

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01908

研究課題名（和文）光ヘテロダインによるテラヘルツ光リアルタイムスペクトラム計測可視化システム

研究課題名（英文）Real-time spectroscopic measurement system for the terahertz wave visualized by optical heterodyne

研究代表者

林 伸一郎（Shin'ichiro, Hayashi）

国立研究開発法人情報通信研究機構・テラヘルツ研究センターテラヘルツ連携研究室・主任研究員

研究者番号：70360188

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：光ヘテロダイン（「テラヘルツ光」「通信帯近赤外光」（可視化））検出による、リアルタイム可視化可能なテラヘルツ帯スペクトル測定システムの提案および構築を行った。周波数基準となり得る分子の吸収線に安定化可能な近赤外種光源を導入し、「テラヘルツ光」との波長変換のための基準となる「高精度近赤外光」の高輝度化を実現した。これらの成果を論文、国内/国際会議等において報告した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ光無線通信が得意とする長距離伝送を、光通信波長帯に波長変換することにより光ファイバーネットワークを通じて実現するための基盤技術となり得る成果であり、変換後は不可視領域であるテラヘルツ帯を可視化することも容易である。加えて、既に発展した光制御技術に基づいたテラヘルツ光周波数制御手法に関する提案を行った。これらの成果は、テラヘルツ光を利用した広範囲にわたる領域、分子物理学など基礎科学の発展においても、無線通信・非破壊検査など工業利用においても重要な結果であると考えている。

研究成果の概要（英文）：We propose and demonstrate a real-time spectroscopic measurement system for the terahertz wave visualized by optical heterodyne using wavelength conversion between infrared and terahertz-waves based on nonlinear optics. As a stabilized pumping beam, we enhanced the brightness of 1.5  $\mu\text{m}$  beam generated by Nd:YAG MOPA system based molecular gas stabilized injection-seeded PPLN-OPG and KTA-OPA for terahertz-wave parametric wavelength conversion. Wavelength conversion techniques with frequency stabilized infrared beams allow the spectra in the terahertz region to be determine their frequency as traceable to the national standard. The results reported at papers, and domestic and international conferences.

研究分野：非線形光学

キーワード：テラヘルツ光 非線形光学 波長変換

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ帯域の電磁波には、近年注目を集めている超高速無線通信や多光子吸収を利用した放射性同位体分離など、他の帯域にはない独創的な用途があり魅力的であるため、国家標準に追跡可能な確度の高い計測法の確立が強く望まれている。しかしながら、その発生や検出の難しさから長年に渡り計測技術の進展が滞っており、周波数標準・出力標準ともに未だ確立していない。本研究課題において、テラヘルツ帯域の電磁波のスペクトラム情報を光のスペクトラム情報に転写することによって、国家標準に追跡可能な確度の高い計測法を実現するとともに可視化による直感的な観測システムを提案し、同帯域ならではの特性を生かした応用利用への展開を鑑みつつテラヘルツ帯域における計測標準技術の確立を目指す。

### 2. 研究の目的

本研究課題において、「テラヘルツ帯域における国家標準に追跡可能なスペクトラム計測」の「リアルタイム」かつ「可視化」による実現を目指し、「非線形光学結晶を利用した波長変換」に基づいて「テラヘルツ光」「近赤外光」「可視光」間を自在に波長変換することによって、「テラヘルツ光」のスペクトラム情報を国家標準に追跡可能な「光」のスペクトラム情報に変換し、「リアルタイム」かつ「可視化」により直感的に観測できる高確度なテラヘルツ光スペクトラムのリアルタイム計測システムの構築を目指す。確立された従来技術である、マイクロ波との干渉を利用したヘテロダイン検出に基づくスペクトル計測とは異なり、テラヘルツ帯域のスペクトル情報を光領域に波長変換により転写し計測する「光ヘテロダイン検出」手法を提案する。

