

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信

Vol.14、 No.2

巻頭言

テラヘルツテクノロジーフォーラム 会長 谷正彦

今年 2016 年 9 月 25 日～30 日にかけてデンマークのコペンハーゲンにある国際会議場 BELLA Center (図 1 写真)で 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016) が開催されました。口頭発表は 325 件 (Plenary を除く)、ポスター発表は 325 件、参加者数はこれまでで最大の約 750 人 (38 カ国) だったということです。これはコペンハーゲンという魅力的な都市で開催されたということもあると思いますが、少なくともこの分野の研究が、依然として活発に行われていること示すものと考えてよさそうです。また赤外・ミリ波・テラヘルツ波の領域で大きな貢献があった研究者に、この会議の創設者である Kenneth J. Button 博士にちなんで Button 賞 (The Kenneth J Button Prize) [1] の授与式が毎年この会議期間中に行われますが、今年は日本から福井大学・遠赤外領域開発研究センター・名誉教授の出原敏孝先生が受賞されたことは嬉しいニュースの一つでした (図 2 写真)。また会期中に 2019 年はフランス、パリでの開催となることが発表されました。なお来年 2017 年はメキシコのカンクン、2018 年は日本での開催が決まっています。IRMMW-THz 2018 は出原先生と私が議長 (Co-Chairs) を務めますので、この紙面を借りて準備状況をお伝えしたいと思います。先のテラテク通信 Vol.14 No.1 で、会場は富山国際会議場とし、9 月下旬での開催を予定しているとお伝え致しました。このとき参加者数は最大で 600 名を想定していましたが、コペンハーゲンでは 750 人も参加者があったため、急きょ会場の再検討をする必要がありました。開催地組織委員会 (Local Organizing Committee, LOC) を中心として種々検討を重ねるとともに、Advisory Committee を含む多くの方々のご意見もお聞きし、また、シミュレーションや予算的な検討も詳しく行いました。11 月 6 日に大阪大学豊中キャンパスで会場に関する検討を行う LOC を開催し、審議を尽くした結果、LOC としては IRMMW-THz 2018 の会場を富山国際会議場から名古屋国際会議場に変更することを決定しました。LOC としても、せっかく会場として選定した富山国際会議場をあきらめるのは非常に難しい判断でしたが、コペンハーゲンでの参加者数、中国でのテラヘルツ研究者の増加傾向、日本国内で見込まれる参加者数 (ほとんどの IRMMW-THz において開催地以外で、日本は最大の国別参加者数を誇っています) を考慮すると、参加者に不自由や不便な思いをさせないようにするためには、最大 700 人規模の参加者数を想定せざるを得ず、よりキャパシティの大きな会場に変更せざるを得ないというのが LOC としての判断でした。IRMMW-THz 2018 は、名古屋国際会議場で開催期間は 9 月中旬となる予定です。以上のような状況を報告するとともに、引き続き会員の皆様のご協力、ご支援をお願いする次第です。

