

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01839

研究課題名（和文）超高屈折率・無反射な積層材料によるテラヘルツ電磁波の高効率制御の学理構築

研究課題名（英文）Control of terahertz waves with high efficiency by laminated metasurfaces with an extremely high refractive index

研究代表者

鈴木 健仁（Suzuki, Takehito）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：60550506

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：超高屈折率・無反射な積層材料によるテラヘルツ電磁波の高効率制御の学理構築の研究に取り組んだ。具体的には、偏光特性を有する積層構造メタサーフェスアンテナを小型なテラヘルツデバイスへ融合することを目指し、偏光特性を有する積層構造メタサーフェスアンテナを設計、解析、作製、実験した。本研究課題で研究を進めた偏光特性を有する積層構造メタサーフェスアンテナは、フレネルレンズの原理により360度以上の位相の制御をしている構造ではない。実験により、テラヘルツ波帯連続発振光源の指向性利得が向上することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波帯は次世代無線通信やイメージングなどの産業応用が期待されている周波数帯である。テラヘルツ産業のために、共鳴トンネルダイオードや量子カスケードレーザーなどのテラヘルツ波帯連続発振光源は非常に充実してきている。本研究では、テラヘルツ波帯連続発振光源から放射されたテラヘルツ波の制御の研究に取り組んだ。テラヘルツ波の制御のためには3次元構造のレンズなどが良く用いられる。本研究で取り組んだ平面構造のメタサーフェスアンテナはテラヘルツ波帯連続発振光源への実装に向けており、コンパクトなテラヘルツデバイスの実現を加速できる。

研究成果の概要（英文）：We researched the control of terahertz waves with high efficiency by laminated metasurfaces with an extremely high refractive index. A polarization-dependent metasurface antenna with a laminated structure was designed, simulated, fabricated, and measured to aim at the integration into compact terahertz devices. The polarization-dependent metasurface antenna with a laminated structure does not have the structure that controls phases beyond 360 degrees based on the principle of Fresnel lenses. Measurements verified that the polarization-dependent metasurface antenna with a laminated structure enhances the directivity of a terahertz continuous-wave source.

研究分野：光工学および光量子科学関連

キーワード：テラヘルツ波 メタマテリアル メタサーフェス アンテナ 高屈折率材料 極限屈折率材料

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

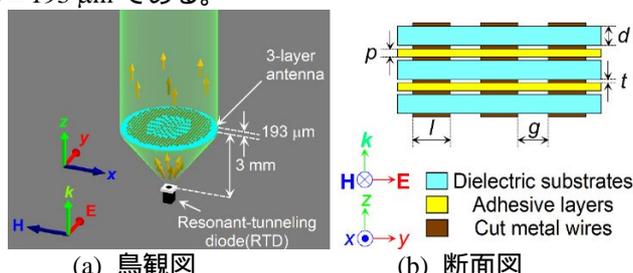
テラヘルツ波は次世代高速無線通信やイメージングの応用が期待されている。テラヘルツ波の産業応用に向けて、共鳴トンネルダイオード(RTD)や量子カスケードレーザー(QCL)などのテラヘルツ光源が報告されている。しかしながら、テラヘルツ光源から放射されるテラヘルツ波は放射状に広がるため、伝搬距離による減衰が大きい。そこで、高屈折率・低反射なメタサーフェスを用いて設計されるメタサーフェスアンテナによるテラヘルツ波の波面制御が報告されている。一層構造のメタサーフェスアンテナでは、メタサーフェスアンテナをRTDに搭載して、RTDの指向性利得の向上を実験で確認している。積層構造のメタサーフェスアンテナでは、さらなる高指向性利得を実現できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、偏光特性を有する積層構造メタサーフェスアンテナを小型なテラヘルツデバイスへ融合することを目指し、偏光特性を有する積層構造メタサーフェスアンテナを設計、解析、作製、実験した。偏光特性を有する積層構造メタサーフェスアンテナは、メタサーフェスを接着シートで密着して積層している。中空構造での積層では積層間隔が大きくなり、小型なテラヘルツデバイスへの搭載が難しいという課題の解決にも取り組んだ。本研究課題で研究を進めた偏光特性を有する積層構造メタサーフェスアンテナは、フレネルレンズの原理により360度以上の位相の制御をしている構造ではない。

