインシステムとして世界最高の 3.3Gbit/s エラーフリー伝送に成功した。また 10m 伝送実験では、FEC リミットで 5Gbit/s までの伝送に成功した。1Gbit/s でもエラーフリー伝送にならない理由は、大気伝搬損失による受信電力不足の影響が大であると考えられる。

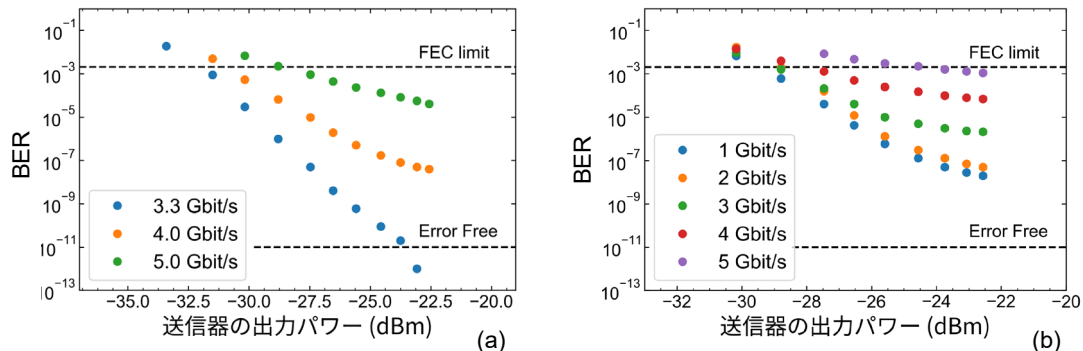


図 8 600GHz 帯ヘテロダイン通信システムの伝送特性. (a) 距離 5cm. (b) 距離 10m.

### (5) 600GHz 帯周波数合分波技術

600GHz 帯における 100GHz に及ぶ超広帯域性の活用の仕方として、フルバンドを単純な変調方式で活用するアプローチに加え、10~20GHz 程度のバンドに分けて複数チャネルを扱うアプローチ (いわゆる Frequency Division Multiplex: FDM) が考えられる。報告者等は、600GHz 帯の導波管回路モジュールを開発する中で、600GHz 帯になると、低損失と言われていた中空導波管が、実用上深刻なほど大きな損失を有することを確認した。

そこで中空導波管に代わる伝送路として、報告者等が開発した、シリコン基板上の「フォトニック結晶伝送路」を採用し、合分波回路の検討を行った。図 9 は、フォトニック結晶技術を用いた、3 チャネル分波器 (3dB 透過帯域: 640~653 GHz, 660~672 GHz, 677 GHz~698 GHz) の設計レイアウトと実際に試作したチップである。各帯域で非圧縮 4K 映像の伝送が可能な帯域幅を確保した。また 3 dB 分散帯域を 12GHz 以上とするために、曲げ構造のない入出力構造を採用した。現在、その評価を行なっている。

