

## テラヘルツテクノロジーフォーラム通信

Vol.15、 No.1

## 巻頭言

テラヘルツテクノロジーフォーラム 副会長 大谷知行

新たに 2017 年度を迎えるにあたり、毎年恒例である前年度の振り返りと今年度の展望について述べたいと思います。2016 年度のテラヘルツテクノロジーフォーラムにとって最も大きな変更の一つは、フォーラム事務局の変更でした。ここ数年、効率的な運営のために様々な形態を模索してきましたが、本フォーラムでは昨年度から事務局を（株）ポラリス・セクレタリーズ・オフィスに委託し、新体制の運営をスタートさせました。この新体制は、同社の協力のもと、まずまずのスタートを切れたのではないかと感じています。

学術的な活動としては、2 回の技術セミナーを開催しました。とりわけ、分光学会、応用物理学会、電子情報通信学会、福井大学との共催で福井にて開催された研究会「テラヘルツ科学の最先端 III」では、113 名もの参加者が集い、講師の質も高く、非常に活発な議論が行われました。また、会員への情報提供サービスとして、四半期に一度、テラヘルツ関連の論文リストをまとめて提供するサービスを開始しました。このような最新トレンドを紹介するサービスの一環として、今後、Laser Focus Japan 誌との提携についても検討を進めています。さらに、2018 年に日本開催が決定した第 43 回赤外・ミリ波とテラヘルツ波に関する国際会議（IRMMW-THz 2018）の準備も本格化してきました。本フォーラムではこの会議を後援するとともに、谷正彦会長が同会議の共同議長を務めるなど、多くのメンバーが様々な形で運営に携わっており、今後もテラヘルツ分野を盛り上げるべく協力を進めていければ、と考えています。

上記の活動に加えて、2017 年度はテラテクビジネスセミナーに大きな変化が見られる予定です。ここ数年、同セミナーは展示会 All About Photonics と提携して行って来ましたが、2017 年度は同展示会が国内最大規模の技術系展示会の一つである CEATEC Japan と同時開催されることになりました。また、昨年度に引き続き、テラテクフォーラム会員に特典を設けた展示ブース「THz ゾーン」も企画しております。例年に比べて入場者が大幅に増加することが期待されますので、ぜひ多数の会員の方にご参加いただき、多方面に向けて積極的な PR をお願いできれば、と思います。

最後に、テラヘルツ技術の産業動向について、私見を述べさせていただきます。テラヘルツ分野では、長らくカラーアプリケーションが生まれてこないと言われてきました。しかし、テラヘルツ分野の応用開拓はすでに非常に幅広い分野で行われてきており、一言では紹介できないくらいの種類や数の豊富さを誇っています。一方、応用が爆発的に広がるまでにはまだ至っていないのも事実です。では、その要因を考えてみると、その一つにコンポーネントの高額さ、もしくは、コンポーネントが発展途上であることがあるのではないかと思います。これを見るに、テラヘルツ分野で足りないのは「カラーアプリケーション」ではなく、むしろ「カラーコンポーネント」ではないかと感じます。このようなコンポーネント開発には時間もコストも要しますが、多くの方々のご尽力のもと、国内でも海外でもその開発は着実に進んできています。このような動向から、近い将来にテラヘルツ技術が多方面で使われるのは確実だろうと感じますし、カラーコンポーネントの出現によって、急激に広がっていく展開を期待できるのではないかと考えています。そこに至る期間を少しでも短く、また、広がり大きくするためにも、今後もフォーラム活動を盛り上げていければ、と思います。

# 小型チップ状 THz 光発生デバイスの開発

坪内雅明、永島圭介、越智義浩、圓山桃子

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所

tsubouchi.masaaki@qst.go.jp

近年高強度 THz 光発生法として、超短パルス光の非線形光学結晶への照射による光整流法が広く用いられている。本手法では、非線形光学定数が大きくかつバンドギャップが大きい非線形結晶と、適切な励起光源の選択が必要となる。現在比較的容易に利用可能な超短パルス励起光源として、Ti:Sapphire レーザー（波長 800 nm, パルス幅 100 fs 程度）と、Yb 系レーザー（波長 1  $\mu\text{m}$ , パルス幅 1 ps 程度）が用いられている。これらを励起光とした場合、LiNbO<sub>3</sub> (LN) 結晶が最適な非線形光学結晶の 1 つとして挙げられる。しかし LN 結晶は、励起光とテラヘルツ光の屈折率が大きく異なるため光整流過程の位相整合条件を満足せず、励起光を直入射するだけでは高い THz 光発生効率は期待できない。