3. 研究の方法

図1(a)、(b)に設計した積層構造メタサーフェスアンテナの鳥瞰図と断面図を示す。積層構造メタサーフェスアンテナの設計周波数は0.312 THzである。積層構造メタサーフェスアンテナの半径、光源との距離はともに3 mmである。光源には0.312 THzで発振する共鳴トンネルダイオード(RTD)を用いた。メタサーフェスは誘電体基板の表裏にカット金属ワイヤーを配置して構成している。誘電体基板にはシクロオレフィンポリマー(屈折率 $1.53 + j0.0012$)、カット金属ワイヤーには銅(導電率 5.8×10^7 S/m)を用いた。接着シートを用いて、メタサーフェスを3層積層している。積層構造メタサーフェスアンテナの厚さは、 $d = 50 \mu\text{m}$ 、 $p = 20 \mu\text{m}$ 、 $t = 0.5 \mu\text{m}$ より、合計で $3d + 2p + 6t = 193 \mu\text{m}$ である。



(a) 鳥瞰図

(b) 断面図

図1 0.3 THz 帯積層構造メタサーフェスアンテナ

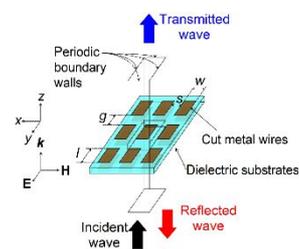


図2 周期構造モデル

メタサーフェスのカット金属ワイヤーの長さ l と間隔 g の値を変化させることで、透過率、反射率、透過位相遅れを制御できる。0.312 THzでRTDからメタサーフェスアンテナの出射端までの各所での伝搬路で位相が等しくなるパラメータのカット金属ワイヤーを配置することで、RTDから放射された放射状のテラヘルツ波を平面状のテラヘルツ波に変換している。

カット金属ワイヤーの長さ l と間隔 g の値を変化させた場合の透過率、反射率、透過位相遅れを調べるために周期構造解析を行った。図2に解析に使用した周期構造モデルを示す。解析には有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS を用いた。 l と g をそれぞれ150~350 μm 、50~350 μm の範囲で変化させ、透過率、反射率、透過位相遅れを導出した。 $s = 80 \mu\text{m}$ 、 $w = 100 \mu\text{m}$ とした。図3に解析より得られた積層構造メタサーフェスアンテナの(a)透過率、(b)反射率、(c)透過位相遅れを示す。周期構造解析から得られた結果から、各所での伝搬路において位相がそろったようなパラメータのメタアトムを配置する。

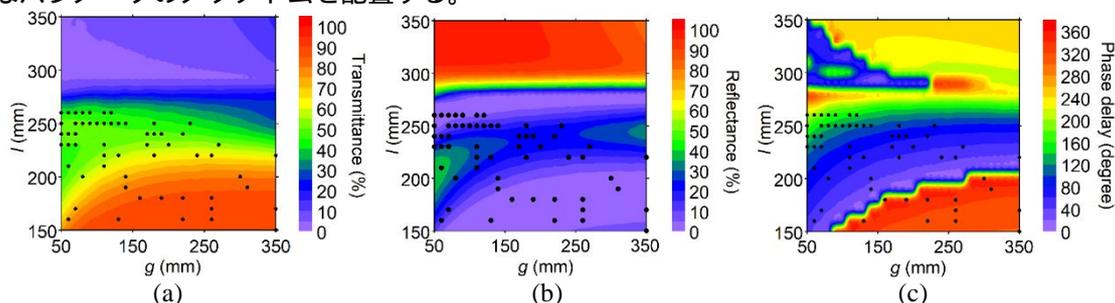


図3 周期構造解析モデルによる(a)透過率、(b)反射率、(c)透過位相遅れ

図4(a)、(b)、(c)に積層構造メタサーフェスアンテナの透過率、反射率、透過位相遅れを示す。解析には有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS を用いた。中心から外側に向かうほど透過位相遅れが大きくなっていることが確認できる。