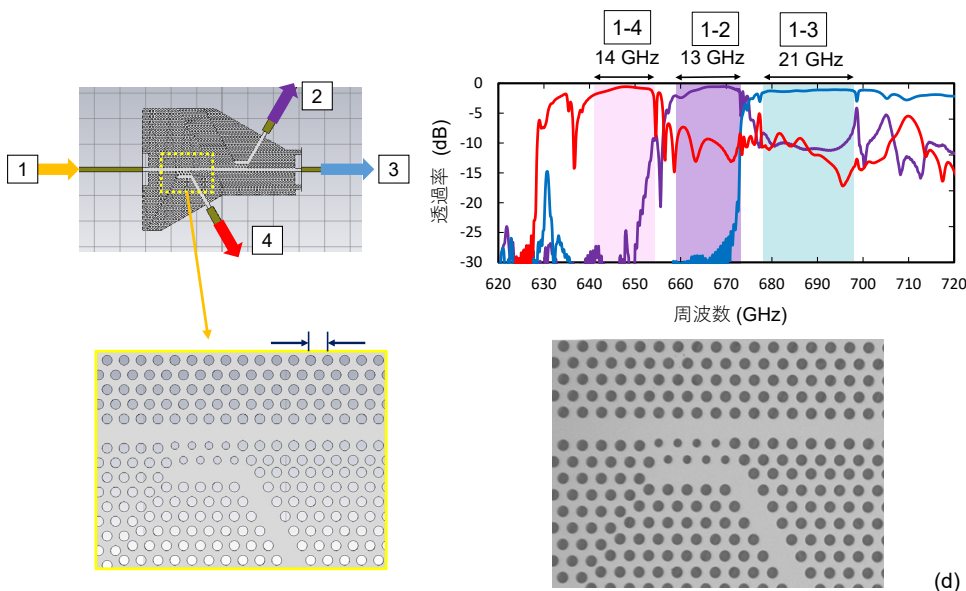


図 9 フォトニック結晶導波路を用いた 600GHz 帯合分波器の設計と試作. (a) 概念図. (b) 設計結果. (c) 1-4 分岐のレイアウト. (d) 実際に試作した 1-4 分岐回路のチップ写真.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① K. Sengupta, T. Nagatsuma, and D.M. Mittleman, Terahertz Integrated Electronic and Hybrid Electronic-photonic Systems, Nature Electronics, 査読有, Vol. 1, No. 12,

- 2018, pp. 622-635, DOI: 10.1038/s41928-018-0173-2
- ② T. Kurokawa, T. Ishibashi, M. Shimizu, K. Kato, T. Nagatsuma, Over 300 GHz Bandwidth UTC-PD Module with 600 GHz Band Rectangular-waveguide Output, Electronics Letters, 査読有, Vol. 54, No. 11, 2018, pp. 705-706, DOI: 10.1049/el.2018.0932
  - ③ G. Carpintero, S. Hisatake, D. de Felipe, R. Guzman, T. Nagatsuma, and N. Keil, Wireless Data Transmission at Terahertz Carrier Waves Generated from a Hybrid InP-Polymer Dual Tunable DBR Laser Photonic Integrated Circuit, Scientific Reports, 査読有, Vol. 8, 2018, p. 3018, DOI: 10.1038/s41598-018-21391-0
  - ④ 永妻忠夫, フォトニクスが開くテラヘルツ技術, 電子情報通信学会会誌, 査読有, Vol. 101, No. 2, 2018, pp.159-165, [https://www.journal.ieice.org/summary.php?id=k101\\_2\\_159&year=2018&lang=J](https://www.journal.ieice.org/summary.php?id=k101_2_159&year=2018&lang=J)
  - ⑤ 永妻忠夫, 枚田明彦, 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, Vol.100, No.9, 2018, pp. 705-713, DOI: 10.14923/transcomj.2016SHI0012
  - ⑥ T. Nagatsuma, G. Ducournau, C.C. Renaud, Advances in Terahertz Communications Accelerated by Photonics, Nature Photonics, 査読有, Vol.10, No. 6, 2016, pp. 371-379, DOI: 10.1038/nphoton.2016.65

[学会発表] (計 60 件)