そこで Hebling らは「波面傾斜法」を提案し、LN 結晶によるテラヘルツ光発生効率の劇的な向上に成功した[1]。本手法では図 1 (a)に示す様に励起光の波面をチェレンコフ角

$$\theta_c = \cos^{-1} \left( \frac{n^{gr}}{n_{\text{THz}}} \right) : n^{gr} \text{ は励起光の群屈折率、} n_{\text{THz}} \text{ は THz 光の屈折率} \quad (1)$$

だけ傾ける事により励起光の波面とテラヘルツ光の波面を揃え、擬似的な位相整合条件を成立させる。本手法は 2002 年に提案された後すぐ同グループにより実証され[2]、その後 Nelson らによる最適化により 2007 年には 10 Hz の繰り返し周波数で 10  $\mu\text{J}$ [3]、翌年に繰り返し 1 kHz で 3.3  $\mu\text{J}$ [4]の出力が実現され、従来法に比べて飛躍的にテラヘルツ光出力が向上した。

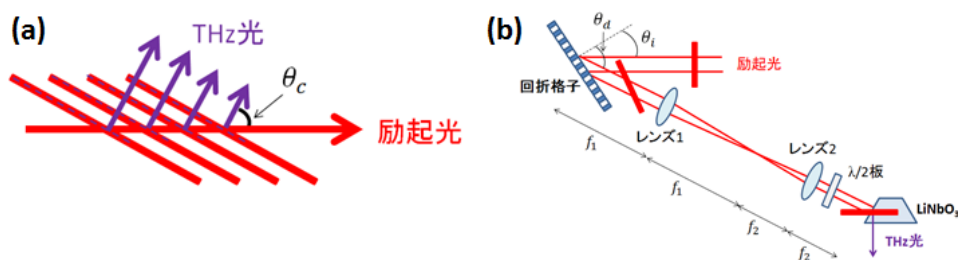


図 1 : (a) 波面傾斜法の概念図。(b) 波面傾斜法の一般的な実験装置図。

さらに高強度の THz 光発生を目指す際、

1. 高い発生効率が期待される波長及びパルス幅の励起光源の選択
2. 高強度励起光照射による結晶の破損や多光子励起を防ぐためのビーム系の大口径化

が必要となる。前者に対しては、Hebling らによる理論的検討により、波長  $> 1 \mu\text{m}$ 、パルス幅 500 fs ~ 1 ps の励起光の使用が最適である事が示唆されている[5]。筆者らは条件を満たす励起光源として、Yb:YAG 薄ディスクを用いた再生増幅器（波長 1030 nm, パルス幅 1.3 ps、パルスエネルギー 10 mJ、繰り返し周波数 1 kHz）を構築した[6]。

一方、従来の波面傾斜法（図 1 (b)）を大口径励起光に適用した場合、プリズム状の LN 結晶を用いているため、プリズムの頂角付近と頂角から離れた位置では発生するテラヘルツ光の結晶内光学距離や励起光との相互作用長が異なるため、空間的に不均一なビームパターンを持つテラヘルツ光発生が予想される。また本手法では、回折格子により傾斜させた波面を 4f レンズ系で LN 結晶に像転送する必要がある、周辺部での像の歪みによる THz 光発生効率の低下を防ぐための大きな光学系が必要となる。

上記の問題を解決するために Hebling らは一体型回折格子（Contact Grating）法を考案した[7]。本手法では図 2 (a)に示す様に、LN 結晶上に直接回折格子を刻む事によってイメージ転送系を排除し、波面傾斜とテラヘルツ光発生とを同一デバイスで達成させる。本手法では、THz 光の結晶内光路長が増大することなく大口径化が実現され、大強度励起光源を用いた高強度 THz 光発生に適している。また、回折格子と LN 結晶を一体化する事で THz 光発生部が 1 cm 程度のチップ形状におさまり、劇的な装置の小型が実現される。

