

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信

Vol.11 , No.1

国際シンポジウム「テラヘルツテクノロジーの最前線」(FTT 2012) 開催報告

FTT 2012 議長 萩行 正憲 (hagnyo@ile.osaka-u.ac.jp)

日本学術振興会、テラヘルツテクノロジーフォーラム、および、福井大学の共同主催による国際シンポジウム「テラヘルツテクノロジーの最前線」(International Symposium on Frontiers in Terahertz Technology, FTT 2012)が、2012年11月26日(月)から29日(木)に奈良市東大寺総合文化センターにて開催されました。この会議は、テラヘルツテクノロジーの基礎技術から産業応用までの幅広い領域での現状の認識と議論を行い、将来展望を明らかにすることを目的とするものです。震災の影響で当初予定よりは遅れて開催されましたが、発表件数141件(基調講演6件、招待講演29件を含む)、参加者総数225名(国外39名、国内186名)で、予想を超える盛況であり、参加者からの評判も上々でした。招待講演は、テラヘルツテクノロジーの各分野の最先端で活躍する研究者により行われ、エキサイティングな質疑応答がなされました。一般講演は、一部口頭発表で、多くはポスター発表となりましたが、ここでも大変活発な議論が行われ、特に我が国のテラヘルツテクノロジーのアクティビティの高さが示されました。協賛企業による展示も行われるとともに、若手研究者の奨励と育成を目的として、Student Presentation Awardを設け、会議において優秀な発表を行った学生4人に対して賞が授与されました。また、この分野における学術的な貢献、およびコミュニティ形成や産業応用を目指した活動への寄与が大きい個人の業績を顕彰するためにテラヘルツテクノロジー貢献賞が設けられ、会議中のバンケットにおいて選考委員長のX.-C. Zhang教授から受賞者の阪井清美氏(テラテク会長)にメダルが手渡されました。

この会議は、学振、テラテク、NICTなどの助成を得て行われましたが、組織委員会、プログラム委員会の皆様には、開催に際して大変なご努力をいただきました。この場を借りて、これらの方々と参加者の皆様にお礼を申し上げます。Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Wavesに、このシンポジウムの特集号が出る予定となっております。シンポジウムについては、今後も続ける方向で議論が進んでいることを申し述べておきます。なお、詳細につきましては、ホームページ(<http://www.ftt2012.com/>)で見ることができます。