[1] <http://terahertz.dk/irmmwthz2016/button-prize/>



図 1. IRMMW-THz 2016 の会場となった Bella Center。



図 2. 出原敏孝先生 (左) の Button 賞授与式の様子。

テラヘルツ光渦の発生

宮本 克彦^{1,2}、尾松 孝茂^{1,2}

¹千葉大学大学院融合、²千葉大学分子キラリティー研究センター

k-miyamoto@faculty.chiba-u.jp

1. はじめに

位相が一意に決まらない位相特異点に由来する螺旋状波面を持つ光渦は、エルミート・ガウスビームにはない、ドーナツ型強度分布・軌道角運動量というユニークな特徴を示す[1](図 1)。円筒座標系における近軸固有解であるラゲール・ガウスビームは代表的な光渦として知られ、1 波長伝搬するごとに位相が 2π の整数(光渦の次数であるトポロジカルチャージ ℓ ($\ell=1, 2, 3, \dots$)) 倍だけ回転する周期的境界条件を満たすため、軌道角運動量の大きさは ℓ に比例し、 ℓ の符号は螺旋波面の回転方向を表わす。応用例として、光渦モードの空間多重通信[2]、2014 年にノーベル化学賞を受賞した STED 顕微鏡(Stimulated Emission Depletion Microscope)[3]などが挙げられる。さらに、われわれはレーザー加工に光渦を用いることで波面の螺旋性が金属・半導体・有機材料に転写されることを世界で初めて実証した[4-6]。現在では、様々な物質の吸収波長に対応できるように、紫外域から中赤外における光渦の発生に成功している(図 2)。

特に、分子群の大振幅振動に相当するテラヘルツ帯で光渦の発生を実現できれば、生体分子のカイラル構造体・高分子結晶の構造的カイラリティー制御・超解像テラヘルツ顕微分光などの様々な応用が期待できる。しかし、これまでテラヘルツ帯で使用できる実用的な位相板は存在しなかった。われわれは、テラヘルツ帯で屈折率分散の少ない Tsurupica 樹脂を用いて光渦を発生できる螺旋型位相板を開発し、高効率なテラヘルツ光渦の発生に成功した[7]。

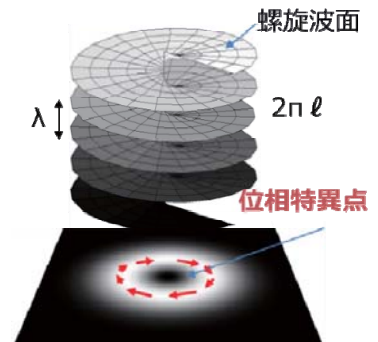


図 1 光渦の概念図

2. テラヘルツ用螺旋位相板

光渦を発生させる方法は、例えば、空間位相変調器などホログラムを活用する方法、マルチモード光ファイバーを使用する方法がある。しかしテラヘルツ帯で実現できる素子は存在せず、これらの方

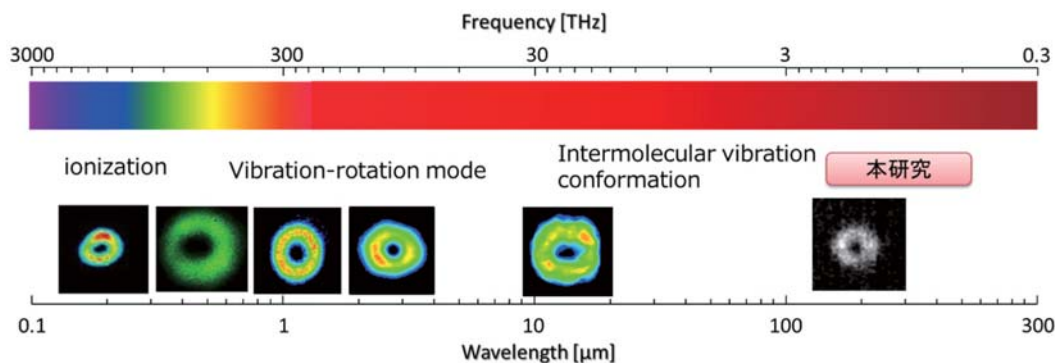


図 2 本研究室における光渦発生周波数帯域

法は適さない。最も簡便で有効な方法は、テラヘルツ帯における螺旋位相板を用いた波面変換である。螺旋位相板は、光軸の周回方向に沿って 2π の整数倍だけ位相シフトを波面に与える素子である。われわれは、Tsurupica 樹脂に着目しテラヘルツ用螺旋型位相板を開発した。この材料は、テラヘルツ帯および可視域において高い透明性(図 3(a))を示す。さらに、最も大きな特徴は屈折率の周波数分散が非常に小さい(屈折率 $n=1.52 @ 0.1-6$ THz)ことである。開発したテラヘルツ用連続螺旋型位相板の写真を図 3(b)に示す。周波数 2 THz において光渦の次数 $\ell=1$ となるよう設計し、方位角方向で厚みが同じになるよう機械研磨により作成した。段差厚み約 290 μm 、設計値との誤差は約 $\pm 1\%$ 以下である。

