

令和元年6月12日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220606

研究課題名（和文）超高感度テラヘルツヘテロダインCTおよび分光イメージングの実現

研究課題名（英文）Highly sensitive terahertz heterodyne CT and spectroscopic imaging

研究代表者

川瀬 晃道（Kawase, Kodo）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：00296013

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 167,500,000円

研究成果の概要（和文）：我々は、出力50kW、ダイナミックレンジ10桁という優れた性能を有する光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムの開発に成功した。本研究では、この新方式の長所を活かした透過型テラヘルツ3D-CTおよび分光イメージングを実現し、製品内部の欠陥検査、厚手の郵便物内に隠された禁止薬物検出などを超高感度で実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々は2003年に世界初のテラヘルツ波を用いた分光イメージングシステムの開発を報告した。その報告で用いていたTPOはダイナミックレンジが4桁以下であり、薄手の封筒越しでのみ分光イメージングによる各試薬の識別が可能であった。今回の我々の研究によって、光注入型THz波パラメトリック発生及び検出を用いたテラヘルツ分光イメージングシステムの大幅な高出力化と高感度化に成功し、TPOよりも遙かに高い1100dBものダイナミックレンジを得ることができた。そのシステムを用いた分光イメージングシステムを構築し、分厚い遮蔽物越しでの試薬の識別に世界に先駆けて成功した。

研究成果の概要（英文）：We succeeded in developing an optical injection type terahertz parametric generation detection system with an excellent performance of 50 kW output and 10 orders of magnitude dynamic range. Here, we realized transmission terahertz 3D-CT and spectral imaging that take advantage of this new method. In addition, defect detection inside the product, prohibited drug detection hidden in heavy mail, etc. were realized with ultra-high sensitivity.

研究分野：テラヘルツ工学

キーワード：テラヘルツ波 分光 イメージング

1. 研究開始当初の背景

我々は最近、ダイナミックレンジ 10 桁 (SN 比 10 桁) という優れた性能を有する光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムの開発に成功した。さらにこのシステムの検出方式はコヒーレントなテラヘルツ波のみに感度を有するため、測定ターゲット中を直線的に透過した成分のみを計測し、散乱光は計測しないという、理想的な高精細イメージングが可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、この新方式の長所を活用した透過型 CT および分光イメージングを実現し、例えば、プラスチック製品やセラミクス製品内部の欠陥検査、厚手の郵便物内に隠された禁止薬物検出、製薬工場でのロットミス検出、などの社会的ニーズに応え得る非破壊検査システムを、超高感度で実現することを目的とする。

3. 研究の方法

研究期間内に明らかにする項目は、光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムを用いた超高感度テラヘルツ分光イメージングシステムの実現、光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムを用いた超高感度テラヘルツヘテロダイン CT システムの実現、光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムの 1THz 以下の低周波域への拡大、および上記システムの各種応用に対する実用性能評価および基盤技術の醸成、である。

項目は、理化学研究所が担当し、1THz 以下の領域における光注入型テラヘルツパラメトリック発生器の開発を目的としている。1THz 以下の帯域では、紙、ビニール、プラスチック、セラミクス、衣類、試薬、錠剤、など本研究で対象とする測定ターゲット中に含まれる様々な物質の透過率が高くなる。

4. 研究成果

我々は 2003 年に世界初のテラヘルツ波を用いた分光イメージングシステムの開発を報告した (Opt. Exp. 11, 2549)。その報告で用いていた THz Parametric Oscillator (TPO) はダイナミックレンジが 4 桁以下であり、薄手の封筒越しでのみ分光イメージングによる各試薬の識別が可能であった。今回の我々の研究によって、光注入型 THz 波パラメトリック発生及び検出を用いたテラヘルツ分光イメージングシステムの大幅な高出力化と高感度化に成功し、TPO よりも遙かに高い 100dB ものダイナミックレンジを得ることができた。そのシステムを用いた分光イメージングシステムを構築し、分厚い遮蔽物越しでの試薬の識別に世界に先駆けて成功した。

