

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05286

研究課題名(和文) 二重共鳴型テラヘルツ波共振器を用いた超高解像3次元テラヘルツイメージングの研究

研究課題名(英文) Super-resolution three-dimensional terahertz imaging using doubly resonant terahertz-wave resonators

研究代表者

四方 潤一 (SHIKATA, Jun-ichi)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：50302237

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ波共振器と光コヒーレンス・トモグラフィー(THz-OCT)に着目した超解像3次元イメージングを研究した。表面プラズモン共振器においては、自己補対型対数周期の導入により連続広帯域動作が実現できることを見出した。二重共鳴型テラヘルツ波共振器においては、多モードのファブリ・ペロー共振に基づく透過増強を明らかにした。さらに周波数可変テラヘルツ波パラメトリック光源を用いた周波数ドメインTHz-OCTにより、干渉波形と位置情報の取得に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面プラズモン共鳴型のテラヘルツ波共振器は従来単一デバイスでは単一周波数動作であったが、本課題において自己補対型対数周期アンテナの原理を導入し、連続広帯域動作が可能であることを明らかにした。このテラヘルツ帯プラズモニクスに関わる新しい学理は、次世代通信における広帯域テラヘルツ波処理回路にも適用できる社会的意義を有する。また、テラヘルツ波を用いた周波数ドメインOCTの実現は、高輝度な周波数可変テラヘルツ波光源の応用分野として3次元計測の分野を開拓する学術的意義をもつ。

研究成果の概要(英文)：Super-resolution three-dimensional terahertz imaging was studied using terahertz-wave resonators and optical coherence tomography (THz-OCT). We found continuous, broad-band operations of surface-plasmon resonators by introducing self-complementary log-periodic structures. We also found enhanced transmissions of doubly-resonant THz-wave resonators based on multimode Fabry-Perot resonances. Furthermore, we successfully obtained interferograms and their depth information by frequency-domain THz-OCT using a tunable THz-wave parametric source.

研究分野：テラヘルツ光学

キーワード：テラヘルツ波 表面プラズモン共振器 二重共鳴構造 超解像 イメージング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光波と電波の中間域にあるテラヘルツ波は、半導体、有機・生体物質等に対して透過性が高く、測定対象にダメージを与えない低エネルギーの電磁波である。近年超短光パルスレーザーを用いた時間分解テラヘルツ分光法が開発され、半導体キャリア等のテラヘルツ分光・イメージング、断層画像計測等へと発展している。この特異なテラヘルツイメージングに対する関心は高いが、回折限界のため空間分解能は波長サイズ程度となる。回折限界を超える高解像度化には近接場プローブ等を用いる方法があるが、試料表面の2次元計測に留まっている。

### 2. 研究の目的

テラヘルツイメージングにおいてテラヘルツ波ビームを極微細にすると小出力となり、さらに極微細径の長距離保持も難しいことが、3次元イメージングにおける課題であると考えられる。そこで本研究では、数波長以上の長距離で極微細径を保つテラヘルツ波を放射する表面プラズモン共振器に着目し、この共振器デバイスを高出力で単色性に優れた周波数可変テラヘルツ波光源で励起するとともに、透過増強のためにファブリ・ペロー共振を用いた二重共鳴構造を構成することにより、高出力かつ極微細のテラヘルツ波ビームを創成して測定試料への深部到達を図り、3次元の超高解像テラヘルツイメージングへと応用することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 本課題で着目するテラヘルツ帯表面プラズモン共振器 (THz bull's eye: THz-BE) を3次元イメージング手法 (THz optical coherence tomography: THz-OCT) と組み合わせるためには、THz-BE の動作周波数を広帯域化する必要がある。そこで広帯域動作を実現する新たな THz-BE 構造をテラヘルツ電磁場解析により調査し、その設計を明らかにする。また、二重共鳴構造における外部反射鏡の反射率や実験配置とテラヘルツ波の共振状態の関係を明らかにする。

(2) テラヘルツ電磁場解析で得られた知見をもとに、微細加工設備を利用して THz-BE デバイスを試作する。その作製法として、THz 帯で透過性に優れた高比抵抗のシリコン基板の上にレジスト材料を用いて凹凸構造を形成し、最終的に金属薄膜を付す方法を主に調査する。また、THz-OCT の測定試料である微細構造を有する半導体デバイスを作製し、加工精度や動作に関わる諸特性を評価する。