- ① T. Nagatsuma, Terahertz Applications Enabled by Photonics, Asia Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2019) (Invited), Mo-DO2-1, 2019年3月11日, Delhi (India)
- ② T. Nagatsuma, Recent Japanese Developments on THz Communications, Second Towards TeraHertz Communications Workshop(Invited), 2019年3月7日, Brussels (Belgium)
- ③ 永妻忠夫, 集積回路技術がもたらすテラヘルツ応用の新潮流, IEEE MTT-S Kansai Chapter 「テラヘルツ技術の最新動向と応用、今後展望」ワークショップ (招待講演), 2018年12月15日, 京都
- ④ 永妻忠夫, フォトニクス技術がもたらすミリ波・テラヘルツ波の応用と展開, 電子情報通信学会マイクロ波研究会 (招待講演), 2018年12月14日, 神奈川
- ⑤ T. Nagatsuma, Photodetectors for Terahertz Applications, APMC 2018 Workshop: Recent Progress of Terahertz Sources for Advanced Applications(Invited), 2018年11月6日, Kyoto
- ⑥ T. Nagatsuma, Advances in Terahertz Electronics and Photonics for Wireless Communications, Optical Internet Workshop 2018(Invited), 2018年10月25日, Jeju (Korea)
- ⑦ T. Nagatsuma, Polymeric Devices for Terahertz Communications, International Symposium on Hybrid PICs, Session 4: Applications (Invited), 2018年9月26日, Rome (Italy)
- ⑧ T. Nagatsuma, M. Sonoda, and Y. Kujime, Exploring 600-GHz Band for Communications and Sensing, Tech Dig. RJUSE TeraTech-2018(Invited), 2018年9月19日, Warsaw (Poland)
- ⑨ 東本大樹, 黒川 翼, 園田理人, 永妻忠夫, 600 GHz 帯 2:1 電力合成器の設計と評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-14-7, 2018年9月12日, 金沢
- ⑩ 園田理人, 東本大樹, 木村 亮, 永妻忠夫, ヘテロダイン検波による 600 GHz 帯 2.5 Gbit/s 無線リンク, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-14-6, 2018年9月12日, 金沢
- ⑪ T. Nagatsuma, Terahertz Applications Inspired by Photonics, 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018) (Keynote), Mo-P1-4-3, 2018年9月10日, Nagoya
- ⑫ T. Nagatsuma, Terahertz Communications, 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018) (Invited), Student workshop, 2018年9月9日, Nagoya.
- ⑬ T. Nagatsuma, A 600-GHz-band Photodiode with Rectangular Waveguide Output and Its Application to Communication, Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018) (Invited), 4P12a-6, 2018年8月4日, Toyama
- ⑭ T. Nagatsuma, T. Kurokawa, M. Sonoda, T. Ishibashi, M. Shimizu, and K. Kato, 600-GHz-band Waveguide-output Uni-traveling-carrier Photodiodes and Their Applications to Wireless Communication, Tech. Dig. 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2018), Th1E-1, 2018年6月14日, Philadelphia (USA)
- ⑮ T. Nagatsuma, Advances in Terahertz Communications Enabled by Photonics and Electronics, Terahertz Electronics Workshop(Invited), 2018年4月23日, Glasgow (UK)
- ⑯ 園田理人, 黒川 翼, 永妻忠夫, 600 GHz 帯を用いた 10 Gbit/s 無線リンク, 電子情報通信学会総合大会, C-14-4, 2018年3月21日, 東京
- ⑰ T. Nagatsuma, Who is the Winner in Terahertz Wireless Communications: Photonics vs. Electronics, Terahertz Communications Meeting(Invited), 2018年1月9日, London (UK)
- ⑱ 永妻忠夫, フォトニクス技術がもたらすミリ波・テラヘルツ波の応用と展開, 電子情報通信

- 学会研究会(特別講演), 2017年10月19日, 仙北市
- ⑲ T. Nagatsuma, Millimeter-wave and Terahertz Applications Accelerated by Photonics, International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT 2017) (Invited), Plenary Session 5, 2017年9月14日, Pusan(Korea)
  - ⑳ T. Nagatsuma, Materials and Device Challenges for the Future of Terahertz Communications, The 9th International Conference on Advanced Materials (ROCAM 2017) (Plenary Talk), 2017年7月12日, Bucharest(Romania)
  - ㉑ T. Nagatsuma, Photonics-enabled Terahertz Technologies and Their Applications, IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2017) (Invited), Workshop, WSA-6, 2017年6月4日, Honolulu (USA)
  - ㉒ T. Nagatsuma, Who is the Winner in THz Communications: Photonics vs. Electronics, Terahertz Science and Technology: The Mansion Meeting (Invited), 2017年5月23日, New Port(USA)
  - ㉓ T. Nagatsuma, Advances in THz Wireless Communications, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2017) (Invited), paper SM3J.1, 2017年5月15日, San Jose(USA)
  - ㉔ T. Nagatsuma, THz Communications: Photonics vs. Electronics, German THz Conference (Invited), 2017年3月30日, Bochum (Germany)
  - ㉕ T. Nagatsuma, THz Communication Systems, Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC 2017) (Invited), 2017年3月21日, Los Angeles(USA)
  - ㉖ T. Nagatsuma, Millimeter-wave and Terahertz Technologies Enabled by Photonics, Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2016) (Plenary talk), 2016年08月22日, Seoul(Korea)
  - ㉗ T. Nagatsuma, Present and Future of Terahertz Communications, International Workshop on Terahertz Science, Nanotechnologies and Applications(Invited), 2016年07月16日, Erice (Italy)
  - ㉘ T. Nagatsuma, Bringing Terahertz Communications into The Real World, Journées Nano, Micro et Optoélectronique (JNM02016) (Invited), 2016年5月31日, Les Issambres (France)
  - ㉙ T. Nagatsuma, Telecom-based Photonics Technologies for Terahertz Applications: From Discrete Devices to Integration, IEEE International Microwave Symposium (Invited), Workshop WFH, 2016年05月27日, San Francisco(USA)

[その他]

ホームページ: <http://ipg-osaka.com/>

## 6. 研究組織

### (2) 研究協力者

富士田 誠之 (FUJITA Masayuki)

久武信 太郎 (HISATAKE Shintaro)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。