

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03887

研究課題名(和文) ワンパルス高速テラヘルツ分光システムの開発

研究課題名(英文) Development of one-pulse high-speed terahertz spectroscopic system

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) 27,000,000円

研究成果の概要(和文)：郵便物に隠された禁止薬物や、薬局で手渡される処方薬を、開封することなくチェックできる技術は、我々が開発している光注入型テラヘルツ波(THz波)パラメトリック発生器(is-TPG)のみである。しかしながら、従来のis-TPG技術では、波長を掃引して分光するため、長い検査時間、およびパルス毎の出力ゆらぎが課題であった。本研究では、これまでの予備実験による成果を高いレベルで融合し、多波長を同時発生するワンパルス高速テラヘルツ分光システムを開発し、従前より期待されているリアルタイムでの郵便物検査や処方薬検査、および医薬錠剤・粉末の製造過程での全数検査等を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

is-TPGを用いたTHz分光器は、これまで不可能であった減衰が大きい厚手の遮蔽物内に隠された試薬の分光や、硬質プラスチック製品の3次元CTなども実現してきた。しかしながら、is-TPGは波長可変光源のため、ワンパルス毎に1波長しか出力できず、分光の際に波長を変える必要があり、測定時間が長くなる。また、パルス毎の出力ゆらぎによって測定値がばらつくため、多数パルスの平均化を要する。このため、実用上求められる高速なリアルタイム測定が困難であった。本研究ではそのような課題を克服し、実用性の優れたテラヘルツ分光システムを実現した。

研究成果の概要(英文)：The only technology that can check for banned drugs hidden in mail or prescription drugs handed to you at the pharmacy without opening the package is the optical injection-type THz-wave parametric generator (is-TPG) that we are developing. However, the conventional is-TPG technique has problems of long inspection time and pulse-by-pulse output fluctuation due to the wavelength-sweeping spectroscopy. In this study, we have developed a one-pulse high-speed terahertz spectroscopy system that simultaneously generates multiple wavelengths by integrating the results of previous preliminary experiments at a high level, enabling real-time inspection of mail and prescription drugs, and total inspection of pharmaceutical tablets and powders in the manufacturing process, which have been expected for some time.

研究分野：テラヘルツ工学

キーワード：テラヘルツ波 パラメトリック 非線形光学 分光

1. 研究開始当初の背景

電波と光波の中間に位置するテラヘルツ波は、電波の透過性と光波の取り回しやすさの両方の長を有し、かつ X 線とは異なり人体にも安全であるため種々の応用が期待されている。特に、テラヘルツ帯において試薬類が特徴的な吸収(指紋)スペクトルを有するため、郵便物に隠匿された禁止薬物検査や、薬局における処方箋ミス検査、あるいは粉薬の成分均一性検査などへの応用展開が待たれる。

しかし、現在の汎用テラヘルツ分光器の殆どが、時間領域分光法(THz-TDS)を利用しており、高周波域でダイナミックレンジが大きく低下することや、検出エリアが数十マイクロメートルと小さくテラヘルツ波の散乱・多重反射・屈折等の影響を受けやすいことから、上記検査応用には不向きであった。我々も、以前この短所を把握しないまま、税関から委託された郵便物内薬物の分光検出システム開発を THz-TDS を用いて試みたが、失敗に終わっている。

そこで我々は、独自光源である光注入型テラヘルツパラメトリック発生/検出システムを用い、汎用 THz-TDS とは一線を画する新たな分光システム開発を行い、厚い遮蔽物越しの試薬分光イメージング、およびリアルタイム測定実現を目指した。その際、実用化のハードルとなっていた測定スピードを大幅に改善すべく、ワンパルス分光の着想に至った。郵便物に隠された禁止薬物や、薬局で手渡される処方薬を、開封することなくチェックできる技術は、世界で唯一、我々が開発している光注入型テラヘルツ波(THz 波)パラメトリック発生器(is-TPG)のみである。テラヘルツ波以外のいかなる技術もそれを実現できておらず、また数あるテラヘルツ技術の中でも、我々の is-TPG のみが厚手の遮蔽物越しの分光検査を達成している。

