

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390106

研究課題名(和文) フィードバック制御型テラヘルツ波計測システムの研究

研究課題名(英文) Terahertz-wave measurement system using feedback of electric signals

研究代表者

四方 潤一 (SHIKATA, Jun-ichi)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：50302237

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ技術研究において未検討のエレクトロニクス部分に着目し、光源から検出器までを一体の電子回路システムとして捉えるフィードバック制御を研究した。テラヘルツ波光源 - 検出器系に高感度検出のための電子回路系導入に不可欠なテラヘルツ波強度変調法を見出した。非線形光学効果を用いたテラヘルツ波発生 - 検出システムを用いて、最小検出パルスエネルギー 2aJ/pulse 、ダイナミックレンジ 110dB を達成した。

研究成果の概要(英文)：Feedback control of terahertz-wave generation and detection system was studied in terms of electronics. We found novel methods to introduce the feedback circuit in the terahertz-wave measurement system, based on the intensity modulation of terahertz waves. Using nonlinear optical effect for upconversion (stimulated Raman effect), terahertz-wave detection of minimum pulse energy of 2 aJ/pulse , therefore the dynamic range of 110 dB , was successfully achieved.

研究分野：テラヘルツ光学

キーワード：テラヘルツ波 高感度計測 フィードバック制御 電子回路

1. 研究開始当初の背景

微弱光計測を要する繊細な生体等の分光・イメージング計測において、低エネルギーで無害かつ分子識別能力をもつテラヘルツ波への期待は高い。テラヘルツ波は水を含む物質において吸収損失が大きいため、高感度なテラヘルツ波検出が求められるが、光波領域に比べて低感度な検出器しか利用できないことがボトルネックとなっている。

2. 研究の目的

本研究では、従来のテラヘルツ波発生・検出技術の研究において未検討の微弱検出信号に関するエレクトロニクス部分に着目し、テラヘルツ波光源から検出器まで一体の電子回路システムとして捉える観点からテラヘルツ波検出の高感度化を図る新規フィードバック制御の学理を究明し、将来の高度なテラヘルツ波計測応用に資する普遍的な指導原理を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、本研究グループが研究を行ってきた周波数可変テラヘルツ波光源とテラヘルツ波検出系を用いて、テラヘルツ波の検出感度を実験的に調査する。これに基づいて、フィードバック制御に必要な電子回路の設計・製作を行い、高感度検出に向けた実験的調査を行う。テラヘルツ波光源にはパルス動作テラヘルツ波光源と連続テラヘルツ波光源、検出器には常温検出器を使用し、フィードバック制御型テラヘルツ波計測システムの実現方法を明らかにする。これらを融合してテラヘルツ分光・イメージング実験を行い、テラヘルツ波の検出限界値や測定精度を調査する。以上を通じて本システムを用いたテラヘルツ波計測と動作機構の本質を理解する。

4. 研究成果

まずパルス動作のテラヘルツ波パラメトリック発生器については、結晶内の伝搬損失やフレネル反射損の影響を最小限にするため、非線形光学結晶に台形型のニオブ酸リチウム結晶を用い、内部一面で励起光(1064nm、590ps)と注入光(>1065nm、CW)を全反射させ、反射面に対して垂直方向にテラヘルツ波を発生させる光学実験系を構成した。発生したテラヘルツ波を常温のパイロ検出器(高感度)にて測定し、0.8~3.0THz領域のテラヘルツ波検出に成功し、最大で約30dBのダイナミックレンジを得た。ここで使用したパイロ検出器からの電圧出力を絶対出力として計測するため、本光源と校正済パイロ検出器(低感度)を用いて校正を行い、約0.5μW/Vであることを明らかにした。

一方、1500nm帯2波長励起光を用いた差周波テラヘルツ波光源から発生する連続テラヘルツ波について、常温パイロ検出器を用いた検出系における測定感度を調べた。その

際、光増幅器(EDFA)の励起光を外部制御信号(矩形波電圧)を用いて変調し、これによって2波長励起光を強度変調し、テラヘルツ波に消光比約20dBの強度変調をかけてロックイン検出を行った。その結果、0.1~1.5THz領域のテラヘルツ波検出に成功し、最大で約24dBのダイナミックレンジとなることを明らかにした(図1)。