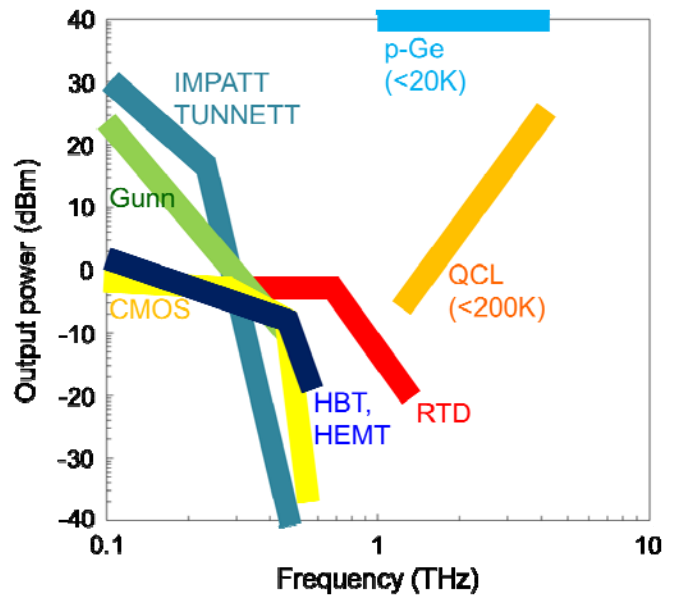


共鳴トンネルダイオードによる室温テラヘルツ発振器

東京工業大学 大学院総合理工学研究科 鈴木左文、浅田雅洋

1. はじめに

THz帯の普及にはコンパクトな室温のTHz光源がキーデバイスである。半導体の単体光源デバイスでは、光デバイス側からTHzカスケードレーザやp-Geレーザ、電子デバイス側から共鳴トンネルダイオード(RTD)、タンネット、インパット、ガンダイオードが研究されている。最近では、高電子移動度トランジスタ(HEMT)やヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)、シリコンCMOSトランジスタなどの動作周波数向上も著しい。図1に主な半導体単体のTHz光源の周波数と出力の現状を示した。RTDの基本波発振は1THzを超えており^{1~4)}、現在のところ単体の室温電子デバイスの中では最も高い周波数で発振している。我々の研究室では、RTDの高周波化・高出力や高速THz無線通信などへの応用を目指した研究を行っている。



2. 素子構造と発振特性

図2のように、RTDは半導体(InP)基板上のGaInAs/AlAsヘテロ接合による2つの極薄バリアとその間の量子井戸で構成されている。電流-電圧特性は図3に示すようになる。エミッタの伝導帯端が量子井戸の共鳴準位より高いエネルギーになるバイアス電圧で、電流-電圧特性に微分負性抵抗(NDR)領域が現れる。このNDR領域が発振に用いられる。図3では電子が基板側から表面方向に流れる場合を示しているが、両バイアス方向で動作が可能である。

図1 主な半導体THz光源の周波数と出力の関係。動作温度の記載の無いものは室温動作。

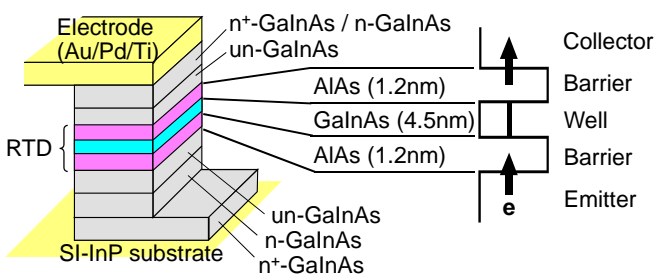


図2 RTDの層構造

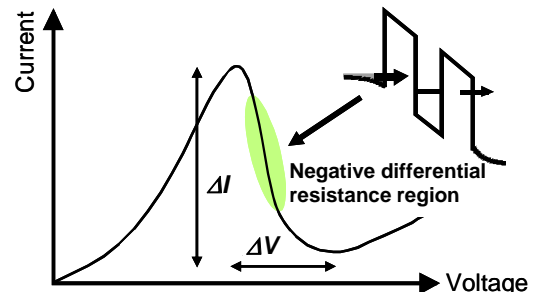


図3 RTDの電流-電圧特性

図4に実際に作製したスロットアンテナ集積型 RTD 発振器の構造を示す。RTD の上下の電極はスロットアンテナに接続されている。スロットアンテナの両端には、左右の電極で SiO₂ を挟み込んだ金属/絶縁体/金属 (MIM) 構造の反射器が形成されており、これにより RTD に直流バイアスを印加しつつ高周波をスロット内に閉じ込めることができる。スロットアンテナの外側には RTD と並列にビスマス膜による抵抗を接続し、外部回路による 2-3GHz の寄生発振を抑圧している。発振出力は誘電率の高い基板側に放射されるので、図5のように、素子をシリコン半球レンズ上に置いて下方から取り出される。モジュール化された素子はボンディングワイヤにより接続された SMA コネクタからバイアスされ駆動し、同時に変調信号を入力することによって高速変調も可能である。