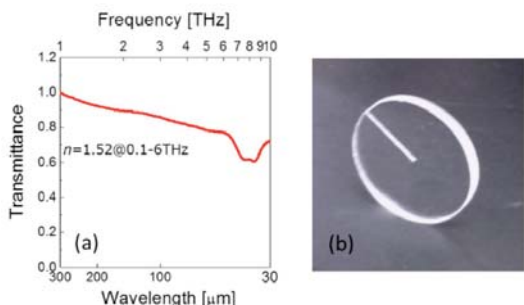


図 3 (a) Tsurupica 樹脂の透過率
(b)テラヘルツ位相板

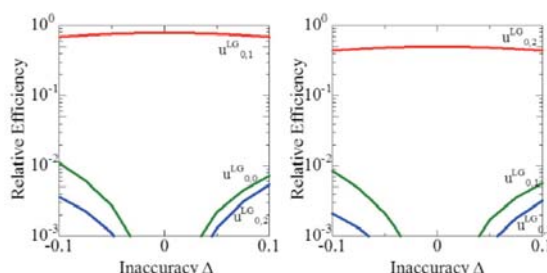


図 4 位相板を用いた際のテラヘルツ光渦のモード解析シミュレーション

螺旋位相板を用いる場合、位相のみを変調していることから、固有モードである 1 次のラゲールガウスモードへの変換効率は最高でも 78%程度であり、動径方向に高次のラゲールモードが発生する。位相板を用いてテラヘルツガウス光からテラヘルツ光渦を発生させた際の、モード解析シミュレーションを図 4 に示す。ある周波数に対して設計した位相板における相対誤差 Δ と、ガウスビームから変換されるラゲールガウスモードの変換効率を示している。相対誤差 Δ が ± 0.1 以下の場合、 $\ell=1$ におけるテラヘルツ光渦の変換効率は 70%以上である。また、高次の不要なモードへの変換効率は 1%以下とほぼ無視することができ、高効率なテラヘルツ光渦の発生が実現できることがわかる。さらに、Tsurupica 樹脂はテラヘルツ帯で屈折率分散が少ないため、2 THz 用の螺旋位相板を 4 THz、6 THz でも使用可能である。この場合、螺旋位相板によって変換されたラゲールガウスモードの純度は低下する。これは $\ell > 1$ のラゲールガウスモードの中央部に現れる暗点部分が大きくなるためである。4 THz では 2 次($\ell=2$)のラゲールガウスモードへの変換効率は $\sim 50\%$ 、6 THz では 3 次($\ell=3$)のラゲールガウスモードへの変換効率は 30%以下になる。

3. テラヘルツ光渦の発生

螺旋位相板の性能を定量評価するため、周波数線幅の狭い(周波数同調可能な)テラヘルツ光源を開発した。1 μm 帯ピコ秒励起レーザー、光パラメトリック増幅器(Optical parametric amplifier, OPA)による 1.5 μm 帯 2 波長光、4-ジメチルアミノ-N-メチル-4-スチルバジリウムトシレート結晶(DAST)によるテラヘルツ差周波発生部と、3 つの構成からなる。周期分極反転ストイキオメトリックリチウム酸タンタル結晶(fan-type PPSLT)と外部共振器型半導体レーザーによる 1.5 μm 帯 2 波長光を、DAST 結晶に入射し差周波としてテラヘルツ光を発生させている。テラヘルツ光の周波数は fan-out 型 PPSLT 結晶(結晶温度は一定)の位置ずらしに伴う分極周期変調によって 1-15 THz の範囲で可変であり、その線幅は ~ 120 GHz @ 2.6 THz であった。発生周波数 3 \sim 7、9 \sim 11.5 THz において mW レベルの平均出力を有し、最高出力は ~ 3 mW(4.3 THz)を達成した。テラヘルツ光の空間モードはガウスモードである。