(3) 周波数可変テラヘルツ波光源とテラヘルツ波検出器を用いてマイケルソン干渉計を構成し、周波数掃引型 THz-OCT の動作実験を行う。さらに THz-BE の透過実験を行い、テラヘルツ光学系の測定感度を評価する。これらの光学系と二重共鳴構造を総合して所望の実験系を構成し、半導体デバイス試料のイメージング実験を行う。

### 4. 研究成果

(1) 本課題遂行の鍵となる THz-BE の広帯域動作設計を明らかにするため、有限要素法を用いたテラヘルツ電磁場の数値解析による調査を行った。まず THz-BE の多周波動作のため、異なる周期の回折格子を対角上に付与した構造を解析した結果、図 1(a)に示すようにテラヘルツ波の偏波回転により動作周波数を 1.5THz と 1.9THz の間で切替られることを見出し、さらに図 1(b)~(e) に示すように局所電磁場の集中による微細テラヘルツ波ビームの放射も起こることを明らかにした。

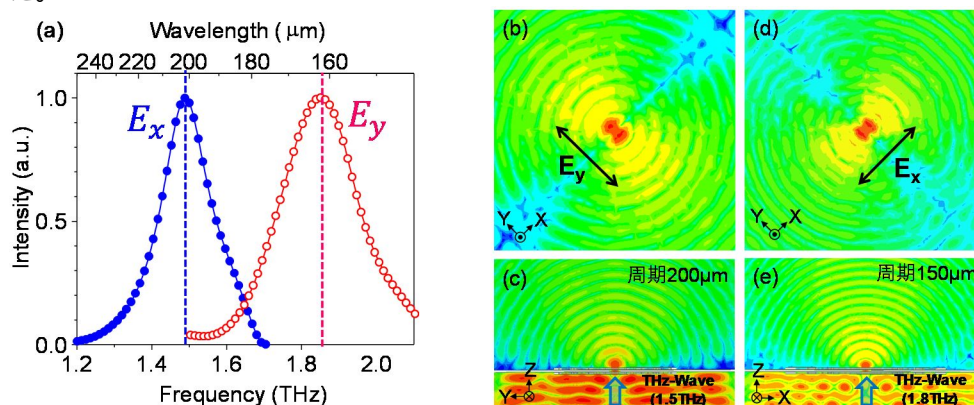


図 1 多周期 THz-BE の動作特性 (a) 偏波切替に応じた透過スペクトルの変化 (b), (c)  $E_y$  励振時、(d), (e)  $E_x$  励振時の表面電磁波共鳴と放射パターン

(2) 連続的な広帯域動作を実現するため、自己補対型の対数周期回折格子を設計・解析した結果、1.5 ~ 3THz 付近で共鳴と微細ビーム放射が顕著になる知見が得られた(図 2)。さらに局所電磁場を増強するボウタイ型開口についても検討を進め、これまで実験結果で得られている透過率増強(数倍程度)を確かめるとともに、自己補対型対数周期の THz-BE 構造でも大幅な透過率