本研究で用いたサンプルは、マルトース、グルコース、フルクトースの 3 種類の試薬粉末をプラスチック製の袋 (10 × 10mm) に封入し、厚紙の EMS 封筒 2 枚、段ボール 2 枚、気泡緩衝材 4 枚で遮蔽した。このときのサンプルの厚さは約 23mm であり、2003 年の報告で用いた約 0.1mm の薄い封筒よりも格段に分厚い遮蔽となり、実用的にも十分である。次に、テラヘルツ波の周波数を 1.4~1.9THz の範囲で変化させ、12 枚のマルチスペクトル画像を測定し、予め測定した各試薬の指紋スペクトルを用いて、主成分分析法により、各試薬の空間分布と濃度の抽出に成功した。

他方、光注入型 THz 波パラメトリック発生検出システム (is-TPG) を用いて 3D-CT システムの構築及び、ソフトマテリアルのサンプルの CT 画像計測を行った。is-TPG により発生したテラヘルツ波を焦点距離 100 mm のレンズを用いてサンプルに集光し、透過光は検出用の LiNbO₃ 結晶で赤外光に変換し計測した。測定サンプルは Z 軸、X 軸、Y 軸の 3 軸をステージ制御し 3D-CT 画像を取得した。実際に目視では確認できないプラスチック製品内部の構造欠陥を、非破壊かつ非接触で検知することに成功した。

さらにテラヘルツ分光イメージングシステムの構築を行い、厚さ約 20mm の遮蔽物下の試薬の画像抽出に成功した。本システムのダイナミックレンジは最大で 8 桁程度であったが、実用性を考えるとさらなる高ダイナミックレンジが望ましい。また、波長可変光源ゆえに波長掃引をする必要があり、測定時間が長く、高速化が課題であった。

ダイナミックレンジ向上のためには、分光イメージングシステムの検出部のノイズ除去、及び高感度赤外光検出器の導入によりさらなる高感度化を得た。測定時間の問題に関しては、テラヘルツ波の多波長同時発振化により波長掃引の時間を不要とし、1 パルスでの分光を実現することにより測定時間の大幅な短縮を実現した。また、高感度赤外光検出器としてフォトリテクタを導入することで感度向上が得られ、ダイナミックレンジ 10 桁を実現し、さらに多波長発振化により測定時間を 1/10 程度まで短縮できた。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件 全て査読あり)

K. Murate, and K. Kawase, "Perspective: Terahertz wave parametric generator and its applications", *Journal of Applied Physics*, vol 124, issue 16, pp. 160901 (2018). DOI: 10.1063/1.5050079

K. Takeya, K. Okimura, K. Oota, K. Kawase, and H. Uchida, "Pump wavelength-independent broadband terahertz generation from a nonlinear optical crystal," *Optics Letters*, 43(17), 4100-4103 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.004100

H. Uchida, K. Oota, K. Okimura, K. Kawase, K. Takeya, "Single-Cycle Terahertz Pulse Generation from OH1 Crystal via Cherenkov Phase Matching," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 39(6), 509-513 (2018). DOI: 10.1007/s10762-018-0481-7

H. Uchida, R. Yamazaki, K. Oota, K. Okimura, T. Minami, K. Takeya, and K. Kawase "Organic Nonlinear Optical Single-Crystalline Thin Film Grown by Physical Vapor Deposition for Terahertz Generation", *Crystal Growth and Design*, 18(7), pp.4029-4036 (2018). DOI: 10.1021/acs.cgd.8b00388

K. Murate, S. Hayashi, K. Kawase, "Multiwavelength terahertz-wave parametric generator for one-pulse spectroscopy", *Applied Physics Express*, vol. 10, No. 3, pp. 032401 (2017). <https://doi.org/10.7567/APEX.10.032401>

K. Nawata, S. Hayashi, H. Ishizuki, K. Murate, K. Imayama, Y. Takida, V. Yahia, T. Taira, K. Kawase, H. Minamide, "Effective terahertz wave parametric generation depending on the pump pulse width using a LiNbO₃ crystal," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 617-620 (2017). DOI: 10.1109/TTHZ.2017.2725479

K. Takeya, T. Minami, H. Okano, S. R. Tripathi and K. Kawase, "Enhanced Cherenkov phase matching terahertz wave generation via a magnesium oxide doped lithium niobate ridged waveguide crystal," *APL Photonics* vol. 2, pp. 016102 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4968043>

K. Murate, S. Hayashi, K. Kawase "Expansion of the tuning range of injection-seeded terahertz-wave parametric generator up to 5 THz" *Applied Physics Express*, vol. 9, No. 8, pp. 082401 (2016). <https://doi.org/10.7567/APEX.9.082401>

S. Hayashi, K. Nawata, Y. Takaida, Y. Tokizane, K. Kawase, H. Minamide, "High-brightness continuously tunable sub-terahertz wave generation," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 858-861 (2016). DOI: 10.1109/TTHZ.2016.2611939)

K. Murate, M. Kato, and K. Kawase, "THz spectroscopic imaging of chemicals using is-TPG", *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol. 25, No. 03n04, pp.1640016, (2016).