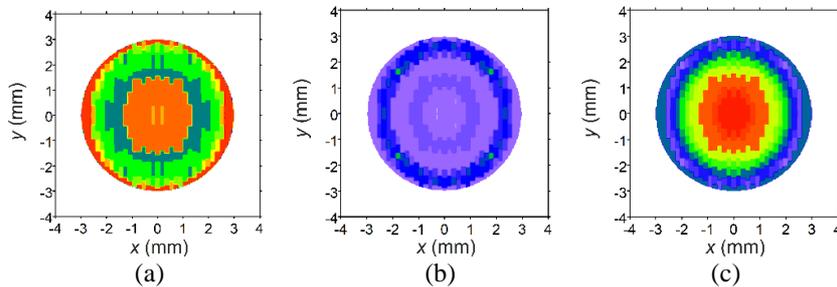


図4 設計した積層構造メタサーフェスアンテナの(a)透過率、(b)反射率、(c)透過位相遅れ

4. 研究成果

図5に作製した積層構造メタサーフェスアンテナの(a)全体図と(b)拡大図を示す。作製したメタサーフェスアンテナをレーザー顕微鏡(株式会社キーエンス製 K-X100)で観察した。レーザー顕微鏡による測定からカット金属ワイヤーのパラメータ l , g , s , w , 1層目と2層目の積層ずれ、1層目と3層目の積層ずれを測定した。カット金属ワイヤーのパラメータの作製誤差はおおむね抑えられている。1層目と2層目の積層ずれが x 方向で $100 \mu\text{m}$ 近くになっており、積層ずれの低減が課題である。

図6に有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS による全構造解析の(a) yz 面と(b) xz 面の指向性利得を示す。作製誤差と積層ずれを考慮した解析を行っている。RTD 単体と比較して、 yz 面、 xz 面ともに 9.1 dB の指向性利得の向上を解析により確認した。

図7に積層構造メタサーフェスアンテナの指向性利得の実験結果を示す。RTD に積層構造メタサーフェスアンテナを搭載した場合の指向性利得は、 yz 面で最大 15.6 dB と xz 面で最大 15.7 dB となり、RTD 単体と比較してそれぞれ指向性利得は 5.6 dB と 5.7 dB 向上することを実験により確認した。図7は、図6のRTDの解析結果の値を用いてRTDの指向性利得を規格化している。