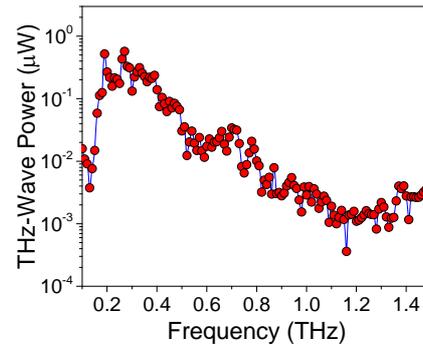


図1 連続テラヘルツ波出力の周波数特性

またテラヘルツ波パラメトリック光源の動作特性を明らかにするため、垂直放射型光学系において結晶長を連続パラメータ化できる点に着目し、テラヘルツ波出力の結晶長依存性を測定した。その結果、テラヘルツ波出力は閾値結晶長を超えると指数関数的に増大し、その閾値結晶長とパラメトリック利得係数がテラヘルツ波周波数に依存することを明らかにした。この実験系を用いて、吸収線幅の狭い気体試料である水蒸気の透過分光計測を行った結果、得られた吸収線の周波数はスペクトルデータベースとよく一致する精密な計測に成功した。

これらより、フィードバック制御型テラヘルツ波光学系の構築に不可欠なテラヘルツ波出力制御の方法として、テラヘルツ周波数の微小変化や結晶位置制御が有効であることを見出した。さらにテラヘルツ波強度の高速制御機構として光学ビームスキャナを用いたテラヘルツ波ビーム制御系を考案・構築し、検出系についても微弱信号増幅に関する電子回路製作を行った。これを透過像計測に応用して動作の安定性・高速応答性(最大1kHz)を実験的に確認した。

これらの結果に基づき、パルス動作テラヘルツ波パラメトリック発振器および連続テラヘルツ波光源についてファブリ・ペロー干渉計による波長計測を行い、0.1~1.5THz領域のテラヘルツ波長を0.5%以下の周波数精度で測定することに成功した(図2)。これらの周波数可変テラヘルツ波光源を用いてテラヘルツ分光計測およびテラヘルツイメージングの実験を行った。得られたテラヘルツ分光スペクトル(図3)からシステム動作の安定性を確認した。またテラヘルツイメージング(2次元透過像測定)では、回折理論から予想される微小な周波数変化に伴う空間分解能の変化を捉えることに成功した(図4)。

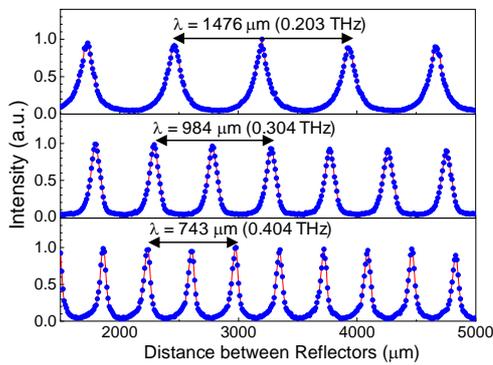


図2 ファブリ・ペロー干渉計によるテラヘルツ波長の測定結果

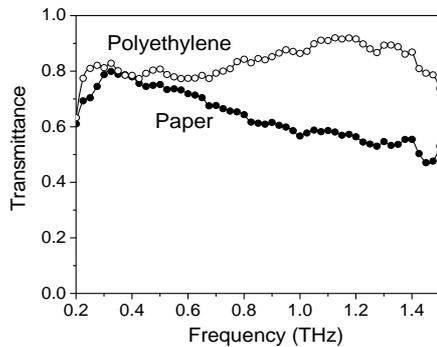


図3 周波数可変テラヘルツ波光源を用いたテラヘルツ分光測定結果

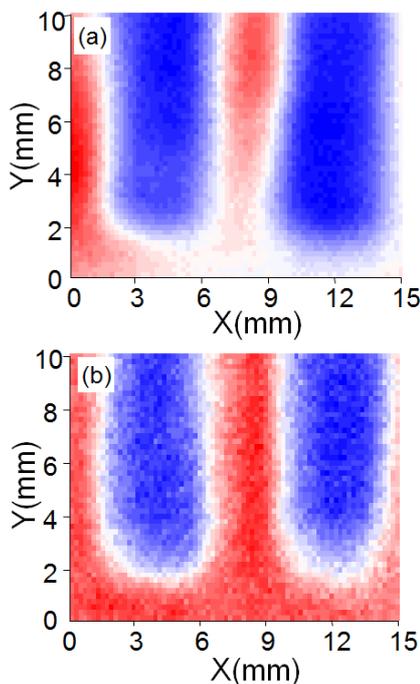


図4 参照試料(塩化銀テストパターン)テラヘルツイメージング測定結果 (a) 0.2 THzにおける透過像 (b) 0.3 THzにおける透過像

さらに超高感度化や感度可変制御が可能なテラヘルツ波の検出法として、非線形光学波長変換によるアップコンバージョン(誘導ラマン効果)を用いたテラヘルツ波検出を実験的に調査し、測定の高感度化に取り組んだ。