増強が起こり、特に抑制されていた周波数領域での増強が著しいことを明らかにした。

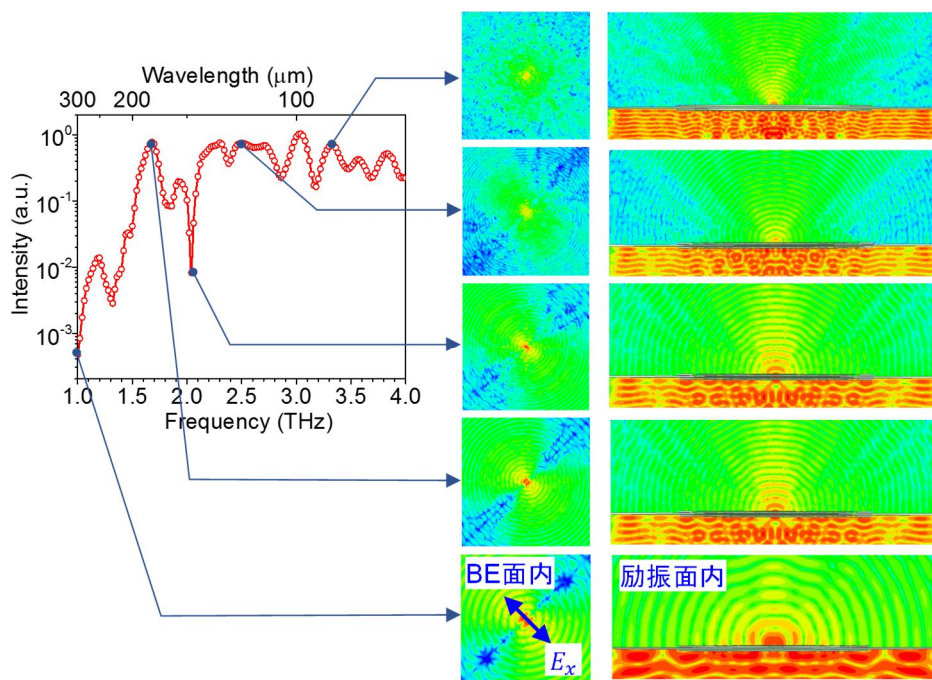


図2 自己補対型対数周期 THz-BE の透過スペクトルと放射パターン

(3) THz-BE にファブリ・ペロー共振を加えた二重共鳴配置における透過スペクトルを解析した結果が図 3(a)であり、反射率に応じて多モードの共振を伴った共鳴ピークが出現することを明らかにした。さらに最大の透過強度が得られた反射率 50%において、THz-BE とミラーの間の距離を変化させたときの透過特性が図 3(b)であり、定在波条件から予想される半波長ごとに現れる強度変化が明らかになり、距離 100 $\mu\text{m}$  付近において最大の透過率増強 (約 3.5 倍) が得られることが分かった。

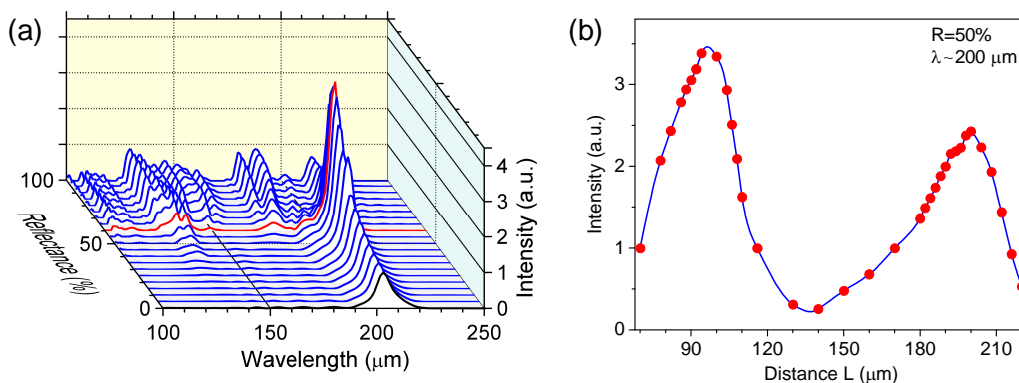


図3 (a) 二重共鳴型 THz-BE の透過スペクトル (b) 最大透過強度の距離依存性

(4) 所属機関の微細加工設備を用い、図 4 の工程に従って THz-BE の製作を行った。その際、円形回折格子の形成には図 5(a)のマスクパターンを作製し、フォトリソグラフィーにより SU-8 の凹凸構造 (周期 200 $\mu\text{m}$ 、溝深さ 20 $\mu\text{m}$ 、周期数 4~10) を Si 基板上に作製した。開口部の形成にはウエットエッチングと反応性イオンエッチング (RIE) を用い、表面回折格子の凹凸形成にはネガレジスト SU-8 を使用した。得られた THz-BE 構造 (図 5(b)) の作製精度を評価した結果、SU-8 幅 108 $\mu\text{m}$ 、凹凸の高さは 15.4~23.1 $\mu\text{m}$  の間で分布をもつことが分かった。これより露光及びエッチング条件の微調整をさらに進めれば、高精度な THz-BE が実現可能であると考えられる。