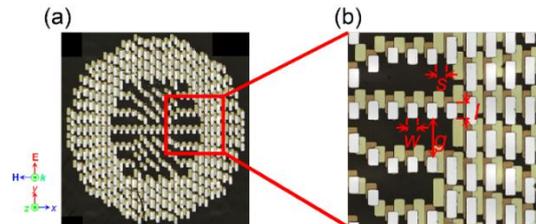


図5 作製した積層構造メタサーフェスアンテナの(a)全体図と(b)拡大図

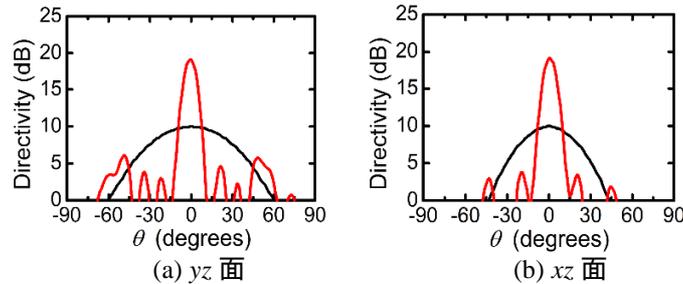


図6 指向性利得の解析結果

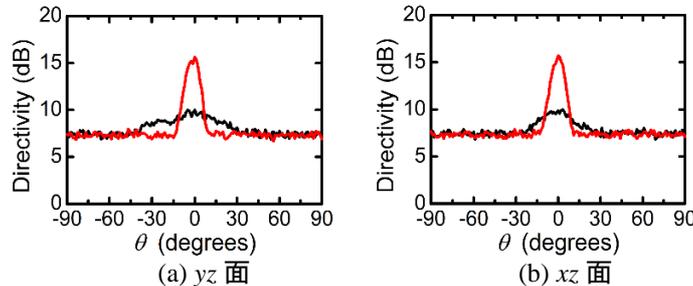


図7 指向性利得の実験結果

参考文献

- [1] 宇野 晃生, “0.3THz 帯積層構造メタサーフェスアンテナの接着シートを用いた設計・試作・実験評価” 東京農工大学卒業論文, Mar. 2023.
- [2] 宇野 晃生, 浦島 康平, 鈴木 健仁, “0.3THz 帯積層構造メタサーフェスアンテナの接着シートを用いた設計,” 2023 年第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 16p-A202-14, ハイブリッド開催(上智大学+オンライン), Mar. 2023.
- [3] 宇野 晃生, 浦島 康平, 中田 成央, 朝田 晴美, 鈴木 健仁, “0.3THz 帯積層構造メタサーフェスアンテナの実証,” テラヘルツ科学の最先端 X, Con-05, 東北大学, Dec. 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 鈴木 健仁	4. 巻 7
2. 論文標題 6G通信に向けた高屈折率無反射メタサーフェスによるテラヘルツフラットオプティクス	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理学会フォトニクス分科会フォトニクスニュース	6. 最初と最後の頁 55-59
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 無
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 Kento Sato and Takehito Suzuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Polarization-independent isotropic metasurface with high refractive index, low reflectance, and high transmittance in the 0.3-THz band	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 2537 ~ 2544
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1515/nanoph-2022-0788	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 Harumi Asada and Takehito Suzuki	4. 巻 49
2. 論文標題 Ultrathin metasurface on a 100nm-thick dielectric membrane absorbs infrared rays	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 1409 ~ 1409
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.507304	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 -