テラヘルツ波パルス出力をニオブ酸リチウム結晶に集光し、近赤外の励起光を用いたアップコンバージョンによってテラヘルツ波を近赤外光に波長変換した。励起エネルギー密度等の励起条件の最適化を行った結果、1.14THzにおいて110dBのダイナミックレンジおよび2 aJ/pulseの最小検出可能パルスエネルギーを達成し(図5)これまでの結果と比較して2桁程度の高感度化を実現した。

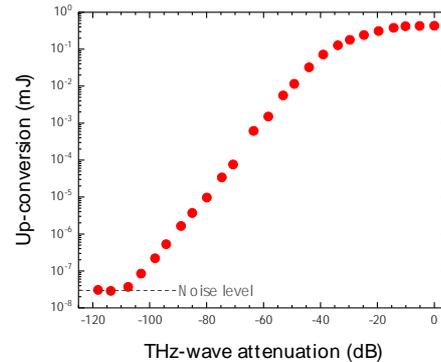


図5 アップコンバージョンを用いたテラヘルツ波検出における検出限界値の測定結果

以上より、フィードバック制御を用いたテラヘルツ波計測システムにおいてテラヘルツ波光学系・電子回路系の技術基盤に関する知見と超高感度テラヘルツ波計測応用への見通しを得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計7件)

1. Y. Takida, J. Shikata, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, M. Koyama, T. Notake, S. Hayashi, and H. Minamide, THz-wave parametric gain of stimulated polariton scattering, Phys. Rev. A, 査読有, Vol. 93, 2016, 043836-1-4, DOI: 10.1103/PhysRevA.93.043836
2. 林伸一郎、縄田耕二、瀧田佑馬、川瀬晃道、南出泰亜、テラヘルツ光パラメトリック光源の最先端、OPTRONICS、査読無、Vol. 405、2015、65-69、<http://www.optronics.co.jp/magazine/opt.php?year=2015&month=9>
3. H. Minamide, Development of High-Power Terahertz-Wave Sources for Finding Novel Applications, IEEE Trans. Terahertz Science Tech., 査読有, Vol. 5, 2015, 1104-1109, DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2491418
4. 瀧田佑馬、柴直孝、野竹孝志、縄田耕二、時実悠、林伸一郎、廣本宣久、南出泰亜、高出力テラヘルツ波パラメトリック光源を用いたパイロ検出器の感度較正法の確立に向けて、電気情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol. 114, 2014, 33-37、<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009977317>