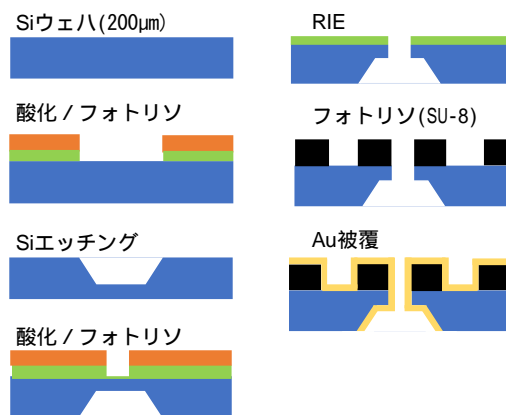


図4 THz-BEの製作工程



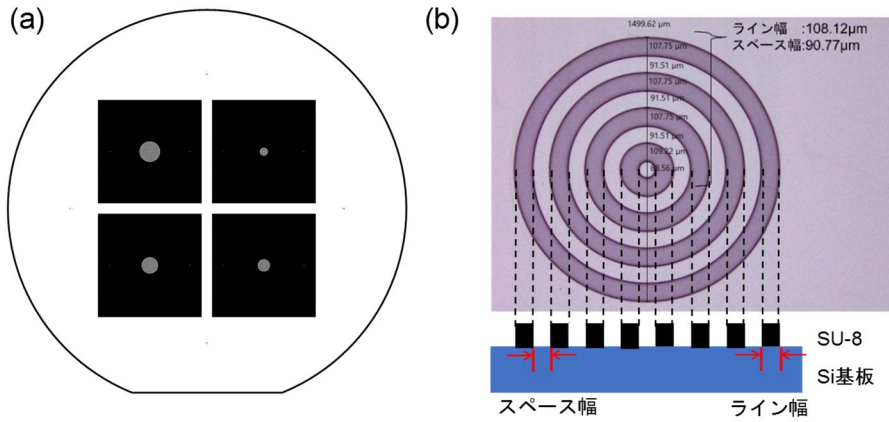


図5 (a) フォトリソグラフィー用に作製したマスク (b) SU-8 により作製した THz-BE 構造

(5) THz-OCT 用測定試料となる半導体デバイスの試作を所属機関の微細加工設備を用いて行った。そこではゲート長  $4 \sim 12 \mu\text{m}$  の MOS-FET を n 型 Si 基板上に作製して静特性測定を行い、デバイス製作に不可欠な数  $\mu\text{m}$  以内の加工精度を確認した。さらに Al/Si/SiO<sub>2</sub> 構造を作製し、金属誘起結晶化による多結晶 Si 薄膜成長過程の構造変化を顕微鏡、X 線回折及び X 線光電子分光より調べた。

(6) 3次元イメージングに用いる THz-OCT 実験のため、テラヘルツ波光源には高出力・波長可変の光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器を用い、THz-OCT 計測には周波数掃引方式を採用してマイケルソン干渉光学系を構築した(図6)。ここでは、まず可動ミラーを光軸上で移動させて干渉信号を取得し、さらにテラヘルツ波の周波数を  $1.2 \sim 1.8 \text{ THz}$  の範囲で変化させて干渉信号を得た(図7(a),(b))。この THz-OCT 計測では周波数掃引と測定対象物の2次元走査に関わる多くの制御が必要であるため、LabVIEW 言語を用いて周波数掃引制御と二次元画像の取得をシーケンスとした自動計測システムを開発し、反射干渉スペクトル位置依存性の自動取得に成功した。

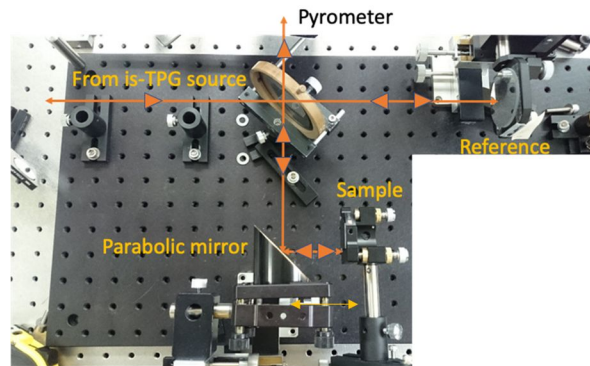


図6 THz-OCTの実験系 (マイケルソン干渉計)