十分コリメートされたテラヘルツ光の光路に開発した螺旋位相板を配置して光渦を発生させ、発生したテラヘルツ光渦の空間強度分布をテラヘルツカメラで計測した。図5は、それぞれのテラヘルツ周波数に対応して、テラヘルツガウス光およびテラヘルツ光渦のビームプロファイルを示している。本実験では位相板を固定のままテラヘルツガウス光の周波数を2 THzと4 THzに同調させることで、光渦次数 $\ell=1$ および2のテラヘルツ光渦の発生に成功した。Tsurupica樹脂の特徴から、光源の発生テラヘルツ周波数を変化させるだけで、光渦次数の異なる光渦の発生が可能であった。テラヘルツ光渦のビームプロファイルは、光渦特有のドーナツ型の強度分布を示し、波面中央部に位相が一意に決まらない特異点を有している。2 THz、 $\ell=1$ のテラヘルツ光渦の場合、約1 mmの環状ビームに対して、位相特異点の大きさはテラヘルツ波長150 μm (2 THz)より小さく約100 μm であった。

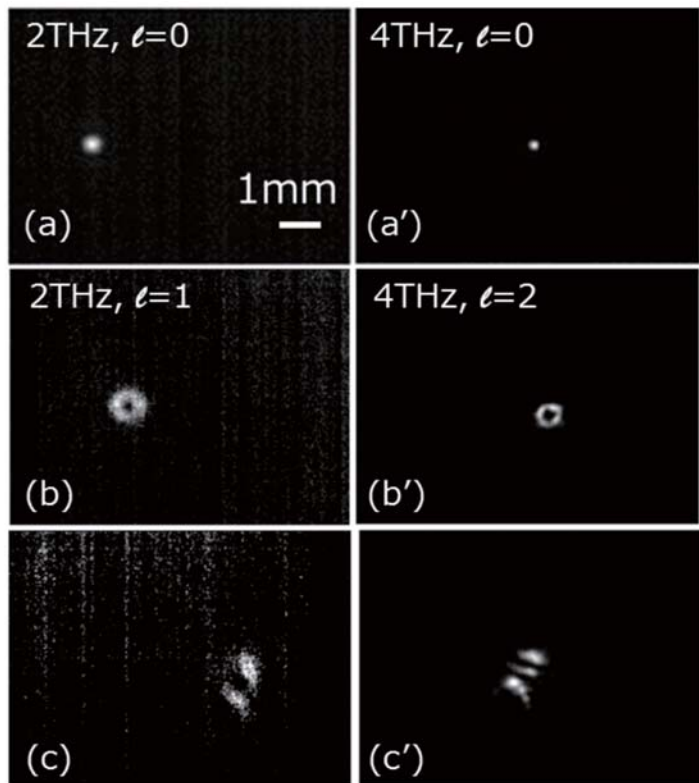


図5 2および4 THzのテラヘルツガウスビームおよびテラヘルツ光渦のビームプロファイル

テラヘルツ光渦の次数を計測するには、レンズを傾けて集光する。傾けたレンズのように円筒座標系の対称性がくずれた光学系によって、光渦はエルミートガウスモードに変換される。その結果、現れるエルミートガウス光の縦もしくは横方向(レンズの傾ける方向で決まる)の暗線の数から発生した光渦の次数を求めることができる。今回の実験の場合、 $\ell=1$ および2であることが図5(c)、(c')より確認できる。さらに、Gouy位相シフトを応用(ℓ の符号によって近視野から遠視野に向かって回転方向が反転)することで、光渦次数の符号を判別可能である。図6に示すようにテラヘルツ光渦の一部をガラスにより遮光し、この欠損部の伝搬に伴う回転方向の違いから符号が特定できた。