5. 南出泰亜、高出力テラヘルツ波光源の最先端と広がる応用、電子情報通信学会誌、査読有、Vol. 97、2014、924-930、<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009890790>
 6. K. Murate, Y. Taira, S. R. Tripathi, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, and K. Kawase、A high dynamic range and spectrally flat terahertz spectrometer based on optical parametric processes in LiNbO₃、IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology、査読有、Vol. 3、2014、523-526、DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2326298
 7. S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, K. Kawase, and H. Minamide、Ultrabright continuously tunable terahertz-wave generation at room temperature、Scientific Reports、査読有、Vol. 4、2014、5045-1-6、DOI: 10.1038/srep05045
- [学会発表](計 73 件)
1. 南出泰亜、波長可変・高輝度テラヘルツ波に関する技術開発と将来発展、第 23 回 FEL と High-Power Radiation 研究会 と第 14 回高輝度・高周波電子銃研究会、2017 年 3 月 23 ~ 14 日、東北大学(宮城県仙台市)
 2. 四方潤一、芦間健太、石塚友彰、小玉貴大、通信波長帯光デバイスによる周波数可変連続テラヘルツ波発生、平成 28 年度日本表面科学会東北・北海道支部学術講演会、2017 年 3 月 9 日、秋田大学(秋田県秋田市)
 3. 南出泰亜、縄田耕二、瀧田佑馬、パワーレーザーによる高出力 THz 波の発生・検出とセキュリティ応用、レーザー学会第 37 回年次大会、2017 年 1 月 7 日、徳島大学(徳島県徳島市)
 4. H. Minamide、RIKEN Tera-photonics research and THz-wave metamaterial to real-time imaging、The 1st RIKEN-ERC Joint symposium & RIKEN Metamaterials Symposium 2016、2016 年 12 月 12 日、理化学研究所(埼玉県和光市)
 5. Y. Takida and H. Minamide、Nonlinear photonics for efficient terahertz-wave technology、5th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies、2016 年 11 月 2 日、東北大学(宮城県仙台市)
 6. 四方潤一、青山博紀、羽田悟、渡邊篤知、南出泰亜、パラメトリック発振による高出力周波数可変テラヘルツ波発生、2016 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、2016 年 9 月 21 日、北海道大学(北海道札幌市)
 7. H. Minamide、Development of Terahertz-wave technology based on nonlinear optical effect、The 37th PIERS、2016 年 8 月 8 ~ 11 日、Shanghai, China
 8. Y. Takida and H. Minamide、Terahertz-wave technology based on nonlinear optical effect and sub-nanosecond pulse laser、The 4th Laser Ignition Conference 2016、2016 年 5 月 20 日、パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
 9. H. Minamide、Sensitive THz-wave detection and imaging using nonlinear optical up-conversion、SPIE Defense + Commercial Sensing、2016 年 4 月 17 ~ 21 日、Baltimore, USA
 10. 瀧田佑馬、四方潤一、縄田耕二、時実悠、韓正利、小山美緒、野竹孝志、林伸一郎、南出泰亜、高出力 THz 波発生に向けた MgO:LiNbO₃ 結晶のパラメトリック利得の測定、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016 年 3 月 20 日、東京工業大学(東京都目黒区)
 11. K. Nawata, S. Hayashi, H. Ishizuki, K. Murate, K. Imayama, K. Kawase, T. Taira, and H. Minamide、Study of effective terahertz-wave parametric generation depending on pump duration、7th International Workshop on Terahertz Technology and Applications、2016 年 3 月 16 日、Kaiserslautern, Germany
 12. H. Minamide and K. Nawata、Frequency up-conversion using periodically poled LiNbO₃ for terahertz-wave detection、BIT's 2nd Annual World Congress of Smart Materials-2016、2016 年 3 月 4 日 ~ 6 日、Singapore, Singapore
 13. 林伸一郎、縄田耕二、川瀬晃道、南出泰亜、パラメトリック波長変換による高輝度テラヘルツ光の発生と検出、第 16 回「レーザー学会東京支部研究会」電気学会光・量子デバイス技術研究会、2016 年 3 月 4 日、東海大学(東京都港区)
 14. Y. Takida and H. Minamide、Nonlinear optical crystals for efficient terahertz-wave generation and detection、7th International Symposium on Optical Materials、2016 年 3 月 3 日、Lyon, France
 15. 南出泰亜、非破壊検査テラヘルツ波イメージングにおける波長変換技術、レーザー学会学術講演会 第 36 回年次大会、2016 年 1 月 11 日、名城大学(愛知県名古屋市)
 16. 林伸一郎、縄田耕二、瀧田佑馬、川瀬晃道、南出泰亜、光パラメトリック波長変換による高輝度サブテラヘルツ光の発生、レーザー学会学術講演会 第 36 回年次大会、2016 年 1 月 11 日、名城大学(愛知県名古屋市)
 17. 縄田耕二、林伸一郎、石月秀貴、村手宏輔、今山和樹、川瀬晃道、平等拓範、南出泰亜、パルス幅可変励起光源を用いた高出力テラヘルツ波光源、レーザー学会学術講演会 第 36 回年次大会、2016 年 1 月 9 日、名城大学(愛知県名古屋市)
 18. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase, and H.

