

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249049

研究課題名(和文) 狭帯域時間領域テラヘルツ光源の開発と応用

研究課題名(英文) Development of narrow band time-domain terahertz sources and their applications

研究代表者

斗内 政吉 (Tonouchi, Masayoshi)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：40207593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,000,000円

研究成果の概要(和文)：レーザービームを位相制御することにより、反転分極を用いない手法により、狭帯域時間領域テラヘルツ光源を開発した。また、位相変調周期をLiNbO₃結晶上でのレーザー集光条件により転写パターンの周期を変えることで、中心波長制御が可能であることを実証した。このシステムを用いて、テラヘルツカメラの感度評価を行い、テラヘルツデバイス評価に有用であることを実証した。さらに、メタマテリアルを用いたテラヘルツ波制御を可能とするために、スプリットリング型共振器アレイのテラヘルツ波応答を、局所励起レーザーテラヘルツ発生・イメージングシステムおよび平行平板導波路がたテラヘルツ波分光システムで計測した。

研究成果の概要(英文)：A frequency tunable, narrow band, high intense THz wave generation system has been developed. This system can be used for simultaneous measurement of waveform and pulse energy, and can produce frequency and bandwidth tunable multi-cycle THz pulses by optical rectification of femtosecond laser pulses using binary phase mask and lithium niobate single crystal. The central frequency can be tuned by varying period of the phase mask. The power of generated narrow band THz wave can be measured using a superconducting edge triggered bolometer. Uncooled microbolometer-based THz imagers were characterized using that system.

研究分野：テラヘルツ工学

キーワード：テラヘルツ波 狭帯域 周波数可変 時間領域

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒レーザー励起によるテラヘルツ電磁波の発生と計測手法 (THz-TDS) は、物質の低エネルギー物性の新しい評価として注目を集めている[1]。THz-TDS は、その他の手法 (自由電子レーザーやパラメトリック発生) と比べて、時間領域での計測が可能であり、ダイナミック物性が評価できる点に特徴を持っており、様々な電子材料・デバイスの物性評価やテラヘルツ波応用研究に有用である。

しかしながら、THz-TDS は、ブロードバンドの特性を有している特徴があるが、一方、そのブロードバンド性が欠点ともなっている。すなわち、物質の様々な励起に関して、特定に周波数応答の評価に利用が難しいからである。そこで、本研究では、これまでに無い時間領域計測が可能かつ狭帯域のテラヘルツパルス光源の開発に着手し、材料物性探索やデバイス評価への応用を目指した。

2. 研究の目的

図 1 はこれまでに行ってきた狭帯域光源開発の一例である。周期分極反転 LiNbO₃ 結晶に広くレーザー光を照射することで、反転分極周期にあった特定周波数の時間領域テラヘルツ電磁波光源が開発可能であることを示した。しかし、この光源の問題点は、発生周波数が反転分極周期に依存し、周波数チューニングが困難である点にある。そこで、本研究では、新しいアイデアとして、レーザービームを位相制御することにより、反転分極を用いない手法により、狭帯域時間領域テラヘルツ光源を開発し、その最適化により、数 10kV/cm の電界振幅を達成し、また、位相変調周期を LiNbO₃ 結晶上でのレーザー集光条件により転写パターンを周期を変えることで、中心波長制御を行う事を目指した。この光源開発を先ず行い、開発した光源を用いて、様々な物質やデバイスの評価に応用する。応用対象は、強相関電子系材料、超伝導体 (金属系および酸化物系)、ナノカーボンなどであり、テラヘルツ電荷ダイナミック物性の解明と新機能の創製を目指す。さらに、メタマテリアルを用いたテラヘルツ波制御などへの展開も図る。最終的には、高周波デバイス評価装置としての応用の可能性を探る。対象は、テラヘルツカメラ、ショットキー接合、量子カスケードレーザーなどのテラヘルツ光源や検出器を念頭においている。