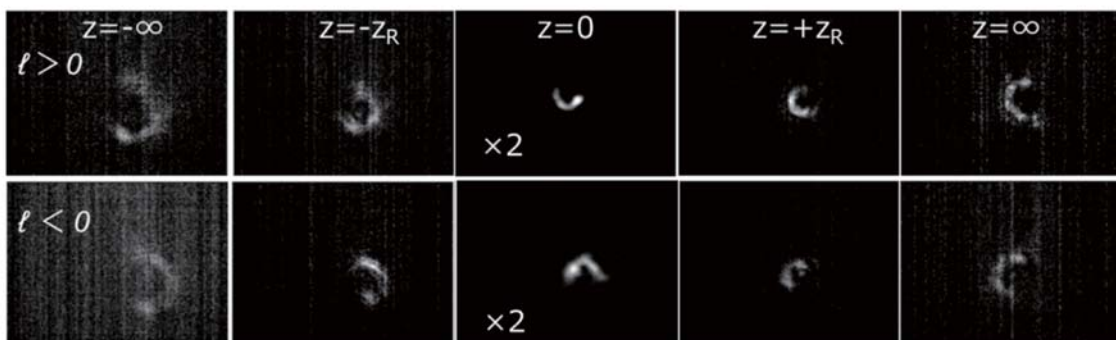


図6 テラヘルツ光渦(4 THz)の一部をガラスで遮光した際のビーム伝搬特性

4. まとめ

本研究では、高効率発生が難しかったテラヘルツ帯における光渦の発生に成功した。テラヘルツ領域において高い透明性を示す **Tsurupica** 樹脂を用いて螺旋位相板を開発し、周波数可変テラヘルツ光源に応用する事で位相板の性能を定量評価した。テラヘルツ光渦の次数および符号の両方についてテラヘルツカメラを用いた測定により決定した。テラヘルツ発生周波数の同調のみで、異なる次数の光渦発生も実現できた。さらに、開発した位相板は屈折率周波数分散が非常に小さいことから、広帯域テラヘルツ光源への応用も実現可能である。今後、高強度なテラヘルツ光渦を用いて飽和吸収をはじめとする非線形応答を示す材料に適用することで、超高解像テラヘルツ顕微鏡への応用が大きく期待される。また、今回開発したテラヘルツ螺旋型位相板は(有)パックスにより購入可能である。

【参考文献】

- 1) M. Padgett, J. Courtial, L. Allen, *Phys. Today* **57**, 35 (2004).
- 2) J. Wang, J. Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A. E. Willner, *Nat. Photon.* **6**, 488 (2012).
- 3) S. Berning, K. I. Willig, H. Steffens, P. Dibaj, S. W. Hell, *Science*, **33**, 551 (2012).
- 4) K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu, *Nano Lett.*, **12**, 3645 (2012).
- 5) F. Takahashi, K. Miyamoto, H. Hidai, K. Yamane, R. Morita, T. Omatsu, *Sci. Reports*, **6**, 21738 (2016).
- 6) M. Watabe, G. Juman, K. Miyamoto, T. Omatsu, *Sci. Repprts*, **4**, 4281 (2014).
- 7) K. Miyamoto, T. Akiba, K. Suizu, T. Omatsu, *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 261104 (2014).

研究室紹介

防衛大学校 電気情報学群 電気電子工学科 電子物理学講座
内田・立木研究室

防衛大学校は、神奈川県三浦半島東南端の小原台に位置し、眼下に東京湾を見下ろすことができる景勝の地にあります。本科（学部）における理工学専攻は理工系 11 学科からなり、我々の研究室は電気電子工学科に所属しています。研究室では、主に半導体、超伝導体を用いたミリ波・テラヘルツ波帯で動作する検出・発振素子の研究を行っています。