しかしながら、従来の is-TPG 技術では、波長を掃引して分光するため、長い検査時間、およびパルス毎の出力ゆらぎが課題であった。我々は、世界に先駆けて多波長 is-TPG に成功し、さらに多波長テラヘルツ波を検出側で角度の異なる多波長近赤外光に変換して CCD カメラで撮像する手法で、ワンパルス高速分光への道を拓いた。本研究では、これらの予備実験による成果を高いレベルで融合し、数十波長を同時発生するワンパルス高速テラヘルツ分光システムを開発し、従来より期待されているリアルタイムでの郵便物検査や処方薬検査、および医薬錠剤・粉末の製造過程での全数検査等を本格的に実現するものである。

2. 研究の目的

ターゲットとなる試薬類が指紋スペクトルを有する点、および遮蔽物の透過性から見て、他の電磁周波数帯に較べて、遮蔽物越しの試薬検査にはテラヘルツ波が最適である。なぜなら、X 線領域は試薬識別が困難で、赤外域は殆どのターゲットが不透明であり、ミリ波マイクロ波領域は波長の回折限界により空間分解能が低く、実用的な検査などの分光イメージングに適さない上に、試薬類の指紋的なスペクトルも殆ど見られない。

テラヘルツ分光・イメージング応用に対するニーズは大きく、世界的にも重要課題であると認識されているにも関わらず未だ実用化されていないのは、過去の研究開発の殆どが THz-TDS を用いており、遮蔽物越しの測定が困難であったことによる。一方、我々は独自技術である is-TPG を発展させ、世界に類例を見ない分光イメージングシステムを実現し、厚い遮蔽物越しの試薬測定に世界で初めて成功した。

したがって、本研究ではまず、テラヘルツ分光/イメージングシステムを高いレベルで実現し、従来不可能であった、厚手の郵便物や小包等に隠された禁止薬物の検出や、病院や薬局で処方される薬の間違いを包装上から検出すること、などを可能にする。さらに多波長化を進め、ワンパルス高速分光技術および高安定化測定技術を確立する。これらの分光検査技術に対して、申請者らが共同研究を進めてきた多数の企業、郵便局、税関、警察研究所、製薬会社、病院、薬局などからの要請・期待は大きく、世界的にも重要な課題であることを確認しており、それらを解決し得る新たな技術を日本から発信する。

我々は非線形光学結晶 MgO:LiNbO₃ をマイクロチップ Nd:YAG レーザーで励起するテラヘルツ光源である光注入型 THz パラメトリック発生器(is-TPG: injection seeded THz Parametric Generator)の開発を進めてきた。is-TPG は、テーブルトップサイズでありながら自由電子レーザーを凌駕する 100 kW という極めて高いテラヘルツ波パルスを生じ、単一周波数発振かつ 0.4-5.0THz という広帯域周波数可変性を有する我々独自の技術である。また、発生の逆過程でテラヘルツ波検出も可能で、検出するテラヘルツ波を種光として MgO:LiNbO₃ 結晶内へ入射し、波長 1070nm 付近の近赤外光ビームに変換して近赤外検出器で測定する手法により、高感度検出を実現している。この高出力光源と高感度検出を組み合わせ、テラヘルツ分光システムを開発した。この is-TPG を用いた THz 分光器のダイナミックレンジは世界最高レベルの約 10 桁で、これまで不可能であった減衰が-60dB もある厚手の遮蔽物内に隠された試薬の分光や、減衰が-70dB もある硬質プラスチック製品の 3 次元 CT などを実現した。

しかしながら、is-TPG は波長可変光源のため、ワンパルス毎に 1 波長しか出力できず、分光の際に波長を変える必要があり、測定時間が長くかかる。また、パルス毎の出力ゆらぎによって測定値がばらつくため、多数パルスの平均化を要する。このため、実用上求められる高速リアルタイム測定が困難であったため、本研究ではこれらの課題解決を目的とする。