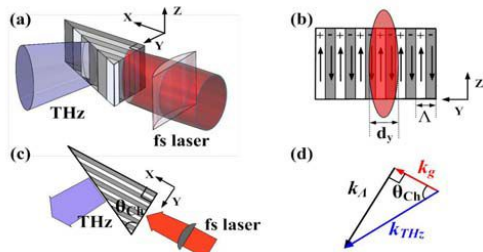


図 1 反転分極 LiNbO₃ 結晶を用いたテラヘルツ電磁波の発生実験システム

3. 研究の方法

これまでに、周期分極反転 LiNbO₃ 結晶を用いて、狭帯域時間領域テラヘルツ発生が可能であることを明らかにしてきた[2]。しかしながら、発生周波数は反転分極周期で決まるので、周波数を変えるには、反転分極結晶を取り替える必要があった。本研究では、高価な反転分極 LiNbO₃ 結晶を単相の LiNbO₃ 結晶に置き換え、位相マスク (PM) を用いることにより、入射レーザーの波面の位相に周期を与えることで、分極反転結晶を用いたときと同様に狭帯域テラヘルツ波発生が可能であることを実証する。また、PM と結晶を分離させ、結晶上に周期構造パターンを射影させることで、連続的な周波数制御を試みた。

また、メタマテリアルを用いることにより、特定周波数のテラヘルツ波をさらに増強することを試みた。開発した狭帯域テラヘルツ光源と組み合わせることにより、特定周波数において、より強い物質とテラヘルツ波の相互作用が実現できる。

最終的には、周波数可変狭帯域時間領域テラヘルツ光源を用いた高周波デバイス評価システムの開発に着手する。現在、サブテラヘルツの無線通信応用なども大きく期待されており、この試みの価値は大きい。まずはデモンストレーションとして、非冷却テラヘルツ波イメージャーの性能評価を行った。

4. 研究成果

(1) 位相制御による周波数可変狭帯域時間領域テラヘルツ光源の開発

図 2 に示すような、厚みが周期的に異なる石英板を位相マスクとして用い、これにフェムト秒レーザーパルス透過させた。これにより、透過したフェムト秒パルスの位相が空間的に変調される。すなわち、図 2 にあるように、位相マスク (PM) の厚みが大きいところを通過した電磁波の波面は少し遅れて進むことになる。この様にして、位相を 180° 周期的に変調することにより、反転分極結晶を用いたときと同様の効果が期待され、狭帯域テラヘルツ波発生が可能となる。

この PM を用いた手法の優れている点は、マスクと結晶を分離し、結晶上に周期構造パターンを射影させ、その倍率を変えることによって、発生する周波数を変化させることが可能となる点である。これは、先行研究で分

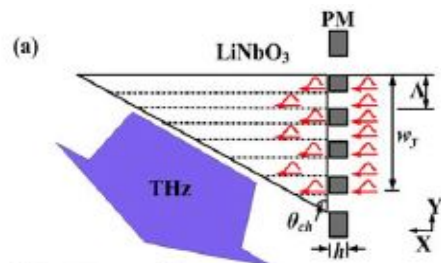


図 2 位相マスク (PM) を用いた狭帯域テラヘルツ発生原理

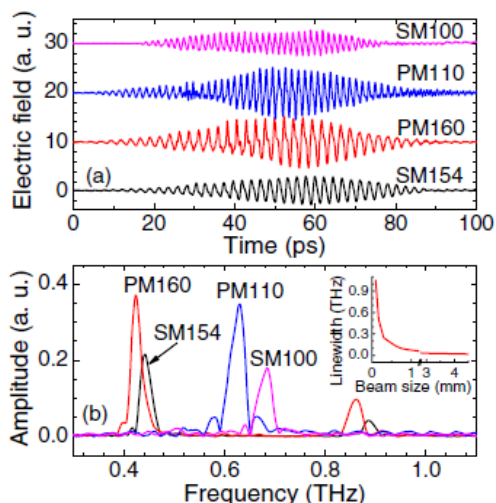


図3 PMおよびSMを用いて発生させたテラヘルツ波の(a)波形および(b)スペクトル。

極反転結晶を用いた場合に、周波数がほぼ固定されることに対して、非常に大きな利点である。図3はこの様な手法により発生した、狭帯域テラヘルツ波の波形およびスペクトルである。この図が示すように、スペクトル幅が20GHz程度でかつ、0.4THzから1.2THz程度まで周波数が変な光源開発に成功した[3]図では、波面制御手法として金属板に周期的にスリットを形成したシャドウマスク(SM)を用いた場合の結果も示されている。この場合も、PMと同様に結晶状にSMのスリットを投影し倍率を変えることにより、周波数可変に出来る[4]。しかしながら、波面の半分が金属板でカットされるため、強度が約半分になっていることが分かる。