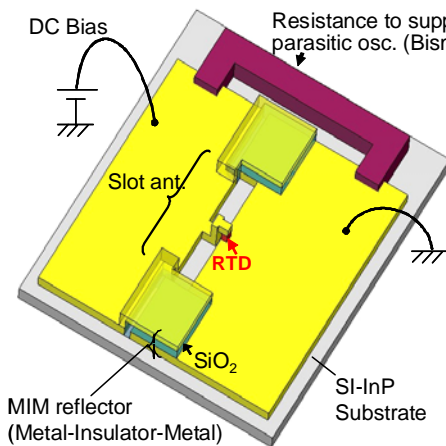


図4 作製したスロットアンテナ集積型 RTD 発振器

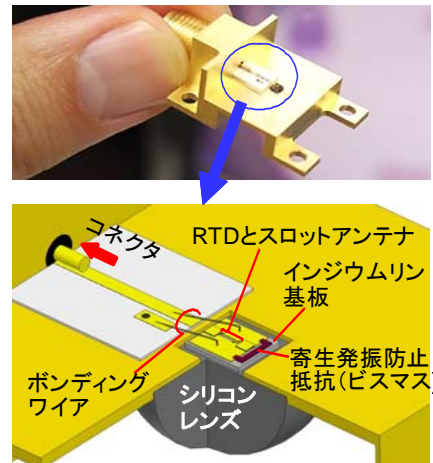


図5 モジュール化した RTD 発振器

高周波発振のためには、RTD のキャパシタンスを低減することが有効なため、RTD の層構造中に厚いコレクタスペーサ層を挿入するとともに小面積化している。このとき、小面積化により有効電流 (図3の ΔI) が小さくなり出力が低下してしまうため、エミッタを高濃度ドーピングすることによる高電流密度化も同時に行っている。

キャパシタンスの低減だけではなく、高周波化には、微分負性抵抗特性を高周波まで維持させるために、量子井戸内の共鳴準位での電子の滞在時間とコレクタ走行時間からなる遅延時間の短縮も必要である。我々はこれまでに、井戸内の共鳴領域滞在時間減少のためのバリア層薄膜化と低電圧化のために提案したグレイデッドエミッタ構造を組み合わせることによって 1.04THz の発振を達成した¹⁾。これは単体の室温電子デバイスで初めて基本波発振周波数が 1THz を超える結果となった。さらに、量子井戸層を薄くすることによって同様に共鳴準位滞在時間の短縮化を行った。井戸の薄層化の効果が明瞭に得られた実験結果を図6に示す。図6(a)のように、井戸層厚 4.5nm では発振限界の周波数は 770GHz であったが、3.9nm と薄層化することにより、同じ面積でも発振周波数が上昇するとともに、発振限界周波数も大きく上昇している。図6に示すように、この実験で得られた最高発振周波数は 1.31THz (10 μ W) であり、0.8~1.3THz において 10~30 μ W が得られている。この井戸層の薄層化により、現時点では遅延時間のうちコレクタ走行時間が支配的になっている。コレクタ層の厚さや、それを構成する材料を最適化することによってコレクタ走行時間の短縮が可能である。また、井戸のさらなる薄層化、及び、高ドーピング化による寄生抵抗の低減も併せて行うことで、2THz を超える発振が可能である事が理論的に見積もられている。