3. 研究の方法

まず本研究において is-TPG の 10 波長程度の多波長発生を目指す。テラヘルツ波帯の試薬の吸収線幅は 100GHz 以上あるため、10 波長で応用上重要な 1-2THz 帯をカバーすることで必要十分な周波数分解能が得られる。多波長発生により、波長可変が不要となり、測定時間が大幅に短縮される。また、1 パルスで分光するため出力ゆらぎを無視でき、多数パルスの平均化が不要になる。これらにより、励起レーザーの繰り返しレートでリアルタイムにワンパルス分光が可能となる。

励起光と種光(注入光)を MgO:LiNbO₃ 結晶に入射すると、注入光と同一波長の近赤外光(アイドラー光) および励起光とアイドラー光の差周波に相当する THz 波が、光パラメトリック相互作用により強力に発生する。この時、入射する注入光の波長と角度を、LiNbO₃ 結晶の角度位相整合条件を満たすように制御することで、広帯域波長可変性が得られる。5 台の外部共振器型半導体レーザー(LD)の出力を半導体光増幅器に入力し、回折格子を用いたアクロマティック光学系を介して MgO:LiNbO₃ 結晶に自動的に位相整合条件を満たす角度で入射し、5 波長同時発生を得る。

さらに、is-TPG の原理を用いたテラヘルツ波検出は発生の逆過程であり、テラヘルツ波を注入光(種光)とする光パラメトリック相互作用により、励起光とテラヘルツ波の差周波数に相当する近赤外検出光ビームを発生する。この発生検出システムは、テラヘルツ技術として世界最高のダイナミックレンジ 100dB を実現しているが、その際検出するテラヘルツ波の波長に応じて、角度位相整合条件に従って近赤外検出光ビームの発生角が変化するため、多波長テラヘルツ波の検出が CCD カメラを用いて可能となる。数種類の糖類をワンパルス分光計測した場合、それぞれの試薬の吸収スペクトルに一致した波長のテラヘルツ波の減衰を確認する。レーザーの繰り返し周波数で測定が行えるため、リアルタイムでの試薬識別を実現する。

4. 研究成果

従来の is-TPG 技術では、波長を掃引して分光するため、長い検査時間、およびパルス毎の出力ゆらぎが課題であったが、多波長同時発振の is-TPG 発生検出技術を確立し、CCD カメラで撮像検出する手法により、ワンパルス高速分光システムを実現した。そのために、多波長の近赤外光の種光を半導体レーザー技術により実現する必要があり、光増幅器内の四光波混合による多波長化を含め、レーザー企業およびカオスレーザーの専門家と共同開発を進めた。また、多波長のテラヘルツ波が同時に発振する際の光パラメトリック利得の奪い合いについても、発振原理に立ち返って慎重に解析した。

他方、検出感度の向上に関して、吸収ロスのある大きなサンプルを透過して -100dB 程度減衰した極微弱なテラヘルツ波でも検出可能とするアイデアの実験にも成功した。これまで、検出限界の主因は、雑音成分がパラメトリック利得により増幅されて、極微弱なテラヘルツ波の検出を邪魔していたことによる。検出側の MgO:LiNbO₃ 結晶を 3 個に増やし、間隔を 1m 程度離し、その間に 2 個のアイリスを配置した。1 個目の結晶から発生する近赤外検出光が 2 個目の結晶に到達する前に、距離とアイリスによって雑音成分を空間的に除去し、所望の近赤外検出光のみを 2 個目および 3 個目の結晶で増幅して検出する手法で、これにより 0.9 THz の極微弱テラヘルツ波の高感度検出および増幅に成功した。本研究においては、この基礎技術を完成させ、さらなる超高感度化を図った。

さらに、分光測定の高安定化を目指し、発生するテラヘルツ波をサンプル側と参照側の 2 ビームに分割して、CCD カメラの画像データ上で両者を除して校正を取る方式を導入した。サンプル透過光と同時に参照光を取得することで、高い安定性が得られることを実験的に確認した。また、パルス間のゆらぎだけでなく、長期的な出力変動も無視することが可能であることを実験的に確認した。