このようにPMを用いた周波数可変・狭帯域テラヘルツ波光源が、分光計測や特定波長におけるテラヘルツ波励起に非常に有望であることを示した。

(2)メタマテリアルによるテラヘルツ波制御

メタマテリアルを用いることにより、特定周波数のテラヘルツ波をさらに増強することが可能である。本研究では、テラヘルツ波のエミッターであるGaAs(110)基板へ、直接Au製のメタマテリアル構造を作製し、その分光感度増強効果を実験および計算により検証した。図4のように、メタマテリアル構造を有しない裏面から1.56 μm レーザー光を入射し、表面付近に集光することで使用する。この手法により、1メタアトム(構成単位)に約20 μm 径のテラヘルツ波を照射することができる。実験および電磁界シミュレーション(FDTD)において、GaAsの<001>に対するメタマテリアル設置角度を変更することで発

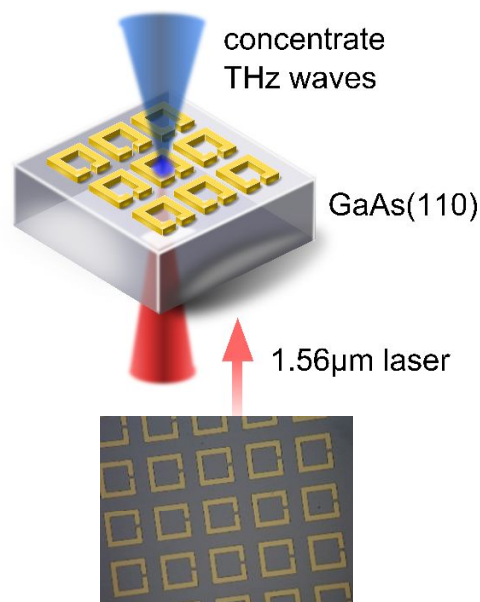


図4:(a)GaAs(110)上の金メタマテリアル (b)作成後顕微鏡写真

生テラヘルツ波の偏光方向を回転させた。その結果得られた透過率が図5である。GaAs基板など閃亜鉛構造から放射されるテラヘルツ波の偏光方向は<001>から反時計回りに計って52.7°を成すことが知られている[11]。シミュレーションおよび実験の双方において、<001>と流路とのなす角が約52.7°の時に最も顕著なLC共振が得られることが分かる。以上より、「高密度テラヘルツ波」と「メタマテリアル」の効果を両立したデバイスの作製が可能であることが確認できた。

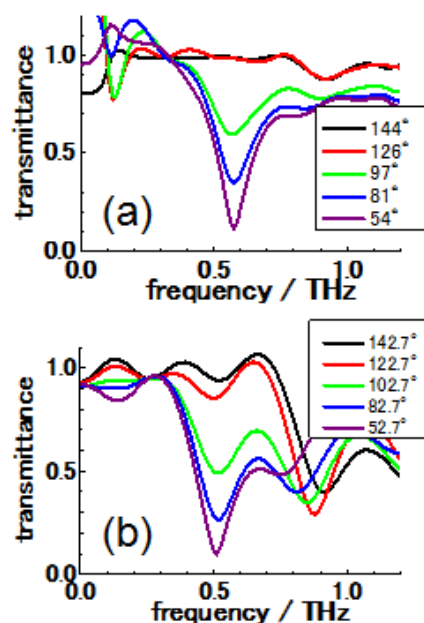


図5 透過テラヘルツ波の偏光依存性の (a)実験および(b)シミュレーション結果。

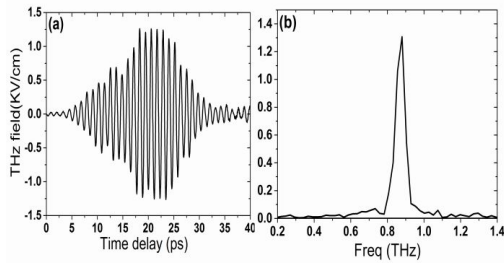


図6 イメージャー評価に用いたテラヘルツ波の(a)波形および(b)スペクトル。

(3) 狭帯域テラヘルツ波光源を用いたテラヘルツデバイス評価

開発した狭帯域テラヘルツ光源を用いて、テラヘルツイメージャー(NEC 製 T0832)の信号雑音(SN)比や雑音等価電力(NEP)などの評価を行った。本テラヘルツイメージャーは、高感度非冷却テラヘルツアレイセンサを用い、エネルギーの低い1THz以下でも高感度に計測できる設計となっている。しかしながら、これまでは3THz以下の周波数で信頼できる評価システムが無く、十分な性能評価が出来ていなかった。今回の実験では、図6に示すような、周波数850GHz、バンド幅80GHz以下の、狭帯域テラヘルツ波を用い、本イメージャーの性能評価を行った。