検出素子に関しては、アンテナ結合素子を中心に研究を進めており、これまで、薄膜のスロット（アレー）アンテナを低温動作する $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Y-123) 高温超伝導体 HEB (hot electron bolometer) や室温動作する GaAs ショットキーバリアダイオード (SBD), Bi マイクロボロメータと結合させた素子を製作し、100~200 GHz 帯でのホモダイン、ヘテロダイン検出特性について検討してきました。また、応用研究としては、福井大学遠赤外領域開発研究センターとの共同研究で、薄膜スロットアンテナを結合した GaAs SBD のハーモニックミクシングにより同センターが所有するジャイロトロン (FU CW IV) の放射周波数の同定などを行ってきました。最近では、有機金属分解 (MOD) 法による酸化バナジウム (VO_x) ボロメータ薄膜の作製ならびに同薄膜の検出素子への応用に関する研究を行っています。MOD 法により製作した VO_x 薄膜において、バルク単結晶 (VO_2) とほぼ同等な 4 ケタ以上の抵抗変化を示す相転移が 60°C 近傍で観測され、室温で 3~4 %/K の抵抗温度係数 (TCR) が得られています。また、同薄膜をボロメータ検出器として利用するため薄膜スパイラルアンテナを結合した VO_x マイクロボロメータ検出素子を製作し、100~200 GHz 帯で 100~400 V/W の検出感度を得られています。

一方、発振素子に関しては、高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) の固有ジョセフソン接合 (IJJs) を用いたテラヘルツ波発振素子に注目し、単結晶 Bi-2212 を用いて 1000 接合程度を含む矩形のメサを製作し、図 1 に示すテラヘルツ波フーリエ変換型分光計を用いて放射周波数ならびに放射電力などを評価しています。これまで、メサを電磁界の共振器とした 2D, 3D キャビティーモデルを提案し、得られた放射周波数と比較検討することによる提案モデルの適用性の検証、ならびに印加電圧による放射周波数の走査などを行っ

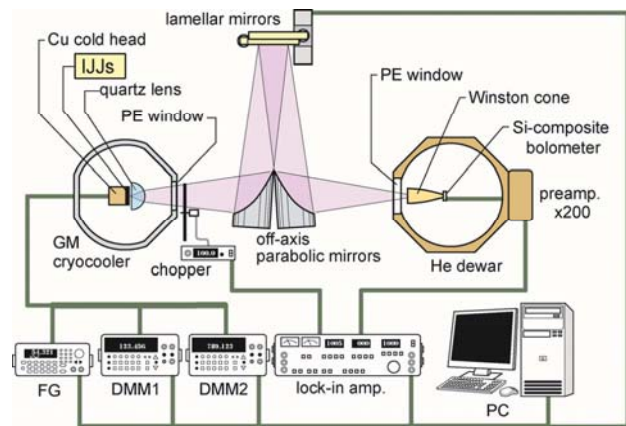


図 1 テラヘルツ波フーリエ変換型分光計

ており、素子単体では 400 GHz~1.0 THz での放射ならびに数 μW の放射電力が得られています。また、最近では、キャビティーの共振モードに依存して発振素子の放射パターンがどのように変化するかを理論的に予測し、実験で検証しています。また、安定発振のためのバイアス条件や線幅広がり抑制等を検討し、発振素子の性能向上を目指しています。

(内田貴司 : uchida@nda.ac.jp, 立木隆 : tachiki@nda.ac.jp)