〔学会発表〕 計34件（うち招待講演 7件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 鈴木 健仁
2. 発表標題 メタサーフェスによる極限屈折率材料の発見とテラヘルツフラットオプティクスへの応用
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Harumi Asada and Takehito Suzuki
2. 発表標題 Metasurface demonstrating both high refractive index and low reflectance in the infrared region
3. 学会等名 The Third International Symposium on Frontiers in THz Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nao Nakata, Kohei Urashima, Harumi Asada, and Takehito Suzuki
2. 発表標題 Directivity measurement method for metasurface antennas by an alternative to terahertz compact oscillators
3. 学会等名 IRMMW-THz 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Harumi Asada and Takehito Suzuki
2. 発表標題 Reflectionless metasurface with high refractive index in the 50-THz band for directivity control of thermal radiation
3. 学会等名 IRMMW-THz 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浦島 康平, 鈴木 健仁
2. 発表標題 0.3THz帯メタレンズアンテナを搭載した共鳴トンネルダイオードによる30dB高指向性利得設計
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月 景太, 朝田 晴美, 劉 久美子, 鈴木 健仁
2. 発表標題 誘電体表裏両面にカット金属ワイヤーを有するテラヘルツ波帯メタサーフェスの分散特性の実験評価
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 劉 久美子, 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 熱輻射の指向性制御に向けた100THz帯メタサーフェスの作製と実験
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浦島 康平, 鈴木 健仁
2. 発表標題 メタレンズアンテナと共鳴トンネルダイオードの融合による0.3THz帯30dB指向性利得の設計
3. 学会等名 信学技報
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山森 駿司, 浦島 康平, 鈴木 健仁
2. 発表標題 無偏光・高屈折率・低反射なメタサーフェスによるテラヘルツ光渦生成素子の設計
3. 学会等名 信学技報
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安川 昂秀, 山森 駿司, 鈴木 健仁
2. 発表標題 誘電率と透磁率の両方を制御したメタアトムの配置設計によるテラヘルツ光渦生成素子
3. 学会等名 電子情報通信学会 東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宇野 晃生, 浦島 康平, 鈴木 健仁
2. 発表標題 0.3THz帯積層構造メタサーフェスアンテナの接着シートを用いた設計
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 健仁
2. 発表標題 メタサーフェスによるテラヘルツ波帯平面アンテナと6G通信用光源の融合に向けて
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 厚さ100 nmのSiNx膜の表裏両面に正方形Auパッチを配置した構造による物体から放射された熱輻射の制御に向けた高屈折率無反射なメタサーフェス
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山森 駿司, 鈴木 健仁
2. 発表標題 テラヘルツ光渦生成メタサーフェスの機械学習のアシストも活用した最適化の検討
3. 学会等名 第27回電子情報通信学会 東京支部学生会 研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 健仁
2. 発表標題 メタサーフェスと6G通信用光源の融合に向けて
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 熱輻射制御に向けた高屈折率無反射メタサーフェスの高周波化の検討
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田 成央, 佐藤 建都, 浦島 康平, 劉 久美子, 鈴木 健仁
2. 発表標題 0.3THz帯積層型両面構造ペアカットワイヤーアレーアンテナの設計
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kento Sato and Takehito Suzuki
2. 発表標題 Polarization-independent Reflectionless Metasurface with an Extremely High Refractive Index
3. 学会等名 IRMMW-THz 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 望月 景太, 佐藤 建都, 鈴木 健仁
2. 発表標題 無偏光・ゼロ屈折率・無反射な0.3THz帯メタサーフェスの設計
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 健仁
2. 発表標題 テラヘルツギャップを切り拓く人工構造材料の深化と応用
3. 学会等名 日本学術振興会メタマテリアル182委員会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 健仁
2. 発表標題 テラヘルツ波帯メタサーフェスアンテナと次世代通信用光源の融合に向けて
3. 学会等名 応用物理学会フォトニクス分科会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 50THz帯高屈折率・無反射メタサーフェスの実効的な材料特性の実験評価
3. 学会等名 日本熱物性学会 ふく射性質とその放射制御に関する研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keita Mochizuki, Harumi Asada, and Takehito Suzuki
2. 発表標題 Manipulation of terahertz waves with a right- or left-handed metasurface for directivity enhancement
3. 学会等名 IRMMW-THz 2023, Montreal (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Harumi Asada and Takehito Suzuki
2. 発表標題 Absorptive infrared metasurface on 100 nm-thick dielectric membrane
3. 学会等名 IRMMW-THz 2023, Montreal (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 健仁
2. 発表標題 メタサーフェスによるテラヘルツ波帯アンテナと次世代通信用光源の融合に向けて
3. 学会等名 ナノ構造ポリマー研究協会 第11回マイクロ・ナノ加工研究会公開講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安川 昂秀, 山森 駿司, 鈴木 健仁
2. 発表標題 テラヘルツ連続発振光源への集積化に向けた平面構造の光渦生成素子の実験
3. 学会等名 2023年第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 健仁
2. 発表標題 メタサーフェスと 6G通信用光源の融合に向けて
3. 学会等名 第24回マイクロ・ナノ加工研究会公開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 2023年

1. 発表者名 山森 駿司, 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 無偏光なメタサーフェスを積層した0.3THz帯光渦生成素子の実証
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端X
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宇野 晃生, 浦島 康平, 中田 成央, 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 0.3THz帯積層構造メタサーフェスアンテナの実証
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端X
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 蛭澤 魁斗, 安川 昂秀, 鈴木 健仁
2. 発表標題 7G無線通信に向けた0.85THz帯積層構造メタレンズアンテナの設計
3. 学会等名 第29回電子情報通信学会 東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 齊藤 祐希, 望月 景太, 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 熱輻射の指向性制御に向けた200THz帯高屈折率メタサーフェスの設計
3. 学会等名 第29回電子情報通信学会 東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 三ツ井 祐ノ介, 中田 成央, 鈴木 健仁
2. 発表標題 無偏光な積層構造メタレンズアンテナの大開口径化による高指向性利得設計
3. 学会等名 第29回電子情報通信学会 東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 落合 真海, 山森 駿司, 安川 昂秀, 鈴木 健仁
2. 発表標題 テラヘルツ連続発振光源への集積化に向けたコリメートと光渦生成の二機能素子の設計
3. 学会等名 2024年第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中田 成央, 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 メタサーフェスアンテナの評価のための小型テラヘルツ発振器の代替となる光学系の基礎検討
3. 学会等名 2024年第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京農工大学 工学研究院 鈴木研究室 http://web.tuat.ac.jp/~suzuki-lab/index.html

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