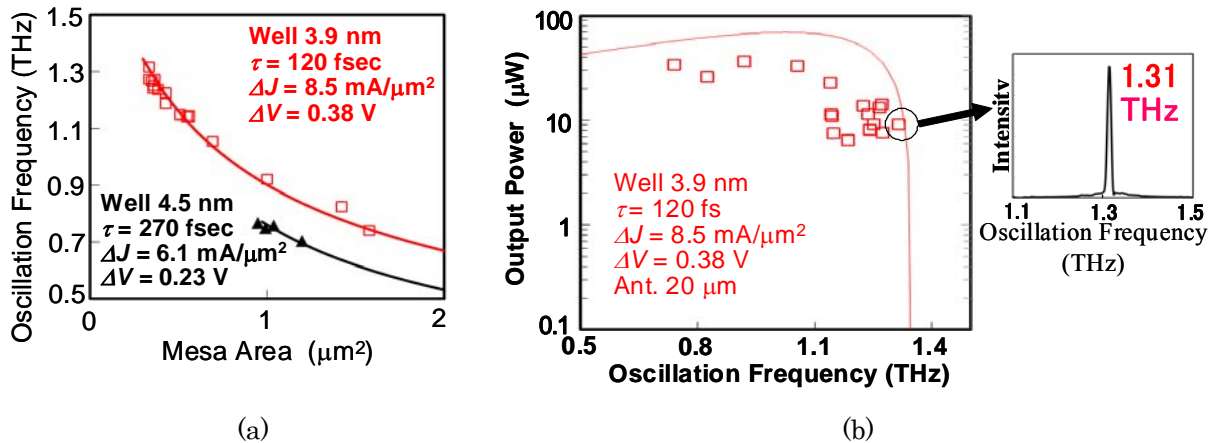


図6 井戸を薄層化したRTD発振器の特性。(a)発振周波数のRTD面積依存性、(b)発振周波数対出力と最高発振周波数(1.31THz)のスペクトル

RTD発振器の出力は、理論的には $(3/16)\Delta I\Delta V$ (ΔI と ΔV は図3参照)まで取り出すことが可能で、この値は上述の素子では1mW以上になるが、実際には $10\mu\text{W}$ 程度と小さい。これはRTDのキャパシタンスにより発振周波数がアンテナの共振周波数より低くなるため、アンテナの放射コンダクタンスが小さくなることが原因である。この状況を改善するため、RTDの位置をスロットの中央からずらして配置するオフセット給電構造を提案している。この構造では、放射コンダクタンスと発振周波数を独立に決めることができ、高出力化が可能である。実験では、まだ初期の段階であるが、現在までに550GHzの発振が出力およそ $400\mu\text{W}$ で得られている⁵⁾。DCからRFへの変換効率は、寄生発振抑圧用の抵抗を除いて1.45%と、この周波数帯の素子としては比較的大きな値が得られている。オフセットに加え、アンテナの幅により放射コンダクタンスを変化させ、RTDとアンテナのインピーダンスマッチングを行えば、さらに高出力化が可能で、単体で1mWの出力も理論的に見積もられている⁶⁾。

高出力化には発振素子アレイによる出力合成も有効である。素子間に結合があるアレイでは、個々の素子の固有の発振周波数がわずかに異なっても、同時に動作させた場合には、素子間の相互注入同期により単一周波数とすることができ、コヒーレントな出力合成ができる^{7~10)}。ただし、素子数が増えると、相互注入同期を安定に起こさせるためには、個々の発振周波数のばらつきも小さくする必要がある。これも初期実験であるが、オフセット構造と高電流密度のRTDのアレイを用いることにより、2素子アレイで620GHzにおいて $610\mu\text{W}$ の出力を得ている¹⁰⁾。

放射パターンについては、直径5mmのSiのハイパー半球レンズを用いることにより、半値全幅6~8度の狭ビームが得られている。このようにSiレンズは狭ビームには有効であるが、サイズが大きいことに加え、屈折率が高いための表面反射や全反射による損失が無視できない。レンズを用いないアンテナ構造も報告されており^{2,4,11,12)}、アンテナ構造の考案により、基板と反対方向や基板に沿った方向に狭いビームで出力を放射させることは可能と考えられる。

RTD発振器の発振スペクトル線幅の測定結果は数MHz~10MHz程度であり^{13,14)}、これは出力と共振器のQ値の2乗の積に逆比例するため、素子構造や出力の改善によって狭線化が可能である。また、バイアス電圧による5%程度の周波数変化も得られており¹³⁾、これは位相同期ループによる安定化や周波数微調整に有効である。