- Minamide、 Ultrabright terahertz-wave generation based on parametric wavelength conversion、 EMN on Vacuum Electronics 2015、2015年11月21日～24日、Las Vegas, USA
19. K. Nawata and H. Minamide、 Sensitive Terahertz-wave Detection Using Optical Nonlinear Wavelength-conversion for Stand-off Sensing、 NATO ARW on THz Diagnostics of CBRN effects and Detection of Explosives & CBRN、 2015年11月3日～6日、 Izmir, Turkey
 20. H. Minamide、 Real-time Terahertz-wave Imaging Based on Nonlinear Optical Up-conversion、 Advanced Solid State Lasers、 2015年10月5日～8日、 Berlin, Germany
 21. 四方潤一、 テラヘルツ波の発生と表面波共鳴を用いた制御、 IEEE AP-S Tokyo Chapter ワークショップ、 2015年9月17日、 小山高専 (栃木県小山市)
 22. Y. Takida, J. Shikata, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, M. Koyama, T. Notake, S. Hayashi, and H. Minamide、 Gain Measurement of Stimulated Phonon-Polariton Scattering in MgO:LiNbO₃ for High-Peak-Power Terahertz-Wave Parametric Generation、 第76回応用物理学会秋季学術講演会、 2015年9月15日、 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市)
 23. 四方潤一、 齋藤大輔、 小林諒、 南出泰壱、 表面電磁波共鳴を用いたテラヘルツ波制御、 2015年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、 2015年9月9日、 東北大学 (宮城県仙台市)
 24. H. Minamide、 Bright terahertz-wave generation and real-time imaging using nonlinear optical effect、 The Second International Symposium on Frontiers in THz Technology、 2015年8月30日～9月2日、 アクトシティ浜松コンgresセンター (静岡県浜松市)
 25. S. Hayashi, K. Nawata, Y. Takida, K. Kawase, and H. Minamide、 Sub-terahertz-wave generation based on nonlinear wavelength-conversion in a MgO:LiNbO₃、 The Second International Symposium on Frontiers in THz Technology、 2015年8月30日～9月2日、 アクトシティ浜松コンgresセンター (静岡県浜松市)
 26. K. Nawata, T. Notake, H. Ishizuki, Y. Takida, Y. Tokizane, S. Hayashi, Z. Han, T. Taira, and H. Minamide、 Sum-frequency-generation based terahertz detection using a periodically poled lithium niobate、 IRMMW-THz 2015、 2015年8月24日、 Hong Kong, China
 27. Y. Takida, T. Notake, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, S. Hayashi, and H. Minamide、 Gain measurement of MgO:LiNbO₃ crystal in injection-seeded terahertz-wave parametric generation、 Nonlinear Optics、 2015年7月28日、 Kauai, USA
 28. H. Minamide、 Bright terahertz-wave generation using nonlinear optical conversion: Toward mega-watt peak intensity、 The 8th International Conference on Advanced Materials、 2015年7月7日～10日、 Bucharest, Romania
 29. H. Minamide、 Frequency up-conversion terahertz-wave detection and imaging using nonlinear optical effect、 MTSA2015 and TeraNano-6、 2015年6月30日～7月3日、 沖縄国際大学 (沖縄県宜野湾市)
 30. S. Hayashi and H. Minamide、 Ultrabright terahertz-wave generation using nonlinear wavelength conversion at room temperature、 The EMN Cancun Meeting 2015、 2015年6月8日～11日、 Cancun, Mexico
 31. H. Minamide、 Sensitive Terahertz-wave detection and imaging by nonlinear frequency upconversion、 The EMN Cancun Meeting 2015、 2015年6月8日～11日、 Cancun, Mexico
 32. Y. Takida, T. Notake, K. Nawata, Y. Tokizane, S. Hayashi, and H. Minamide、 kW-peak-power terahertz-wave parametric generation and 70 dB-dynamic-range detection based on efficient surface-coupling configuration、 Conference on Lasers and Electro-Optics、 2015年5月11日、 San Jose, USA
 33. H. Minamide、 Terahertz-wave real-time imaging by nonlinear wavelength-conversion into near-infrared light、 Advanced Lasers and Their Applications ALTA 2015、 2015年5月6日～9日、 Jeju, Korea
 34. K. Nawata, T. Notake, H. Ishizuki, Y. Takida, Y. Tokizane, S. Hayashi, T. Taira, and H. Minamide、 Effective photon conversion from THz to NIR in a slant-strip-type periodically poled LiNbO₃、 ALPS'15、 2015年4月24日、 パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)
 35. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase, and H. Minamide、 Experimental verification of terahertz-wave spectroscopic measurement based on nonlinear wavelength-conversion、 ALPS'15、 2015年4月24日、 パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)
 36. Y. Takida, T. Notake, K. Nawata, Y. Tokizane, S. Hayashi, and H. Minamide、 High-peak-power terahertz-wave parametric generation and highly-sensitive detection using surface-coupling configuration、 ALPS'15、 2015年4月23日、 パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)
 37. K. Nawata, S. Hayashi, and H. Minamide、 Nonlinear optical frequency up-conversion broadening terahertz horizons in sensitive detection、 SPIE DSS2015、 2015年4月23日、 Baltimore, USA
 38. 瀧田佑馬、 野竹孝志、 縄田耕二、 時実悠、 林伸一郎、 南出泰壱、 低損失な光学結合