本デバイスに課される条件は、

1. 式(1)に示された波面傾斜角を実現し位相整合条件を満たす
2. デバイスへの励起光の入射及びデバイスからのテラヘルツ光取り出しの利便性
3. 回折格子による励起光の高い回折効率

の三点が挙げられる。デバイスへの励起光入射角を  $44.5^\circ$  とし、回折格子の格子間隔を 420 nm と設計すれば、式(1)の位相整合条件を満たすと同時にテラヘルツ光の出射方向が入射励起光とほぼ平行になり、実験的に利便性の高いデバイスが実現される。しかし LN 結晶上に直接回折格子を工作した場合、上記の条件で回折効率は高々 20% と計算され、当デバイスでは高効率なテラヘルツ光発生が期待できない事が分かった[8]。

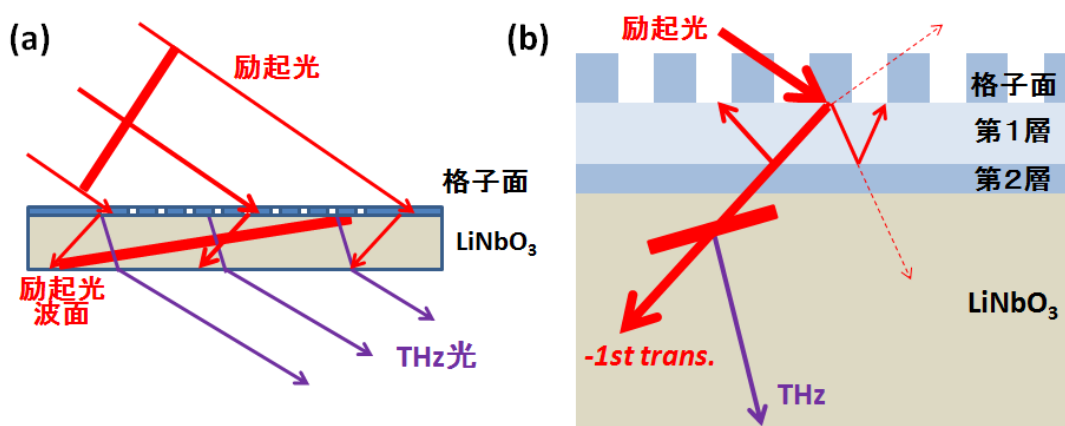


図 2 : (a) Contact grating 法の概念図。(b) Fabry-Perot 型 Contact grating 法の概念図。

我々の研究グループではこの問題を解決するために、図 2 (b)に示す新規形状のデバイスを考案した[9]。本デバイスでは、LN 結晶上に多層膜を蒸着し、その最外膜に回折格子を工作した。第 1 と第 2 薄膜層の界面で回折光に対して全反射条件を満たし、第 1 薄膜層内で回折光に対して共振器を構成するように、薄膜の材質（屈折率）の選択と膜厚の最適化を行った。共振器が Fabry-Perot 条件を満たせば、LN 層への回折光の透過率（回折効率）を増強し、一方でその他の反射・透過成分を減らすことができる。我々

のグループでは現在最大 78%の回折効率が得られるデバイスを開発し、製作及び THz 光発生試験を行っている。

図 3 (a)に製作した本デバイスの断面写真を示す（エッチングマスクを除去する前に撮影）。材質として格子面と第 1 層には  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ （屈折率 2.15）、第 2 層には  $\text{Al}_2\text{O}_3$ （屈折率 1.64）を用いた。格子層と第 1 層の間に薄い  $\text{Al}_2\text{O}_3$  層を挿入し、回折格子製作時におけるエッチング過程のストッパーとして作用させ、溝深さの制御を行い製作精度の向上に努めた。膜厚は設計値から 1%以内の誤差、溝幅は 5%程度の誤差で製作された。製作されたデバイスは、図 3 (b)に示す 1 cm 四方程度の小型チップ状デバイスであり、従来の波面傾斜法の光学系と比べて劇的なサイズ縮小が実現されている。図 3 (c)の黒丸点として、製作したデバイスで計測した回折効率の励起光（波長 1030 nm）入射角依存性を示す。入射角  $44.5^\circ$ （位相整合角）で最大の回折効率 78%を得、設計値（図 3 (c)の赤実線）とほぼ同等の回折効率が得られた。