THz帯の重要な応用のひとつに高速無線通信があるが¹⁵⁾、RTDは小型で室温動作に加え、直接変調が簡単に行えるため、このような応用(とくにチップ間などの短距離大容量伝送)において、簡易な送信素子として適している^{12,16)}。我々はバイアス電圧の変調によるTHz出力の変調と変調特性の測定、および、これを利用した540GHz帯3Gbps無線伝送などの初期的な実験を行っている¹⁶⁾。現時点では、伝

送速度は RTD 周辺の外部回路の周波数特性で制限されているが、回路の最適設計によって高速化が可能である。この他、RTD へのレーザ光の照射による THz 出力の変調も観測しており¹⁷⁾、これは光ファイバ通信の信号を THz 無線信号に変換するのに有用である。

3. むすび

本稿では、薄膜バリアと 그레이デッドエミッタ構造による 1THz 発振や、狭井戸構造による 1.3THz 発振など RTD の高周波化、および、オフセット給電による 550GHz 400 μ W やアレイ化による 620GHz 610 μ W などの高出力化の取り組みについて述べた。また、Si レンズを用いた発振素子モジュールの放射パターンや発振線幅などの諸特性について触れ、さらに、RTD を用いた初期的な通信実験についても述べた。これらの結果から RTD 発振器は、THz 帯の無線通信やその他の種々の応用のためのコンパクトな室温発振素子として有望である。今後もより高周波化、高出力化の研究を進めるとともに、1THz 前後の素子については作製プロセスやモジュール化もある程度確立しているので、個数を揃える方法が確保できれば、いろいろな応用も試していきたいと考えている。

参考文献

- (1) S. Suzuki, M. Asada, A. Teranishi, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, *Appl. Phys. Lett.* 97 (2010) 242102.
- (2) M. Feiginov, C. Sydlo, O. Cojocari, and P. Meissner, *Appl. Phys. Lett.* 99 (2011) 233506.
- (3) H. Kanaya, H. Shibayama, R. Sogabe, S. Suzuki, and M. Asada, *Appl. Phys. Express* 5 (2012) 124101.
- (4) Y. Koyama, R. Sekiguchi, and T. Ouchi, *Int. Symp. Frontiers in THz Technol. Pos-1.8*, Nara, Nov. 2012.
- (5) M. Shiraishi, H. Shibayama, K. Ishigaki, S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama: *Appl. Phys. Express* 4 (2011) 064101.
- (6) H. Shibayama, M. Shiraishi, S. Suzuki, and M. Asada, *J. Infrared Millimeter & THz Waves* 33 (2012) 475.
- (7) S. Suzuki, N. Orihashi, and M. Asada: *Jpn. J. Appl. Phys.* 44 (2005) L1439.
- (8) S. Suzuki and M. Asada: *Jpn. J. Appl. Phys.* 46 (2007) L1108.
- (9) S. Suzuki, K. Urayama, and M. Asada: *Appl. Phys. Express* 2 (2009) 044501.
- (10) S. Suzuki, M. Shiraishi, H. Shibayama, and M. Asada, *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* 19 (2013) 08500108.
- (11) K. Urayama, S. Aoki, S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, *Appl. Phys. Express* 2 (2009) 044501.
- (12) T. Mukai, M. Kawamura, T. Takada, and T. Nagatsuma, *Opt. THz Sci. and Technol.*, MF42, Santa Barbara, Mar. 2011.
- (13) K. Karashima, R. Yokoyama, M. Shiraishi, S. Suzuki, S. Aoki, and M. Asada, *Jpn. J. Appl. Phys.* 49 (2010) 020208.
- (14) S. Suzuki, K. Karashima, K. Ishigaki, and M. Asada, *Jpn. J. Appl. Phys.* 50 (2011) 080211.
- (15) H.-J. Song and T. Nagatsuma, *IEEE Trans. THz Sci. and Technol.* 1 (2011) 256.
- (16) K. Ishigaki, M. Shiraishi, S. Suzuki, M. Asada, N. Nishiyama, and S. Arai, *Electron. Lett.* 48 (2012) 582.
- (17) S. Kaburaki, S. Suzuki, and M. Asada, *IEEE Photonics Conf. ThS-2*, Arlington, Oct. 2011.