図7(a)および(b)は、パルス信号と同期して信号を積算する lock-in オプションがオンのときとオフの時に、イメージャーで狭帯域テラヘルツ波を計測したときのイメージである。明らかに、lock-in オプションを用いることにより、SN比が向上している。図8はlock-inオプションの積算フレーム数とSN比との関係である。

また、テラヘルツイメージャーのNEPを以下の様に算出した。半古典的HBT(Hanbury Brown and Twiss)理論によると、

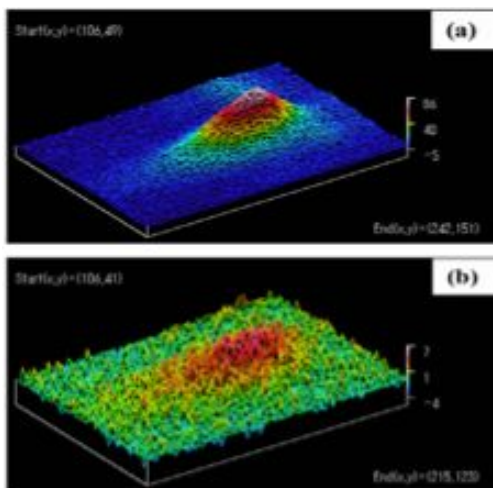


図7 lock-in オプション(a)オン、および(b)オフ時の、イメージング結果。

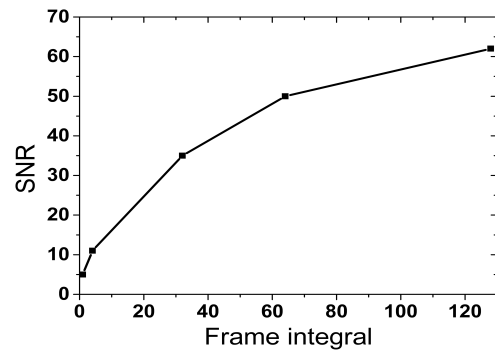


図8 テラヘルツイメージャーのSN比のlock-in オプション積算回数依存性。

$$P_s = hv \left(\frac{2P_B}{\eta hv} f_c \right)^{1/2}$$

と記述することが出来る。このとき、バンド幅 f_c が1の時の入力電力がNEPとなる。ここで、 h がプランク定数、 η は約0.08、バックグラウンド放射パワー P_B が超伝導転移端検出器(TES)測定で $3.53\mu W$ と見積もられる。その結果、イメージャーのNEPは $0.22pW/Hz^{1/2}$ と見積もることが出来た[5]。このように、我々の開発した、狭帯域テラヘルツ光源は、テラヘルツ検出器などのデバイス評価に有用であることが確認できた。

[引用文献]

- M. Tonouchi, Nature Photonics 1(2007)97.
- C. Zhang et al., Optics Express, Vol. 20, 8784 (2012)
- C. Zhang et al., Optics Letter, Vol. 38, No.6, pp953-955, 2013
- Y. Avestisyan et al., Optics Express Vol.20, 25752 (2012)
- S. Roy et al., IEICE TRANSACTIONS on Electronics, Vol.E98-C, 1128 (2015)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

- C. Zhang, (他 5 名、5 番目), " Tunable narrowband terahertz generation in lithium niobate crystal using a binary phase mask ", Optics Letter, Vol.38, No.6, pp. 953-955, 2013, <http://dx.doi.org/10.1364/OL.38.000953>
- K. A. Salek, (他 5 名、5 番目) " Laser terahertz emission microscopy studies of a polysilicon solar cell under the illumination of continuous laser light ", Vol.53, No.3, 031204, Optical Engineering, 2014
- K. Serita, (他 6 名、6 番目) " Evaluation of human hairs with terahertz wave ", Optical