続いて、Yb:YAG 再生増幅器から発生させた励起光を用いた THz 光発生試験を行った。直径 4.5 mm の励起光 5 mJ をデバイスに照射した際、約  $1 \mu\text{J}$  の THz 光出力が得られ、効率  $2.0 \times 10^{-4}$  で THz 光が発生していることがわかった。図 4(a)と(b)に、電気光学効果を用いて測定した THz 光波形とそのフーリエ変換スペクトルを示す。モノサイクル THz 光パルスが観測され、中心周波数 0.25 THz、帯域  $< 1 \text{ THz}$  のスペクトルが得られた。また、図 4(c)に示した THz 光出力の励起光強度依存性から、励起光が 5 mJ 以下の領域では二次的非線形過程である光整流過程が飽和していない事が示された。この様に、Contact grating 法による  $\mu\text{J}$  レベルのテラヘルツ光の発生と、その波形観測は本研究で初めて実現された結果であり、現在更なるデバイスの最適化を行いテラヘルツ光出力の向上に努めている。

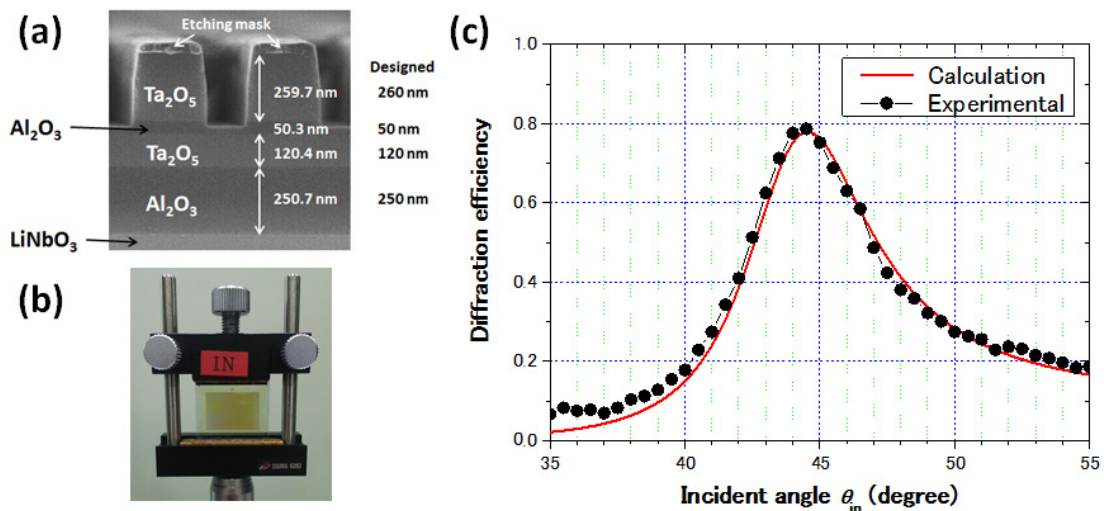


図 3：(a) デバイス断面の透過型電子顕微鏡写真 (NTT アドバンステクノロジー社提供)。(b) デバイスの外観写真。回折格子有効領域 10 mm x 14 mm、厚さ 2.2 mm。(c) 励起光入射角に対する励起光回折効率の計算値（実線）と実測値（黒丸）の比較。