M. Kato, S. R. Tripathi, K. Murate, K. Imayama and K. Kawase, "Non-destructive drug inspection in covering materials using a terahertz spectral imaging system with injection-seeded terahertz parametric generation and detection," *Optics Express*, 24(6), 6425-6432 (2016). <https://doi.org/10.1364/OE.24.006425>

S. Tripathi, Y. Sugiyama, K. Murate, K. Imayama, K. Kawase, "Terahertz wave three-dimensional computed tomography based on injection-seeded terahertz wave parametric emitter and detector," *Optics Express*, 24(6), 6433-6440 (2016). <https://doi.org/10.1364/OE.24.006433>

K. Murate, Y. Taira, S. R. Tripathi, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, 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*, Volume 3, Issue 4, pp. 523- 526 (2014). DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2326298

S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, K. Kawase, H. Minamide, "Ultrabright continuously tunable terahertz-wave generation at room temperature," *Scientific Reports*, Vol. 4, Article number 5045 (2014). <https://doi.org/10.1038/srep05045>

Y. Taira, S. R. Tripathi, K. Murate, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide and K. Kawase, "A terahertz wave parametric amplifier with a gain of 55dB" *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 4, No. 6, pp. 753-755, (2014). DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2355179

[学会発表](国際会議招待講演 計 26 件)

K. Kawase, K. Okimura, Y. Nishizawa, K. Takeya, "Film thickness determination using ultrashort terahertz pulses (**Invited**)," SPIE Photonics West 2017, Conference 10103 "Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter- waves technology and applications X", 10103-26, Moscone Center, San Francisco, USA (Jan. 28 - Feb. 2, 2017).

K. Kawase, K. Okimura, K. Takeya, "THz tomography using nonlinear optical effects (**Invited**)," Third International Workshop on THz Technology (IWOTT 2017), Salt Lake City, USA (Feb. 3-6, 2017).

K. Kawase, K. Murate, K. Takeya, "Nonlinear optical THz generations and applications (**Tutorial**)," The seventh international conference on Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2017), P.20, University College London, London, UK (April 2-7, 2017).

K. Kawase, K. Murate, "Injection-seeded THz parametric generator/amplifier (**Invited**)," CLEO Science & Innovations, SM1J5, San Jose Convention Center, San Jose, USA (May 14-19, 2017).

K. Kawase, K. Murate, "NDI using injection-seeded THz parametric generators (**Invited**)," Terahertz Science and Technology The Mansion Meeting, Vanderbilt Grace Hotel, Newport, USA (May 22-25, 2017).

K. Kawase, and K. Murate "Sensing of hidden drugs using is-TPG (**Invited**)" OSA Advanced Photonics Congress, SeTh1E.2, Astor Crowne Plaza, New Orleans, United States (July 24 - 27, 2017).

S. Yoneda, M. Kato, K. Murate, K. Kawase, "THz spectroscopic imaging of reagents hidden in a 56 dB attenuated cardboard box using is-TPG (**Keynote**)," The 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017), RB1.3, the Cancun International Convention Center, Cancun, Mexico (Aug. 27 - Sept. 1, 2017).

K. Kawase and K. Murate, "THz parametric source and its applications (**Invited**)," International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'17), ThB-III-5, Hanwha Resorts Haeundae Tivoli, Busan, Korea (Sept. 10-15, 2017).

K. Kawase, K. Murate, "THz spectroscopic imaging using optical parametric generator (**Invited**)," 7th Nano and Giga Forum (NGC/CTRP 2017), Tomsk, Russia (Sept. 18-22, 2017).

K. Kawase and K. Murate, "Injection-seeded THz parametric generator and its applications (**Invited**)," Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE 2017), Rensselaer Polytechnic Institute, Troy NY, USA (Oct. 1-5, 2017).

K. Kawase, K. Murate, M. Kato, "Generation and detection of THz waves using nonlinear optical devices and applications to spectroscopic sensing and imaging (**Invited**)," Spain-Japan workshop on Millimeter-wave and Terahertz, Universidad Carlos III de Madrid, Puerta de Toledo Campus, Madrid, Spain (Mar. 17-18, 2016).