### 3. 研究の方法

本研究では、国家標準に追跡可能なテラヘルツ帯スペクトラムのリアルタイム計測の実現に向けて、要素基盤技術の立ち上げを行う。図1に、本研究により構築している実験装置概要を示す。励起光源 (Nd:YAG MOPA)、周波数安定化基準光発生源 (is-PPLN-OPG)、周波数安定化基準光増幅器 (is-KTA-OPA) およびヘテロダイン検出部 (is-TPG) からなる。テラヘルツ光発生・検出システムに国家標準信号を参照信号として用いることで、転写した光のスペクトラム情報を正確に計測し、高確度・高分解能・高速・広ダイナミックレンジ・広帯域・高感度テラヘルツ分光システムを構築し、テラヘルツ帯における国家計量標準を見据えた周波数及び電力の絶対値計測手法を検討するとともに、周波数情報を位置情報に変換し観測する実時間テラヘルツ光スペクトル可視化観測システムを構築し、応用研究展開のため直感的に観測できるテラヘルツ帯スペクトラム観測システムの実現を目指す。

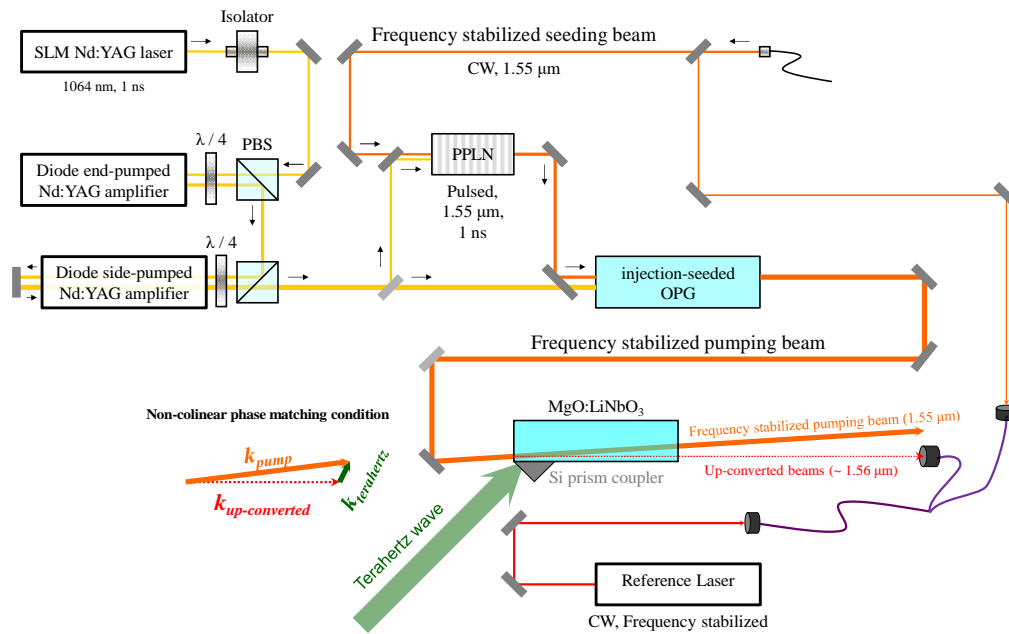


図 1 実験装置概要

#### 4. 研究成果

「テラヘルツ光」の光ヘテロダイン(光領域への上方周波数変換)計測のための基準となる「高確度・高輝度近赤外光源」として、光領域の周波数基準である気体分子固有の吸収スペクトルに安定化可能な近赤外種光源を導入し、非線形光学効果を利用した光パラメトリック発生(is-PPLN-OPG)・増幅(KTA-OPA)を用い、測定対象である外部信号に同期可能な高確度・高輝度基準近赤外光源を設計・作製した。図2に、is-PPLN-OPG 出力の励起エネルギー依存性を示す。注入光(波長:1539 nm)出力が7 mW のとき、励起エネルギー(波長:1064 nm)が増加するにつれて周波数安定化された出力光(波長:1539 nm)のエネルギーも単調に増加する様子が観測された。最高出力は、励起光エネルギーが約0.7mJ/pulse のとき、約80 uJ/pulse であった。これはピーク出力約120 kW に相当する。図3に、is-KTA-OPA 出力の励起光エネルギー依存性を示す。注入光(波長:1539 nm)出力が約40 uJ/pulse(ピーク出力約60 kW)のとき、励起エネルギー(波長:1064 nm)が増加するにつれて周波数安定化された出力光(波長:1539 nm)が増幅され、エネルギーが単調に増加する様子が観測された。最高出力は、励起光エネルギーが約1.6 mJ/pulse のとき、約0.34 mJ/pulse であった。これはピーク出力約0.51 MW に相当する。こちらの場合、図1のis-PPLN-OPGで見られたような飽和の影響は見られないため、より高強度で励起することによりさらなる高輝度化が見込まれる。