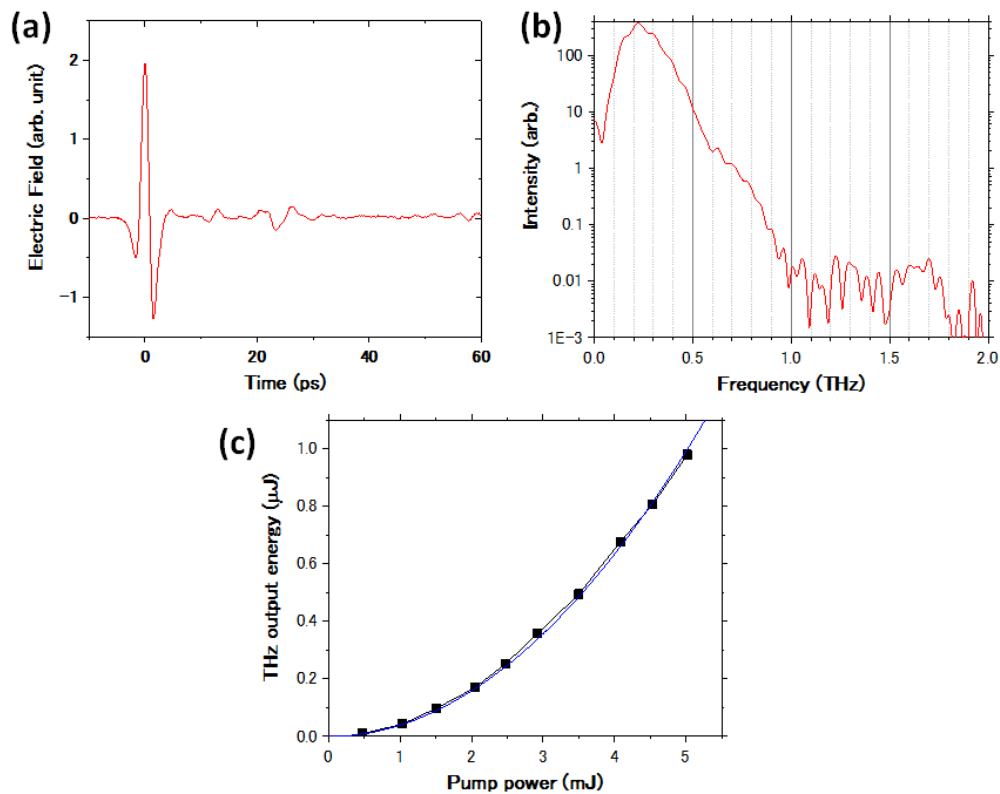


図4：本デバイスで発生させた THz 光の(a)波形、及び(b)スペクトル。(c) THz 光出力の励起光強度依存性。プロットは実験結果、実線は二次関数フィットを示す。励起光入射角 43.2 度に固定して測定を行った。

#### 【参考文献】

- [1] J. Hebling, G. Almási, I. Z. Kozma, and J. Kuhl, *Opt. Express* **10**, 1161 (2002).
- [2] A. G. Stepanov, J. Hebling, and J. Kuhl, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3000 (2003), A. G. Stepanov, J. Kuhl, I. Z. Kozma, E. Riedle, G. Almási, and J. Hebling, *Opt. Express* **13**, 5762 (2005).
- [3] K. L. Yeh, M. C. Hoffmann, J. Hebling, and K. A. Nelson, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 171121 (2007).
- [4] K.-L. Yeh, J. Hebling, M. C. Hoffmann, and K. A. Nelson, *Opt. Commun.* **281**, 3567 (2008).
- [5] J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási, and J. Hebling, *Opt. Express* **18**, 12311 (2010), J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, M. C. Hoffmann, and J. Hebling, *Opt. Express* **19**, 15090 (2011).
- [6] Y. Ochi, K. Nagashima, M. Maruyama, M. Tsubouchi, F. Yoshida, N. Kohno, M. Mori, and A. Sugiyama, *Opt. Express*, **23**, 15057-15064 (2015).
- [7] L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Almási, and J. Hebling, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 171107 (2008).
- [8] K. Nagashima and A. Kosuge, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 122504 (2010), **51**, 119201 (2012).
- [9] M. Tsubouchi, K. Nagashima, F. Yoshida, Y. Ochi, and M. Maruyama, *Opt. Lett.* **39**, 5439 (2014), F. Yoshida, K. Nagashima, M. Tsubouchi, Y. Ochi, M. Maruyama, and A. Sugiyama, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 012201 (2016), F. Yoshida, K. Nagashima, M. Tsubouchi, M. Maruyama, and Y. Ochi, *J. Appl. Phys.* **120**, 183103 (2016).