本システムにより分光はワンパルスで完了し、測定的大幅な高速化およびリアルタイム計測が期待される。また、多波長化した際に同手法を適用するためには、CCD カメラの撮像エリアに多波長ビームが収まりきらないという課題があったが、回折格子や結像光学系を導入することで解決した。開発した分光システムを用いて、遮蔽物越しの試薬の分光イメージングを行った。ダンボール・厚紙・気泡緩衝材・皮革などを重ねた厚い遮蔽物で数種の試薬を挟み、テラヘルツ光路中に挿入し、複数周波数で透過像を取得し、機械学習などを用いて各試薬を識別した結果、複雑かつ厚い遮蔽物越しでも、確実に分光イメージングができることを検証できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Sakai, K. Kawase, and K. Murate	4. 巻 45
2. 論文標題 Highly sensitive multi-stage terahertz parametric detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 3905-3908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.394975	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Takeya, T. Kamei, K. Kawase, and H. Uchida	4. 巻 45
2. 論文標題 Nonlinear optical process of second-order nonlinear optical susceptibility 133 in an organic nonlinear optical crystal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 5348-5351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.400235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Matsumura, K. Kawase, K. Takeya	4. 巻 7
2. 論文標題 Observation of sublimation of ice using terahertz spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 192083
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.192083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Mine, K. Kawase, K. Murate	4. 巻 60
2. 論文標題 High-power ASE-free fast wavelength-switchable external cavity diode laser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 1953-1957
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.416033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Mine, K. Kawase and K. Murate	4. 巻 46
2. 論文標題 Real-time wide dynamic range spectrometer using a rapidly wavelength-switchable terahertz parametric source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2618-2621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.423985	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 村手宏輔, 川瀬晃道	4. 巻 47
2. 論文標題 多波長テラヘルツパラメトリック発生器によるリアルタイム分光	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 11-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Uchida, C. Koyama, T. Takagi, P. Wang, T. Kamei, K. Kawase, K. Takeya	4. 巻 115
2. 論文標題 ,Antireflection coating on organic nonlinear optical crystals using soft materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 231107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5126462	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Mitsuhashi, K. Murate, S. Niijima, T. Horiuchi, and K. Kawase	4. 巻 28
2. 論文標題 Terahertz tag identifiable through shielding materials using machine learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 3517-3527
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.384195	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Murate, H. Sakai, and K. Kawase	4. 巻 10
2. 論文標題 Six billion-fold amplification via a two-stage terahertz parametric amplifier	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	6. 最初と最後の頁 200-203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TTHZ.2020.2964832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Takeya, Y. Ikegami, K. Matsumura, K. Kawase, H. Uchida	4. 巻 12
2. 論文標題 Optical evaluation of Cytop, an amorphous fluoropolymer, in the terahertz frequency across a wide temperature range	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 42004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab0716	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Murate, K. Kawase	4. 巻 124
2. 論文標題 Terahertz wave parametric generator and its applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 160901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5050079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Takeya, K. Okimura, K. Oota, K. Kawase, H. Uchida	4. 巻 43
2. 論文標題 Pump wavelength-independent broadband terahertz generation from a nonlinear optical crystal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 4100-4103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.43.004100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Uchida, K. Oota, K. Okimura, K. Kawase, K. Takeya	4. 巻 39
2. 論文標題 Single-Cycle Terahertz Pulse Generation from OH1 Crystal via Cherenkov Phase Matching	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 509-513
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-018-0481-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Uchida, R. Yamazaki, K. Oota, K. Okimura, T. Minami, K. Takeya, and K. Kawase	4. 巻 18
2. 論文標題 Organic Nonlinear Optical Single-Crystalline Thin Film Grown by Physical Vapor Deposition for Terahertz Generation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Crystal Growth and Design	6. 最初と最後の頁 4029-4036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.8b00388	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Nijijima, M. Shoyama, K. Murakami and Kodo Kawase	4. 巻 6