国内会議・国際会議予定

国際会議およびシンポジウム等

- ☑ Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2016)
December 5-9, 2016 (New Delhi, India)
<http://www.apmc2016.org/>
- ☑ SPIE Photonics West 2017
January 28-February 2, 2017 (San Francisco, California, USA)
<http://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-west>
- ☑ The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2017) and The 2nd International Symposium on Development of High Power Terahertz Science and Technology (DHP-TST 2017)
March 7-9, 2017 (Fukui, Japan)
<http://fir.u-fukui.ac.jp/IWFIRT/IWFIRT2017/index.html>
- ☑ The 28th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT 2017)
March 13-15, 2017 (Cologne, Germany)
https://www.astro.uni-koeln.de/sites/default/files/isstt2017/isstt2017_flyer_a4_final.pdf
- ☑ The 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2017)
March 19-24, 2017 (Paris, France)
<http://www.eucap2017.org/>
- ☑ German THz Conference 2017
March 29-31, 2017 (Bochum, Germany)
<http://www.thz2017.rub.de/index.html>
- ☑ EMN Meeting on Terahertz
April 1-5, 2017 (Hawaii, USA)
<http://emnmeeting.org/Americas/terahertz/>
- ☑ Optical Terahertz Science and Technology Conference (OTST2017)
April 2-7, 2017 (London, UK)
<http://otst2017.iopconfs.org/home>
- ☑ OPTICS & PHOTONICS International Congress 2017 (OPIC 2017)
April 18-21, 2017 (Yokohama, Japan)
<http://opicon.jp/ja/>
- ☑ The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS 2017)
April 18-21, 2017 (Yokohama, Japan)
<http://alps-conference.org/2017/>
- ☑ IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave and Terahertz Applications (NEMO 2017)
May 17-19, 2017 (Seville, Spain)
<http://www.nemo-ieee.org/>
- ☑ Progress in Electromagnetics Research Symposium (The 38th PIERS)
May 22-25, 2017 (St Petersburg, Russia)
<http://piers.org/piers2017StPetersburg/>
- ☑ 10th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM 2017)
May 24-26, 2017 (Hong Kong, China)
<http://www.ee.cityu.edu.hk/~sklmw/gsmm2017/index.php>

- ☑ 2017 International Microwave Symposium (IMS 2017)
June 4-9, 2017 (Honolulu, Hawaii)
<http://ims2017.org/>
- ☑ 9th International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy (ICAVS 2017)
June 11-16, 2017 (Victoria, BC, Canada)
<http://www.icavs.org/>
- ☑ 16th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2017)
June 12-16, 2017 (Sorrento, Italy)
<http://www.isec2017.org/>
- ☑ Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2017)
May 14-19, 2017 (San Jose, California, USA)
<http://www.cleoconference.org/home/>
- ☑ CLEO/Europe-EQEC 2017
June 25-29, 2017 (Munich, Germany)
<http://www.cleoeurope.org/>

国内会議および研究会等

- ☑ 電気学会 フィジカルセンサ/マイクロマシン・センサシステム研究会
December 19, 2016 (国立研究開発法人物質・材料研究機構)
http://www.iee.jp/?post_type=custom_event&p=14635
- ☑ 電子情報通信学会 電子デバイス研究会「ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システム」
December 19-20, 2016 (東北大学 電気通信研究所)
<http://www.ieice.org/~ed/jpn/welcome.html>
- ☑ レーザー学会学術講演会
January 7-9, 2017 (徳島大学 常三島キャンパス)
<http://lsj-nenkai.sakura.ne.jp/wp/>
- ☑ 第64回応用物理学会春季学術講演会
March 14-17, 2017 (パシフィコ横浜)
<https://www.jsap.or.jp/activities/annualmeetings/index.html>
- ☑ 日本物理学会第72回年次大会
March 17-20, 2017 (大阪大学 豊中キャンパス)
<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.php>
- ☑ 2017年電子情報通信学会総合大会
March 22-25, 2017 (名城大学)
<http://www.ieice-taikai.jp/2017general/jpn/>

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 Vol.14, No.2

発行日 2016年12月13日

企画・編集 山本晃司 (福井大学)、林伸一郎 (情報通信研究機構)、
武田正典 (静岡大学)、鈴木健仁 (茨城大学)
メール: kohji@fir.u-fukui.ac.jp

発行 テラヘルツテクノロジーフォーラム事務局
(株)ポラリス・セクレタリーズ・オフィス
TEL: 070-5658-7626 FAX: 020-4622-1920
E-mail: teratechoffice@terahertzjapan.com
<http://www.terahertzjapan.com>