K. Kawase, M. Kato, R. Yamazaki, K. Murate, "THz spectroscopic imaging of chemicals through thicker obstacles (**Invited**)" SPIE DCS Conference Terahertz Physics, Devices, and Systems X, #9856-2, Baltimore convention center, USA (April 17-21, 2016)

K. Kawase, M. Kato, K. Murate, "Non-destructive THz imaging of chemicals using is-TPG (**Invited**)" 5th EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2016), Hotel Palatinus, Pecs, Hungary (May 8-11, 2016).

K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, " THz spectrometer using is-TPG (**Invited**)," 10th Asia-Pacific Laser Symposium (APLS 2016), KAL Hotel, Jeju, Korea (May 10-14, 2016).

K. Kawase, M. Kato, K. Murate, "THz spectroscopic imaging of chemicals using is-TPG (**Invited**)," 5th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE TeraTech-2016), We2-1, Sakura Hall, Tohoku University, Japan (Oct. 31-Nov. 4, 2016).

K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, S.R. Tripathi, "Terahertz wave parametric amplifier (**Invited**)," The sixth international workshop on Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2015), The Catamaran Hotel, San Diego, USA (Mar. 8-13, 2015).

K. Kawase, K. Murate, K. Imayama, S. Hayashi, "THz-wave parametric amplifier using LiNbO₃ crystal (**Invited**)" SPIE DSS Conference on Terahertz Physics Devices and Systems (ST104), 9483-7, Baltimore, USA (April 20-25, 2015).

K. Kawase, R. Yamazaki, S. R. Tripathi, "THz non-destructive inspections include effluent gas filters (**Invited**)," T4A.1, Laser Ignition Conference (LIC 2015), Argonne National Laboratory, Argonne, USA (April 27-30, 2015).

K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, "Nonlinear optical THz-wave generation using LiNbO₃ (**Invited**)," The 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA2015/TeraNano VI), A2-8, Okinawa Institute of Science and Technology, Okinawa, Japan (June 30 - July 3, 2015).

K. Kawase, R. Yamazaki, K. Imayama, K. Murate, "Evolved injection seeded THz-wave spectrometer for mail inspection (**Keynote**)," The 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2015), M2C-1, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China (Aug. 23 - 28, 2015).

- ⑳ K. Kawase, K. Murate, M. Kato and S. Hayashi, "Injection seeded THz spectrometer for mail inspection (**Invited**) " JSAP-OSA Joint Symposia 2015, 15a-2E-1, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan (Sept. 13-16, 2015).
- ㉑ K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, H. Minamide "Parametric generation and amplification of THz-waves (**Invited**)," 5th workshop on Terahertz Science and Technology, Elba island, Italy (July 6-10, 2014).
- ㉒ K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, H. Minamide "THz parametric amplifier using LiNbO₃ crystal (**Invited**)," OSA Optics and Photonics Congress on Advanced Photonics (SENSORS), SeTh4B.2, Crowne Plaza Barcelona Fira Center, Barcelona, Spain (July 27-31, 2014).
- ㉓ K. Kawase, K. Murate, S. R. Tripathi, "Novel Techniques for THz-wave measurement (**Invited**)," Advances in Live Cell Thermal Imaging and Manipulation (ALSCTIM2014), OIST, Okinawa (Nov. 10-13, 2014).
- ㉔ S. Hayashi, K. Murate, K. Kawase "Terahertz parametric oscillator sources (**Invited**)," 2014 Advanced Solid-State Lasers (ASSL), AW2A.1, Hilton Shanghai Hongqiao, China (Nov. 16-21, 2014).
- ㉕ K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, H. Minamide "THz-wave parametric amplifier (**Invited**)," The Fifth International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano V), Hôtel La Batelière, Martinique, France. (Dec. 1-5, 2014).

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：林 伸一郎

ローマ字氏名：Shinichiro Hayashi

所属研究機関名：独立行政法人理化学研究所

部局名：光量子工学研究領域

職名：上級研究員

研究者番号（8桁）：70360188

研究分担者氏名：南出 泰垂

ローマ字氏名：Hiroaki Minamide

所属研究機関名：独立行政法人理化学研究所

部局名：テラヘルツ光源研究チーム

職名：チームリーダー

研究者番号（8桁）：10322687