研究室紹介

独立行政法人 情報通信研究機構 テラヘルツ研究センター

(<http://www2.nict.go.jp/ttrc/>)

(寶迫 巖 hosako@nict.go.jp)

テラヘルツ技術は、非破壊検査、分光分析、超高速無線など、様々な産業での応用可能性が見え始めており、様々な研究開発プロジェクトが国内外で盛んに企画・実施されています。独立行政法人 情報通信研究機構では、このような状況を踏まえ、テラヘルツ技術の研究開発をより一層推進するためテラヘルツ研究センターを平成24年6月に発足させました。同研究センターには、テラヘルツ連携研究室が設置され、既存の4研究所の8研究室（未来 ICT 研究所（超高周波 ICT 研究室、ナノ ICT 研究室、バイオ ICT 研究室）、電磁波計測研究所（電磁環境研究室、センシング基盤研究室、時空標準研究室）、ワイヤレスネットワーク研究所（スマートワイヤレス研究室）、光ネットワーク研究所（光通信基盤研究室））からの参画を得て、光源／検出器などデバイス（量子カスケードレーザ、超伝導ボロメータ、超高速集積回路）・周波数標準（周波数コム）・パワー標準・大気伝搬と言った基礎・基盤的研究から分光分析（テラヘルツ時間分解分光法（THz-TDS）等）・非破壊検査（THz-TDS、カメラ等）・超高速無線（～100Gbps）と言った応用までを幅広い研究開発を実施できる体制を整えました。テラヘルツ連携研究室では、情報通信研究機構の自主研究間の連携研究を推進するだけでなく、情報通信研究機構が実施する委託研究や総務省にて実施されている電波資源拡大のための研究開発等とも密接に連携し、今後テラヘルツ帯に於いて進む標準化（特に国際電気通信連合 無線通信部門（International Telecommunication Union Radio-communications Sector）における標準化）を見据えた研究開発を実施しています。

テラヘルツ研究センターでは同センターの設置を記念し、平成25年1月16日に「テラヘルツ波の産業応用の可能性」講演会（於イイノホール）を総務省の後援を受け開催しました。本講演会は、「イメージング」、「分野間融合」、「分光基盤」、「超高速無線通信」の4セッション（講演8件とポスター40件）を設け、テラヘルツ研究センターの自主研究や情報通信研究機構の委託研究、総務省の電波利用料（電波資源拡大のための研究開発）や戦略的情報通信研究開発推進制度で実施しているテラヘルツ技術分野の研究開発を概観するとともに、今後の産業応用可能性を議論することを目的としたものです。（講演会プログラム等の詳細は講演会のホームページ<http://terahertz-sympo.com/program.html>をご参照ください。）講演会には約300名と多くの参加者があり、アンケート結果では参加者の約60%が製造業からと、テラヘルツ技術の実用化へ向けた産業界の期待が大きくなってきていることが示された良い機会となりました。

テラヘルツ研究センター（東京都小金井市（センター本部）、兵庫県神戸市、神奈川県横須賀市）は、開かれた研究開発の連携拠点として機能する運営を志しております。近くにお越しの際はどうぞお気軽にお立ち寄りください。

国内会議 ・ 国際会議 予定

(<http://www.terahertzjapan.com> 掲載)

<2013 年度総会・第 11 回講演会>

日時： 2013年 5月 24日 (金) 13:15~17:30
場所： 大阪大学豊中キャンパス シグマホール
〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-3
(アクセス <http://www.es.osaka-u.ac.jp/jp/access.html#access4>)
参加費： 一般会員以外は3,000円、学生1,000円 (阪大生は無料)