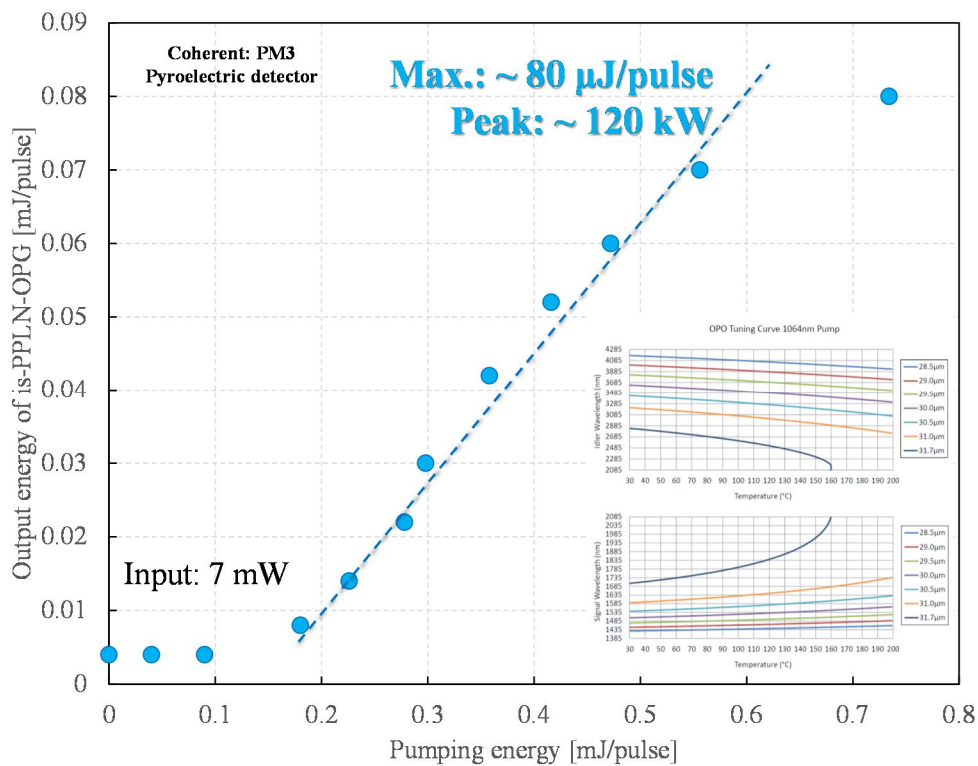


図2 周波数安定化基準光源出力の励起光エネルギー依存性

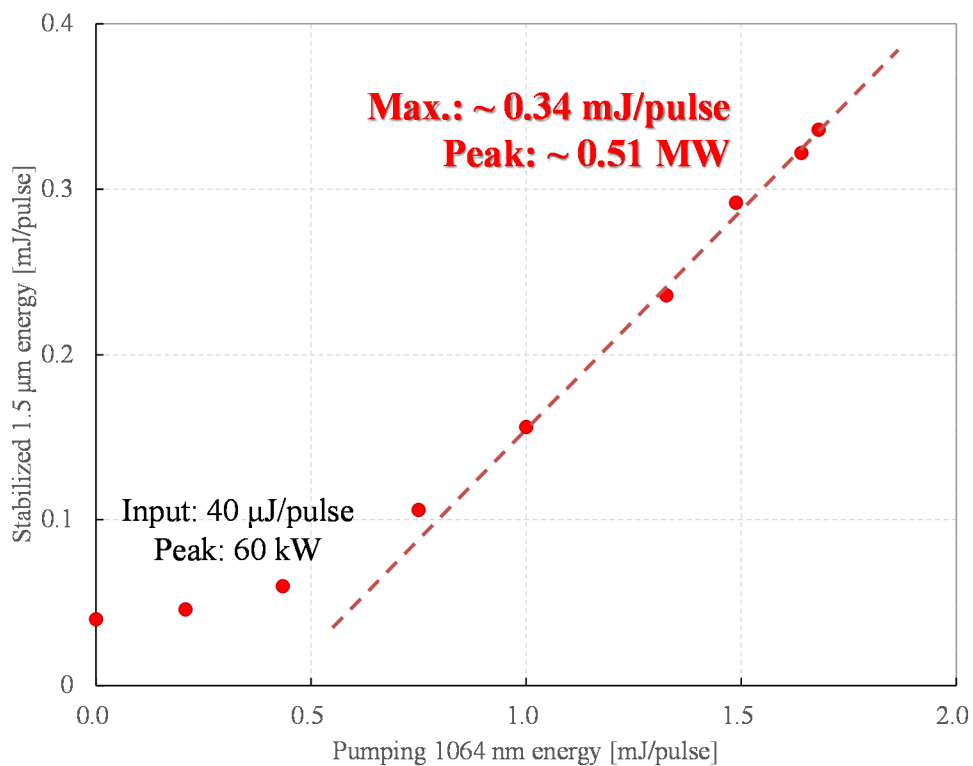


図3 周波数安定化基準光増幅器出力の励起光エネルギー依存性。

この「周波数安定化基準光」と「テラヘルツ光」を非線形光学結晶により上方変換し、テラヘルツ帯スペクトル情報を近赤外帯スペクトル情報に変換・計測する高確度なテラヘルツ帯スペクトル計測および標準化に関する手法を提案した。この手法は、テラヘルツ光無線通信が不得意とする長距離伝送を、光通信波長帯に変換することにより光ファイバーネットワークを通じて実現できるばかりでなく、不可視領域であるテラヘルツ帯を可視化することも容易である。加えて、光ヘテロダインにより変換したテラヘルツ光のスペクトル情報を持つ光を計測し、テラヘルツ光周波数制御機構に帰還するテラヘルツ光周波数制御手法に関する提案を行い、これらの成果を国際会議等において報告した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kawaguchi Rie, Hayashi Shin' ichiro, Kawase Kodo, Murate Kosuke	4. 巻 なし
2. 論文標題 Terahertz parametric generation with pulse train pump beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 OSA Technical Digest of the Frontiers in Optics / Laser Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/FIO.2020.FW7F.6	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 Ohno Seigo, Miyamoto Katsuhiko, Hayashi Shin' ichiro, Sekine Norihiko	4. 巻 28
2. 論文標題 Zero-spindle spectral drill: real-time spectral measurement in a fixed Fabry-Pérot cavity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 22088 - 22088
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.397238	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hayashi Shin' ichiro, Urata Yoshiharu, Ohno Seigo, Miyamoto Katsuhiko, Sekine Norihiko	4. 巻 なし
2. 論文標題 Continuously Tunable NIR Pulsed Parametric Sources by an Is-OPG / OPA for Terahertz-wave Generation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 OSA Technical Digest of the 14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020)	6. 最初と最後の頁 3 - 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/CLEOPR.2020.P3_6	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 Hayashi Shin' ichiro, Urata Yoshiharu, Ohno Seigo, Miyamoto Katsuhiko, Sekine Norihiko	4. 巻 なし
2. 論文標題 Continuously Tunable Terahertz-wave Parametric Source based on Spectral Drill Cavity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370657	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 Shin' ichiro Hayashi, Seigo Ohno, Katsuhiko Miyamoto, Yoshiharu Urata, and Norihiko Sekine	4. 巻 なし
2. 論文標題 Spectroscopic Measurement of Terahertz-wave based on Nonlinear Optics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 URSI GASS 2020	6. 最初と最後の頁 -
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 Kawaguchi Rie, Kawase Kodo, Hayashi Shinichiro, Murate Kosuke	4. 巻 なし