2. 論文標題 Evaluation of the sintering properties of pottery bodies using terahertz time-domain spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Asian Ceramic Societies	6. 最初と最後の頁 37-42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 21件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 K. Murate, K. Kawase
2. 発表標題 Injection-seeded THz parametric generator, detector, and application (Invited)
3. 学会等名 SPIE Optical Engineering + Applications 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Murate, K. Kawase
2. 発表標題 High-brightness THz source with wide tunability (Invited)
3. 学会等名 OSA High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村手宏輔, 川瀬晃道
2. 発表標題 高速測定に向けたテラヘルツパラメトリック光源の開発 (招待講演)
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端VII (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川瀬晃道, 村手宏輔
2. 発表標題 高感度テラヘルツ波パラメトリック検出および分光イメージングに関して (招待講演)
3. 学会等名 第20回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kawase and K. Murate
2. 発表標題 Injection-seeded THz parametric generator, detector, and applications (Invited)
3. 学会等名 Instruments Research and Development Establishment (IRDE), Diamond Jubilee Lecture Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kawase, K. Murate
2. 発表標題 Injection-seeded THz parametric generation and detection with 125dB dynamic range
3. 学会等名 The 3rd Fraunhofer Photonic Research Cooperation Workshop at Optics & Photonics International Exhibition 2021 (OPIE '21) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kawase, K. Murate
2. 発表標題 Detection of drugs using is-TPG system (Invited)
3. 学会等名 International Workshop onTHz Technology (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Murate, K. Kawase
2. 発表標題 One shot detection of drugs hidden in envelopes using multiwavelength is-TPG (Invited)
3. 学会等名 SPIE Conference SI106 Next-Generation Spectroscopic Technologies XII (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Murate, H. Sakai, Y. Guo, K. Kawase
2. 発表標題 Terahertz wave parametric amplification using LiNbO3 crystal pumped by the microchip Nd:YAG laser (Invited)
3. 学会等名 The 7th Laser Ignition and Giant-microphtonics Conference (LIC2019) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Murate, Y. Guo, H. Sakai, K. Kawase
2 . 発表標題 High gain Terahertz wave parametric amplifier using LiNbO3 crystal (Invited)
3 . 学会等名 The 7th Advanced Electromagnetics Symposium (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Murate, H. Sakai, Y. Guo, K. Kawase
2 . 発表標題 Low Noise And High Gain Terahertz Parametric Amplifier (keynote)
3 . 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Mitsuhashi, T. Horiuchi, K. Murate, K. Kawase
2 . 発表標題 Terahertz Tag Identifiable Through Shielding Material (keynote)
3 . 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Kawase, H. Sakai, K. Murate
2 . 発表標題 Highly Sensitive THz Detection using is-TPG (Invited)
3 . 学会等名 The 5th International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Kawase, H. Sakai, K. Murate
2 . 発表標題 Ultra-sensitive THz parametric detection (Invited)
3 . 学会等名 International Conference on Optics and Optoelectronics (ICOL-2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Murate, H. Sakai, K. Kawase
2 . 発表標題 Extremely weak terahertz wave amplification using terahertz parametric amplifier (invited)
3 . 学会等名 The 11st Asian Symposium on Intense Laser Science (ASILS11) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Kawase, and K. Murate
2 . 発表標題 The applications of terahertz parametric sources (Invited)
3 . 学会等名 The 9th International Symposium on Ultrafast Phenomena and Terahertz Waves (ISUPTW2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Kawase, Y. Guo, K. Maeda, and K. Murate
2 . 発表標題 THz spectrometer using injection-seeded parametric generator (Invited)
3 . 学会等名 11th Asia-Pacific Laser Symposium (APLS 2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Murate, K. Maeda, Y. Guo and K. Kawase
2 . 発表標題 Multi wavelength injection-seeded THz parametric generator (Invited)
3 . 学会等名 The 6th Advanced Electromagnetics Symposium (AES 2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Kawase, Y. Guo, K. Maeda and K. Murate
2 . 発表標題 Multi wavelength THz source for one-pulse spectroscopy (Invited)
3 . 学会等名 7th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE Tera-Tech 2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Kawase, K. Murate
2 . 発表標題 Multi wavelength is-TPG for one-shot spectroscopy (Plenary)
3 . 学会等名 International Conference on Microwave & THz Technologies, and Wireless Communications (IRPhE 2018), TH-6, Arthurs Aghveran Resort, Aghveran, Armenia (Sept. 19-21, 2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Murate, and K. Kawase
2 . 発表標題 Multi wavelength injection-seeded THz parametric system (Invited)
3 . 学会等名 3rd International Conference on Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA 2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------