## 会社紹介

### トプティカフォトンクス株式会社 (喜納和香子)

トプティカフォトンクス株式会社はドイツ TOPTICA Photonics AG の日本法人として 2016 年 9 月より東京都府中市にて営業を開始しました。” Passion for Precision (精密さへの情熱)” のスローガンの元、Toptica グループの技術力を活かし、日本市場に密着した製品提案と技術サービスのご提供に努めてまいります。貴フォーラム会員の方々におかれましてはより一層のご指導ご鞭撻を賜りますよう宜しくお願い申し上げます。

TOPTICA 社では長年にわたる半導体レーザーとフェムト秒ファイバーレーザーの研究開発で培われた技術を活用し様々なテラヘルツシステムおよびコンポーネントをご提供しています。

周波数ドメインテラヘルツ発生ユニット TeraScan (写真 1)は励起光源に 1550nm 帯と 780nm 帯の 2 種類の DFB 半導体レーザーをご用意しており InGaAs および GaAs フォトミキサーをご利用頂けます。超高安定な LD コントローラ(DLC smart)を用いて励起光源の電流及び温度制御を精密に行うことで最大 10MHz 以下の周波数分解能 (相対値)を実現しました。高分解テラヘルツ分光アプリケーションでご利用頂けます。

TeraFlash(写真 2)はコンパクトな筐体にフェムト秒ファイバーレーザー、光学系、制御用ドライバの全てをワンボックス化した時間ドメインテラヘルツ発生ユニットです。5THz 以上の広帯域と 90dB 以上のピークダイナミックレンジ、および 40 トレース/sec の測定スピードを持ち微弱信号を伴う測定アプリケーションに最適なシステムです。

周波数および時間ドメインシステムの両方においてファイバピッグテール型のフォトミキサーを採用し反射光学系、透過光学系、遠隔測定など自由に測定系を設計頂けることも大きな魅力のひとつです。

なお ECOPS 技術を応用した TeraFlash smart のリリースを 2017 年に予定しています。高速測定を特徴にしておりスキャン速度は 1000 パルス/トレース/sec、実証実験では 5000 パルス/トレース/sec を記録しています(図 1 参照)。<sup>1)</sup>

設立されたばかりの若い会社ですが、皆さまのお役に立てるよう社員一同で奮闘して参りたい所存です。どうぞ宜しくお願い申し上げます。

(喜納和香子: wakako.kina@toptica-japan.com)

#### [参考文献]

- 1) M. Yahyapour et al., Terahertz time-domain magneto-spectroscopy using electronically controlled optical sampling, Proc. 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 2016