- 方式によるテラヘルツ波パラメトリック発生および検出、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 12 日、東海大学（神奈川県平塚市）
39. 四方潤一、南出泰亜、林伸一郎、表面微細構造によるテラヘルツ電磁波の制御、平成 26 年度日本表面科学会東北・北海道支部学術講演会、2015 年 3 月 9 日、北海道大学（北海道札幌市）
40. 林伸一郎、縄田耕二、川瀬晃道、南出泰亜、非線形波長変換によるテラヘルツ分光システムの基礎特性、第 2 回理化学研究所 - 情報通信研究機構合同テラヘルツ研究交流会、2015 年 2 月 9 ~ 10 日、東北大学（宮城県仙台市）
41. H. Minamide, F. Qi, and S. Fan, Real-time terahertz-wave imaging using nonlinear up-conversion detection, The Fifth International Symposium on Terahertz Nanoscience, 2014 年 12 月 1 ~ 5 日、Martinique, France
42. K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, and H. Minamide, THz-wave parametric amplifier, The Fifth International Symposium on Terahertz Nanoscience, 2014 年 12 月 1 ~ 5 日、Martinique, France
43. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase, and H. Minamide, Terahertz parametric oscillator sources, Advanced Solid-State Lasers 2014, 2014 年 11 月 16 ~ 21 日、Shanghai, China
44. 南出泰亜、非線形光学波長変換による波長可変テラヘルツ光源と高感度検出、レーザー学会技術専門委員会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」, 2014 年 10 月 31 日 ~ 11 月 1 日、宮古島マリンターミナル（沖縄県宮古島市）
45. 林伸一郎、縄田耕二、川瀬晃道、南出泰亜、非線形光学波長変換によるテラヘルツ光のコヒーレント検出、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 19 日、北海道大学（北海道札幌市）
46. K. Murate, S. R. Tripathi, Y. Taira, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, and K. Kawase, A Terahertz Wave Parametric Amplifier With 55dB Gain, The 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2014 年 9 月 14 ~ 19 日、Tucson, USA
47. 四方潤一、表面波共鳴を用いたテラヘルツ波の発生・制御、IEEE MTT-S Kansai Chapter ワークショップ「電波領域へのプラズモニクスの拡張」, 2014 年 8 月 23 日、大阪大学（大阪府豊中市）
48. K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, and H. Minamide, THz parametric amplifier using LiNbO₃ crystal, OSA Optics and Photonics Congress on Advanced Photonics, 2014 年 7 月 27 ~ 31 日、Barcelona, Spain
49. 南出泰亜、マイクロチップレーザーによる高出力 THz 波発生、第 9 回レーザー学会「マイクロ固体フォトンクス」専門委員会、2014 年 6 月 26 日、分子科学研究所（愛知県岡崎市）
50. K. Murate, Y. Taira, S. R. Tripathi, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, and K. Kawase, Frequency tunable, high dynamic range THz spectrometer using parametric processes in Lithium Niobate crystal, Conference on Lasers and Electro-Optics 2014, 2014 年 6 月 8 ~ 13 日、San Jose, USA
51. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase, and H. Minamide, Coherent Monochromatic Terahertz-wave Pulse Detection using Nonlinear Parametric Conversion at Room Temperature, Conference on Lasers and Electro-Optics 2014, 2014 年 6 月 8 ~ 13 日、San Jose, USA
52. K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, and H. Minamide, Parametric generation and amplification of THz-waves, 5th workshop on Terahertz Science and Technology, 2014 年 6 月 6 ~ 10 日、Elba Island, Italy
53. Y. Takida, N. Shiba, N. Hiromoto, and H. Minamide, Wavelength-sensitive response of pyro-electric detectors by continuously-tunable terahertz-wave source, 4th EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology, 2014 年 5 月 11 ~ 14 日、Camogli, Italy
54. S. Hayashi, K. Nawata, K. Kawase, and H. Minamide, Ultrabright Tunable Terahertz-wave Pulse Generation exceeding Free-Electron Lasers, RAPAC RIKEN, 2014 年 5 月 3 ~ 4 日、理化学研究所（埼玉県和光市）
- 他 19 件
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Profiles/89/0008827/profile.html>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
四方 潤一 (SHIKATA, Jun-ichi)
日本大学・工学部・准教授
研究者番号：50302237
- (2) 研究分担者
南出 泰亜 (MINAMIDE, Hiroaki)
国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・チームリーダー
研究者番号：10322687