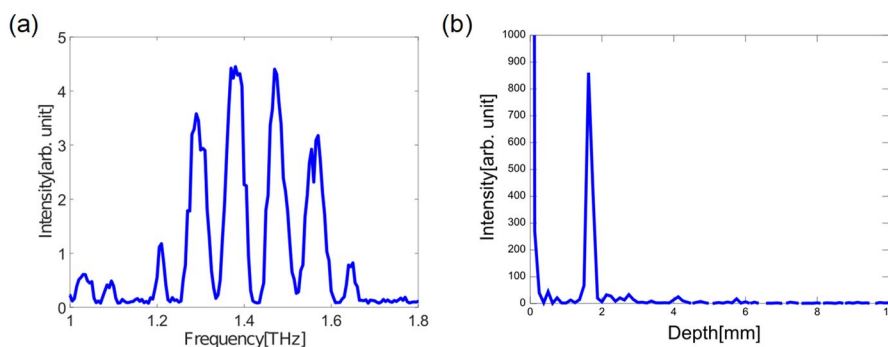


図7 (a) THz-OCT システムで得た干渉波形 (b) フーリエ変換により得た位置情報

(7) THz-BE 構造を用いた三次元計測のため、THz-BE 素子のホルダーに自動ステージを追加して THz 波入射角をコンピューター上で  $0.1$  度刻みで調整可能な測定系とした。光注入型 THz パラメトリック光源を用いて  $1.2 \sim 2.0 \text{ THz}$  の範囲で透過スペクトルの入射角度依存性を詳細に測定し、妥当な実験結果が得られることを確かめた。また、本デバイスへのテラヘルツ波照射の実験系を構築し、表面回折格子が片面および両面に形成されている THz-BE 試料を用いてテラヘルツ波透過特性を測定した。その結果、現状の THz-BE は透過率が  $0.1\%$  程度であるため、正確な特性評価には高感度検出系が必要であることが分かった。そこで、テラヘルツ波検出系としてテラヘルツ波を光波へと変換する独自の実験系を構築してテラヘルツ帯透過率を測定した結果、両面凹凸型と片面凹凸型の THz-BE の間には約  $2$  倍の透過率差があることが分かった。さらに高