Engineering , Vol.53 , No.3 , Pages031205-031205 , 2014
H. Murakami, (他 7 名、7 番目) “ Scanning Laser THz imaging system ”, Journal of Physics D: Applied Physics , Vol.47 , No.37 , Pages374007 , 2014, doi:10.1088/0022-3727/47/37/374007
K. A. Salek, (他 4 名、4 番目) “ Evaluation of Surface Carrier Recombination of Optically Excited Silicon using Terahertz Time-Domain Spectroscopy ”, Terahertz Science and Technology , Vol.7 , No.2 , Pages100-107 , 2014
M Razanoelina,(他 6 名、6 番目) “ Parallel-Plate Waveguide Terahertz Time Domain Spectroscopy for Ultrathin Conductive Films ”, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves , Vol.36 , No.12 , Pages1182-1194 , 2015, DOI: 10.1007/s10762-015-0194-0
S. Roy,(他 5 名、5 番目) “ Characterization of Terahertz Imagers Using a Narrowband Time-Domain Terahertz Radiation and Detection System ”, IEEE TRANSACTIONS on Electronics , Vol.E98-C , No.12 , Pages1128-1130 , 2015
M. Razanoelina,(他 5 名、5 番目) “ Magnetic resonance of terahertz metamaterials in parallel plate waveguides ”, Applied Physics Express , Vol.9 , Pages032002 , 2016, <http://dx.doi.org/10.7567/APEX.9.032002>
松田栄輝、芹田和則、岡田航介、村上博成、川山 巖、斗内政吉, “ 高密度テラヘルツ波励起メタマテリアルによる微量液体の測定 ”, 電子情報通信学会技術研究報告, 115(387)巻, pp83-88, 2015
H. Murakami, Shogo Fujiwara, Iwao Kawayama, and Masayoshi Tonouchi , “ Study of photoexcited-carrier dynamics in GaAs photoconductive switches using dynamic terahertz emission microscopy ”, Photonics Research , Vol.4 , No.3 , Pages. A9-A15 , 2016

[学会発表](計 26 件)

1. I. Kawayama, (他4名、4番目), “ Tunable narrowband terahertz generation by optical rectification in single domain lithium niobate Crystal ”, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), 2014年06月08日 ~ 2014年06月13日, San Jose, USA
2. Masayoshi Tonouchi, “Frequency

- Tunable Narrow Band Time Domain THz Source”, 5th International THz-Bio Workshop 2014, Seoul National University, 2014/4/2-2014/4/5
3. 川山 巖(他 8 名、8 番目), “高強度テラヘルツ波による超伝導電子対破壊とメタマテリアル特性制御”, 超伝導エレクトロニクス研究会, 41746, 東京
 4. I.Kawayama, (他 4 名、4 番目) “Tunable Narrowband Terahertz Generation by Optical Rectification in Single Domain Lithium Niobate Crystal”, Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose Convention Center, San Jose, CA, USA, 2014/6/8-2014/6/13
 5. Masayoshi Tonouchi, “Laser scanning terahertz imaging system for material science and industrial applications”, The 31th URSI General Assembly of the International Union of Radio Science, Beijing Conference Center, 2014/8/16-2014/8/28
 6. M. Razanoelina,(他 5 名、5 番目)“Terahertz conductivity of gold nanosheet using Parallel Plate Dielectric Waveguide”, The 7th International Symposium on Surface Science, Matsue, Japan, 2014/11/3-2014/11/6
 7. Masayoshi Tonouchi, “Gas Molecules Absorption to Graphene Studied by Laser Terahertz Emission Microscope. Track and Sub track Name: Materials Science and Engineering, Graphene”, 3rd International Conference and Exhibition on Materials Science and Engineering, Hilton San Antonio Airport, USA, 2014/10/6-2014/10/8
 8. Masayoshi Tonouchi, “Nonlinear THz Response of Superconductive Thin Films and Metamaterials”, Second Yonezawa Conference: Superconducting Electronics, Materials and Physics, Yamagata University, 2014/10/13-2014/10/17
 9. I. Kawayama, (他 10 名、10 番目) “Nonlinear responses of superconducting thin films induced by intense terahertz pulses”, The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors , Kyoto University, 2014/11/30-2014/12/3
 10. M. Razanoelina, R. Kinjo, K. Takayama, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi, “ Terahertz waveguide for gold nanosheet analysis”, The 18th SANKEN International Symposium, ISIR, Osaka