2. 論文標題 Real-time terahertz wave spectrometer using pulse train	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370532	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 Hayashi Shin'ichiro, Saito Shingo, Sekine Norihiko	4. 巻 なし
2. 論文標題 Optical Heterodyne Detection in the Terahertz Region for Accurate Frequency Measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874117	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 Shin' ichiro HAYASHI, Seigo OHNO, and Norihiko SEKINE	4. 巻 なし
2. 論文標題 Wavelength Conversion between Terahertz wave and Infrared for frequency measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 3rd PEM International Workshop in Ise (PEM2019)	6. 最初と最後の頁 -
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 Hayashi Shin'ichiro, Uzawa Yoshinori	4. 巻 1
2. 論文標題 Terahertz wave Heterodyne Detection based on Parametric Up-conversion at Room Temperature	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)	6. 最初と最後の頁 Th-POS-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510422	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 Saito Shingo, Hayashi Shin'ichiro, Uzawa Yoshinori, Sekine Norihiko, Nawata Kouji, Minamide Hiroaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Real-time Detection of Terahertz wave from Quantum Cascade Laser by Frequency Up-conversion in a Nonlinear Crystal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)	6. 最初と最後の頁 Th-POS-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510343	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14件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 大野誠吾, 宮本克彦, 林伸一郎, 関根徳彦
2. 発表標題 機械動作を排したスペクトルドリル
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40 回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林伸一郎
2. 発表標題 波長変換によるテラヘルツ光計測
3. 学会等名 理研仙台セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Shin'ichiro Hayashi and Norihiko Sekine
2. 発表標題 Bi-directional terahertz wave parametric wavelength conversion (invited)
3. 学会等名 GSELOP2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 143.Seigo Ohno, Katsuhiko Miyamoto, Shin' ichiro Hayashi and Norihiko Sekine
2. 発表標題 High speed measurement in spectral drill using q-plate and camera
3. 学会等名 the 8th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS 2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shin' ichiro Hayashi, Shingo Saito, and Norihiko Sekine
2. 発表標題 Optical heterodyne detection based on parametric upconversion in the terahertz region at room temperature