<プログラム>

- (1) 総会 (13:15~14:00)
 1. 2012 年度事業報告・決算に関する件
 2. 2013 年度事業計画・予算に関する件
 3. その他
- (2) 講演会 (14:15~17:30) 詳細はHPをご覧ください

国際会議およびシンポジウム等

- International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013 (OTST 2013)
April. 1-5, 2013 (Kyoto, Japan)
Website: <http://www.tanaka.icems.kyoto-u.ac.jp/otst2013/index.php>
- Symposium: “Terahertz Technology for Problem Solving in the 21st Century”
ACS National Meeting, Chemistry of Energy & Food
April 7-11, 2013 (New Orleans, USA)
Website:http://portal.acs.org/portal/acs/corg/content?_nfpb=true&_pageLabel=PP_SUPERARTICLE&node_id=879&use_sec=false&sec_url_var=region1&__uuid=453848c6-ea02-43b5-ac0a-23f6b4a629ad
- The 24th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT2013)
April 8-10, 2013 (Groningen, Netherlands)
Website: <http://www.sron.nl/isstt2013.html>
- MPNS COST Action Training School - MP1204 TERA-MIR Radiation: Materials, Generation, Detection and Applications
May 20-24, 2013 (Cortona, Italy)
Website: <http://web.nano.cnr.it/scuolafotonica2013/>
- 2013 International Microwave Symposium (IMS2013) (Seattle, United States)
June 2-7, 2013 (Seattle, USA)
Website: <http://ims2013.mtt.org/>
- CLEO:2013
June. 9-14, 2013 (San Jose, USA)
Website: <http://www.cleoconference.org/home/>
- CLEO-PR & OECC/PS 2013
June. 30 – July 4 (Kyoto, JAPAN)
Website: <http://www.cleopr-oecc-ps2013.org/>

- The 34th PIERS in Stockholm
Aug 12-15, 2013 (Stockholm, Sweden)
Website: <http://www.jorcep.org/piers2013/>
- 7th International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy (ICAVS-7)
Aug. 25-30, 2013 (Kobe, Japan)
Website: <http://www2.convention.co.jp/icavs7/index.html>
- The 38th International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves (IRMMW-THz 2013)
Sep. 1-6, 2013 (Mainz, Germany)
Website: <http://www.theconference2013.com/main.html>

国内会議および研究会等

- IEICE エレクトロニクスシミュレーション研究会 (テラヘルツ応用)
2013年5月10日 (NTT厚木研究開発センター)
Website: http://www.ieice.org/ken/program/index.php?tgs_regid=4d01127c0d847c31abdb1c275e0b8c8bbea7efb53050888a1a015552cd63ca51&tgid=IEICE-EST&lang=
- 応用物理学会 2013年秋季講演会
2013年9月16-20日 (同志社大学 京田辺キャンパス)
Website: <http://www.jsap.or.jp/activities/annualmeetings/regularmeeting.html>
- 日本物理学会 領域5分野 (光物性)
2013年9月25-29日 (徳島大学)
Website: <http://www.jps.or.jp/activities/meetings/future.html>
- Bio Opto Japan 2013 テラテックビジネスセミナー
2013年10月18日 (パシフィコ横浜)
Website: <http://www.optojapan.jp/bio/>
- THz分光部会シンポジウム
2013年10月28日(月)ー29日(火) (京都大学)
Website: <http://www.bunkou.or.jp/terahertz/>

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 Vol.11, No.1 350部 無料

発行日 2013年4月17日

企画・編集 川瀬 晃道 (名古屋大学)

メール: kawase@nuee.nagoya-u.ac.jp

発行 テラヘルツテクノロジーフォーラム事務局

〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3

大阪大学 大学院基礎工学研究科 物質創成専攻 未来物質領域 芦田研究室内

Tel: 06-6850-6507 Fax: 06-6850-6509

E-mail: teratech@terahertzjapan.com

<http://www.terahertzjapan.com>