- University, Knowledge Capital, Osaka, 2014/12/10-2014/12/11
11. R. Sourav, (他 5 名、5 番目) "Development of Frequency-Tunable Narrowband Time-Domain Terahertz Wave Generation System", 電子情報通信学会 電子デバイス研究会, 2014/12/22-12/23, 東北大学電気通信研究所
 12. M. Razanoelina(他 4 名、4 番目)"Parallel Plate Waveguide Terahertz - Time Domain Spectroscopy performance for gold nanosheet characterization", Optical Terahertz Sciences and Technology conference, Catamaran Resort Hotel and spa, 2015/3/8-2015/3/13
 13. M. Razanoelina, R. Kinjo, I. Kawayama, H. Murakami, and M. Tonouchi, "Gold Ultrathin film for Terahertz antireflection coating", Optical Terahertz Sciences and Technology conference, Catamaran Resort Hotel and spa, 2015/3/8-2015/3/13
 14. R. Sourav,(他 4 名、4 番目) "Development of Time Domain Narrow Band Terahertz Wave Generation System", Optical Terahertz Sciences and Technology conference, Catamaran Resort Hotel and spa, 2015/3/8-2015/3/13
 15. R. Sourav, K. Serita, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi, "Narrowband Terahertz Time Domain Spectroscopy System for Characterization of Terahertz Devices", The 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience, OIST, Okinawa, Japan, 2015/7/1-2015/7-4
 16. M. Razanoelina(他 7 名、7 番目) "Characterization of Ultrathin Conductive Film by Terahertz Parallel Plate Waveguide", The 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience, OIST, Okinawa, Japan, 2015/7/1-2015/7-4
 17. M. Tonouchi, "Laser terahertz emission microscope", The 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience, OIST, Okinawa, Japan, 2015/7/1-2015/7-4
 18. M. Tonouchi, "Introduction to terahertz nanoscience", Nanotechnology congress & Expo, Fleming's Conference Hotel Frankfurt, Germany, 2015/8/11-2015/8/13
 19. M. Tonouchi, "Laser Terahertz Emission Microscope for Material Science", MRS Spring Meeting, San Francisco, 2015/4/6-2015/4/10
 20. M. Tonouchi, "Laser Terahertz Emission Microscope for Material Science and Industrial Applications", Shenzhen International Conference on Advanced Science and Technology 2015, Shenzhen, China, 2015/8/18-2015/8/22
 21. Masayoshi Tonouchi, "Laser Terahertz Emission Microscope And Its Application", IRMMW-THz2015, 香港, 2015/8/23-2015/8/28
 22. M. Razanoelina, I. Kawayama, H. Murakami, and M. Tonouchi, "Parallel Plate Waveguide Terahertz-Time Domain Spectroscopy for Ultrathin Metallic Films", East Asian Symposium on Superconductive Electronics 2015, Daejeon, Korea, 2015/11/4-2015/11/6
 23. M. Tonouchi, "Laser Terahertz Emission Microscope for Industrial Applications", Optics & Photonics Taiwan, the International Conference (OPTIC 2015), Taipei, Taiwan, 2015/12/4-2015/12/6
 24. 松田 栄輝、芹田 和則、岡田 航介、村上 博成、川山 巖、斗内 政吉, "テラヘルツ波集光メタマテリアルによる微量液体の評価", 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015/9/13-2015/9/16, 名古屋国際会議場
 25. 斗内政吉, "テラヘルツ波技術の概要", URSI-C 委員会 第 23 期 第 3 回公開研究会(東京), 42296, 日立製作所中央研究所
 26. 松田 栄輝、芹田 和則、岡田 航介、村上 博成、川山 巖、斗内政吉, "高密度テラヘルツ波励起メタマテリアルによる微量液体の測定", 電子情報通信学会 電子デバイス研究会 (ED), 2015/12/21-2015/12-22, 東北大学電気通信研究所片平北キャンパス
6. 研究組織
- (1)研究代表者
斗内 政吉 (TONOUCHI, Masayoshi)
大阪大学・レーザー・エレクトロニクス学研究センター・教授
研究者番号：40207593
 - (2)分担研究者
なし
 - (3)連携研究者
川山 巖 (KAWAYAMA, Iwao)
大阪大学・レーザー・エレクトロニクス学研究センター・准教授
研究者番号：10332264