3. 学会等名 Photonics West (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Hayashi, S. Saito, N. Sekine
2. 発表標題 Bidirectional Wavelength Conversion between Infrared and Terahertz Wave in Nonlinear Crystal (invited)
3. 学会等名 2nd International Congress on Photonics Research (Interphotonics2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shin' ichiro Hayashi, Shingo Saito, and Norihiko Sekine
2. 発表標題 Optical Heterodyne Detection in the Terahertz Region for Accurate Frequency Measurement
3. 学会等名 IRMMW-THz2019 ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shin' ichiro Hayashi and Norihiko Sekine
2. 発表標題 Optical heterodyne detection of quasi-CW terahertz-wave from THz-QCL
3. 学会等名 2019 Infrared Terahertz Quantum Workshop (ITQW 2019) ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shin' ichiro HAYASHI, Seigo OHNO, and Norihiko SEKINE
2. 発表標題 Wavelength Conversion between Terahertz wave and Infrared for frequency measurement
3. 学会等名 3rd PEM International Workshop in Ise (PEM2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shin' ichiro Hayashi, Yoshinori Uzawa, and Norihiko Sekine
2. 発表標題 Bidirectional and efficient conversion between terahertz-wave and infrared in MgO:LiNbO3 (invited)
3. 学会等名 EMN Summer 2018 (Photonics/Optoelectronics) ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin'ichiro Hayashi and Yoshinori Uzawa
2. 発表標題 Terahertz Wave Heterodyne Detection Based On Parametric Up-conversion At Room Temperature
3. 学会等名 IRMMW-THz 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shingo Saito, Kouji Nawata, Shin'ichiro Hayashi, and Yoshinori Uzawa
2. 発表標題 Real-time Detection Of Terahertz Wave From Quantum Cascade Laser By Frequency Upconversion In A Nonlinear Crystal
3. 学会等名 IRMMW-THz 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林 伸一郎, 齋藤 伸吾, 関根 徳彦
2. 発表標題 光ヘテロダイン検出によるテラヘルツ帯スペクトラム計測
3. 学会等名 電子回路研究会・周波数計測による多方面精密計測
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin'ichiro Hayashi, Shingo Saito, Norihiko Sekine
2. 発表標題 Optical heterodyne detection based on parametric upconversion in the terahertz region at room temperature
3. 学会等名 Photonics West 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Shin'ichiro Hayashi and Norihiko Sekine	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Intech Open	5. 総ページ数 -
3. 書名 Optical heterodyne terahertz wave measurement	

〔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
---------	---------