速変調したテラヘルツ波を用いて常温動作の高感度テラヘルツ波検出器の測定感度を調べた結果、パイロ素子に比べて最大 40～50dB 程度高感度であることが分かった。

以上の成果より、本研究課題に必要なテラヘルツ波共振器とその二重共鳴、THz-OCT および測定試料に関する技術基盤・基礎知見を得ることができ、3次元超解像テラヘルツ波イメージングへの見通しを得た。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Y. Tokizane, S. Ohno, Y. Takida, J. Shikata, and H. Minamide	4. 巻 17
2. 論文標題 Incident angle-dependent extraordinary transmission of the THz bull's-eye structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Appl.	6. 最初と最後の頁 054020-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.17.054020	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 H. Minamide, K. Nawata, Y. Moriguchi, Y. Takida, and T. Notake	4. 巻 92
2. 論文標題 Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with timing stabilized excitation for nondestructive testing applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Rev. Sci. Instrum.	6. 最初と最後の頁 093002-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0057040	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 Y. Takida, K. Nawata, and H. Minamide	4. 巻 29
2. 論文標題 Security screening system based on terahertz-wave spectroscopic gas detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Opt. Expr.	6. 最初と最後の頁 2529-2537
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.413201	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 S. Ohno, Y. Tokizane, J. Shikata, and H. Minamide	4. 巻 2
2. 論文標題 Phase and direction control of a terahertz-wave propagating in a waveguide coupled with a bull's-eye structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Radio Sci. Lett.	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.46620/20-0039	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 J. Shikata, S. Ohno, and H. Minamide	4. 巻 17
2. 論文標題 Terahertz-wave generation from surface phonons at forbidden frequencies of lithium niobate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Electron. Expr.	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.17.20200133	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 Y. Takida, K. Nawata, and H. Minamide	4. 巻 5
2. 論文標題 Injection-seeded backward terahertz-wave parametric oscillator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 061301-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0007306	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 Y. Moriguchi, Y. Tokizane, Y. Takida, K. Nawata, S. Nagano, M. Sato, T. Otsuji, and H. Minamide	4. 巻 45
2. 論文標題 Frequency-agile injection-seeded terahertz-wave parametric generation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Opt. Lett.	6. 最初と最後の頁 77-80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.387865	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22件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 永留唯瑛, 池田正則
2. 発表標題 交流表面光電圧法による金属誘起結晶化過程における層交換の検出
3. 学会等名 2021年応用物理学会東北支部第76回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Minamide
2. 発表標題 Leading-edge THz-wave research opened up by nonlinear photon-conversion devices (Plenary Talk)
3. 学会等名 9th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies (RJUSE TeraTech-2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野誠吾, 時実悠, 瀧田佑馬, 四方潤一, 南出泰亜
2. 発表標題 テラヘルツ帯ブルズアイ構造における斜入射特性のモデル化
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩川優也, 大野誠吾, 四方潤一, 時実悠, 南出泰亜
2. 発表標題 テラヘルツ帯表面プラズモン共振器と導波路の結合特性
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Minamide
2. 発表標題 Advanced optical parametric oscillator to generate tunable terahertz waves (tentative)
3. 学会等名 The IX International Symposium "Modern Problems of Laser Physics (MPLP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 H. Minamide
2. 発表標題 High-Brightness Terahertz-wave Parametric Sources for Nondestructive Application
3. 学会等名 The 12th International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Minamide
2. 発表標題 High-Brightness Backward Terahertz-wave Parametric Oscillators for 3D Nondestructive Applications
3. 学会等名 CLEO 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永留唯瑛, 池田正則
2. 発表標題 真空中でアニールしたSi/Al/SiO <sub>2</sub> 構造の交流表面光電圧測定
3. 学会等名 令和2年度日本表面真空学会東北・北海道支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南出泰亜
2. 発表標題 新原理による非線形波長変換テラヘルツ光源の研究と将来展開
3. 学会等名 第5回フォトニクスワークショップ「光の多様性を探求する!!」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南出泰亜
2. 発表標題 高輝度・波長可変テラヘルツ波光源の開発
3. 学会等名 可視赤外線観測装置技術ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Minamide and K. Nawata
2. 発表標題 Extreme Terahertz-wave Parametric Oscillator And Its Application
3. 学会等名 45th International Conference on Infrared, Millimeter and THz waves (IRMMW-THz 2020)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 四方潤一, 岩川優也, 時実悠, 大野誠吾, 南出泰亜
2. 発表標題 広帯域動作のテラヘルツ帯表面電磁波共振器
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩川優也, 四方潤一
2. 発表標題 テラヘルツ帯Bull's Eyeデバイスの多波長動作
3. 学会等名 2020年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Minamide, K. Nawata, and Y. Takida
2. 発表標題 Leading-edge terahertz-wave parametric sources and their applications
3. 学会等名 SPIE Optical Engineering + Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Minamide
2. 発表標題 Novel THz-wave Gas-sensing System Based on Frequency-tunable Source
3. 学会等名 Optical Sensors and Sensing Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野誠吾, 時実 悠, 四方潤一, 南出泰垂
2. 発表標題 プルスアイ結合導波路構造におけるテラヘルツ波の位相制御
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山際将具, 時実悠, 南川丈夫, 山本裕紹, 安井武史
2. 発表標題 不透明物体の内部応力可視化に向けた位相シフトTHz デジタルホログラフィ計測
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Minamide
2. 発表標題 RIKEN Terahertz-wave research based on nonlinear photonics
3. 学会等名 Philippine-Japan Conference on Photonics and Optical Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 四方潤一, 大野誠吾, 南出泰亜
2. 発表標題 負誘電率領域における表面波共鳴型テラヘルツ波放射の解析
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Tokizane, Y. Moriguchi, and H. Minamide
2. 発表標題 Characterizing depth resplution and range of a swept-source THz OCT
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter and THz waves (IRMMW-THz 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田正則, 高野隆盛
2. 発表標題 AI誘起結晶化法で作製したSi薄膜の表面光電圧測定
3. 学会等名 令和元年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Moriguchi, Y. Tokizane, S. Nagano, T. Otsuji, and H. Minamide
2. 発表標題 Development of a High-speed Terahertz-wave Spectrometer for THz-OCT
3. 学会等名 EMN Terahertz 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>日本大学工学部ホームページ  <a href="https://www.ce.nihon-u.ac.jp/undergraduate/undergraduate105/">https://www.ce.nihon-u.ac.jp/undergraduate/undergraduate105/</a>          理化学研究所テラヘルツ光源研究チームホームページ  <a href="http://www2.riken.jp/lab-www/tera/index-e.html">http://www2.riken.jp/lab-www/tera/index-e.html</a></p>
--

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
研究分担者	時実 悠  (TOKIZANE Yu)  (80648931)	徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・特任助教   (16101)	
研究分担者	南出 泰壘  (MINAMIDE Hiroaki)  (10322687)	国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・ チームリーダー   (82401)	
研究分担者	池田 正則  (IKEDA Masanori)  (10222902)	日本大学・工学部・教授   (32665)	

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
---------	---------