写真 1 : TeraScan 周波数領域 THz システム



写真 2 : TeraFlash 時間領域 THz システム

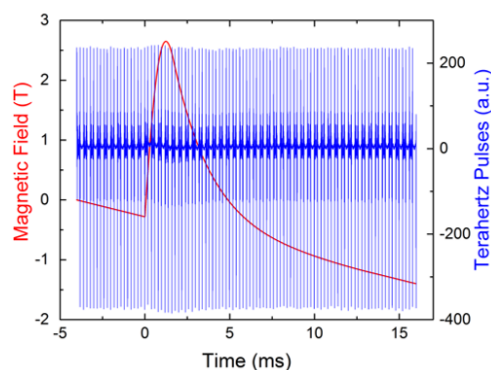


図 1 : パルス磁界内の試料を透過した THz パルス (青線)。1 秒当たり 5000 パルス/トレースを測定。

## 国際会議・国内会議予定

### 国際会議およびシンポジウム等

- ☑ EMN Meeting on Terahertz  
April 1-5, 2017 (Honolulu, USA)  
<http://emnmeeting.org/Americas/terahertz/>
- ☑ Optical Terahertz Science and Technology Conference 2015(OTST2017)  
April 2-7, 2017 (London, UK)  
<http://otst2017.iopconfs.org/home>
- ☑ SPIE Defense + Commercial Sensing 2017  
April 9-13, 2017 (Anaheim, USA)  
<http://spie.org/conferences-and-exhibitions/defense--commercial-sensing>
- ☑ OPTICS & PHOTONICS International Congress 2017 (OPIC 2017)  
April 18-21, 2017 (Yokohama, Japan)  
<http://opicon.jp>
- ☑ Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017)  
May 14-18, 2017 Berlin, Germany  
<http://www.csw2017.org/>
- ☑ Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2017)  
May 14-19, 2017 (San Jose, California, USA)  
<http://www.cleoconference.org/home/>
- ☑ 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 (PIERS2017 in St Petersburg)  
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/>
- ☑ CLEO/Europe-EQEC 2017  
June 25-29, 2017 (Munich, Germany)  
<http://www.cleoeurope.org/>
- ☑ Nonlinear Optics (NLO)  
July 17-21, 2017 (Waikoloa, USA)  
[http://www.osa.org/en-us/meetings/topical\\_meetings/nonlinear\\_optics\\_\(nlo\)/](http://www.osa.org/en-us/meetings/topical_meetings/nonlinear_optics_(nlo)/)
- ☑ The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Pacific Rim)  
July 31-August 4, 2017 (Singapore)  
<http://www.photonics2017.org/index.php>
- ☑ 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017)  
August 27-September 1, 2017 (Cancún, México)  
<http://www.cio.mx/irmmw-thz2017/>

- ☑ 32nd International Union of Radio Science General Assembly and Scientific Symposium (URSI 2017 GASS)  
August 19-26, 2017 (Montreal, Canada)  
[http://www.ursi2017.org/welcome\\_e.shtml](http://www.ursi2017.org/welcome_e.shtml)
- ☑ 14th International Conference on Intersubband Transitions in Quatum Wells (ITQW 2017)  
September 10-15, 2017 (Singapore)  
<https://www.itqw2017.com/>
- ☑ IEEE Photonics Conference (IPC 2017)  
October 1-5, 2017 (Lake Buena Vista, USA)  
<http://www.photonicsociety.org/conferences/ieee-photonics-conference>
- ☑ 19th International Conference on Microwave and Terahertz Technology (ICMTT 2017)  
October 5-6, 2017 (New York, USA)  
<https://www.waset.org/conference/2017/06/new-york/ICMTT>
- ☑ 2nd International Workshop on Photonics Applied to Electromagnetic Measurements (PEM2017)  
October 5-6, 2017 (Volkshaus, Switzerland)  
<https://www.itis.ethz.ch/pem2017/>
- ☑ The 47th European Microwave Conference (EuMC 2017)  
October 8-13, 2017 (Nuremberg, Germany)  
<http://www.eumweek.com/conferences/eumic.html>
- ☑ Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2017 in Singapore)  
November 19–22, 2017 (Singapore)  
<http://piers.org/piers2017Singapore/>
- ☑ 4th International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2017) and 8th International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 8)  
November 19–23, 2017 (Okayama, Japan)  
<http://www.ec.okayama-u.ac.jp/~sense/Terahertz/index.html>

#### 国内会議および研究会等

- ☑ 平成 29 年度 日本分光学会年次講演会  
2017 年 5 月 23-25 日 (早稲田大学西早稲田キャンパス)  
<https://www.bunkou.or.jp/events/events1/2017/20170131.html>
- ☑ 応用物理学会 テラヘルツ電磁波技術研究会 「先端テラヘルツ研究と応用展開」  
2017 年 5 月 26 日 (大阪大学 中之島センター)  
<https://annex.jsap.or.jp/terahertz/THzTop.htm>
- ☑ 第 78 回 応用物理学会 秋季学術講演会  
2017 年 9 月 5-8 日 (福岡国際会議場)  
<http://meeting.jsap.or.jp/>
- ☑ 日本物理学会 2017 年秋季大会  
2017 年 9 月 21-24 日 (岩手大学上田キャンパス)  
<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.php>
- ☑ 応用物理学会 テラヘルツ電磁波技術研究会 若手研究者サマースクール 2017  
2017 年 8 月 9-10 日 (かんぼの宿 鳥羽)  
URL: <http://annex.jsap.or.jp/terahertz/THzTop.htm>

#### テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 Vol.15, No.1

発行日 2017 年 04 月 21 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](mailto: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](mailto:teratechoffice@terahertzjapan.com)  
<http://www.terahertzjapan.com>