

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04552

研究課題名（和文）メタエレクトロニクスによる電子光融合デバイスの創生

研究課題名（英文）Creation of electronic and photonic integrated devices using meta-electronics

研究代表者

鈴木 左文（Suzuki, Safumi）

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：40550471

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、共鳴トンネルダイオード（RTD）を用いた新たなテラヘルツ帯アクティブメタ材料を提案し、抵抗により非発振化したデバイスから200 GHz付近を中心として100 GHzの広帯域な増幅特性を得ることに成功した。また、メタ原子同士を抵抗で結合した二次元アレイのデバイスでは500 GHzにおいてコヒーレントな出力合成動作が得られることを実験的に明らかにした。さらに、RTDアクティブメタ材料と外部誘電体導波路と結合させた場合、新たな動作として広帯域なコム状のスペクトルが発生することも明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、共鳴トンネルダイオード（RTD）というテラヘルツ帯電磁波から見ると微小なデバイスについて、それをメタ材料化することで、平面型のデバイスに拡張することに成功し、電磁波と直接相互作用ができる形態にできることを明らかにした。これにより、電磁波の直接増幅やコヒーレント結合による面発光レーザーのような動作が得られ、さらに、広帯域のコム状スペクトルなど興味深い新たな動作も得られ、従来の電子デバイスの動作を超える動作を引き出すことに成功した。また、コヒーレント動作により得られたミリワット出力は、動作周波数においてレコード出力であり、テラヘルツ応用実用化へのカギとなり得るものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a novel terahertz active metamaterial using resonant tunneling diodes (RTDs) and small antennas. We succeeded in obtaining ~100 GHz broadband amplification characteristics centered around 200 GHz from an RTD active metamaterial that was rendered non-oscillating by resistances. We also experimentally demonstrated that a coherent output power combination at 500 GHz was achieved in a two-dimensional array device in which RTD meta-atoms were resistively coupled. Furthermore, we showed that a broadband comb-like spectrum was generated when the RTD active metamaterial was coupled to an external dielectric waveguide.

研究分野：電子デバイス

キーワード：メタ材料 共鳴トンネルダイオード テラヘルツ

1. 研究開始当初の背景

高周波の極微電子デバイスは電磁波の波長と比べ大きなサイズの隔たりが存在する。図1に示すように、電磁波から見て電子デバイスは点であり、相互の結合には導体の導通路・アンテナ等を使わなければならない。特にテラヘルツ帯の高周波では表皮効果により導体損失が大きくなるため、電子デバイスの高周波動作極限をリミットする主な要因の一つとなっている。一方、光デバイスでは、電磁波(光)が電極ではなく誘電体などに閉じ込められており、導体損失は無く、高いQ値の共振器などが実現できている。もし、電子デバイスが電磁波と上手く結合できれば、光デバイスで使われるような共振器等と直接相互作用ができ、これまでに無い電子・光デバイスが実現できる可能性がある。

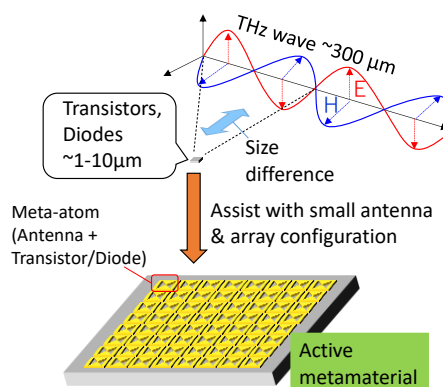


図1: 電子デバイスと電磁波との相互作用を強めるためのアクティブメタマテリアル

誘電率や透磁率を制御するメタマテリアルは近年注目される電磁波デバイスであり、電子デバイスをこれに装荷したアクティブメタマテリアルも研究されている。メタマテリアルは微小LC共振回路・アンテナのメタ原子から構成され、平面アレイに展開することでメタ表面を形成し、平面波と結合している。つまり、メタ原子という点デバイスを面デバイスに拡張しているということであり、図1下に示すような電子デバイスを集積したメタ表面であれば、点の電子デバイスを面に拡張ができるといえる。

研究代表者はこれまで InP 系共鳴トンネルダイオード (RTD) の微分負性抵抗を利用したテラヘルツ発振器を継続的に研究し、電子デバイスで最高の約 2 THz 高周波発振や 0.7 mW 高出力アレイなどを達成してきた。このように RTD は他の電子デバイスに追従を許さない遥かに高い周波数で動作可能であり、電子デバイスの高周波動作極限かつ光デバイスに最も近いデバイスといえる。しかし、極限的高周波数のため導体損失の影響を大きく受け Q 値の低い共振器しか集積できず、動作が制限されている。

そこで、本研究では、研究代表者は前述の電子デバイスの点から面への拡張をアイデアとし、RTD をメタ原子に集積した新たなメタ表面を提案する。このメタ原子は、RTD と極微アンテナから形成され、わざと共振器が形成されないよう回路形成し単体では発振せず、メタ表面は安定かつ広帯域の平面電磁波に対して負の導電率を持つ壁、つまり、増幅して反射する壁を形成することを可能とする、もしくは、メタ原子同士を平面上で結合動作させることでコヒーレントな発振を得るものである。この新たなアクティブメタマテリアルは高い Q 値を持つ外部共振器や他の光学素子と強い結合が可能で、レーザー型のデバイスや増幅器など様々な新デバイスを創生できると見込まれる。

2. 研究の目的

本研究では、このような RTD を用いた新たなアクティブメタマテリアル、および、メタ表面について、電磁界シミュレーションと RTD の回路モデルを用いて設計、作製し、広帯域な THz パルス電磁波を当てその応答を調べることで動作実証を行い、それを元にレーザー、増幅器へと展開していく。これより、“点の電子デバイスを面に拡張ができるか”について明らかにし、そして、新たな学理を構築し、研究・学術領域を切り開くと共に、電子と光技術を融合し実用化の進まない THz 応用への切り札となるデバイスを創生することを目的とする。

3. 研究の方法

メタ原子の動作シミュレーションについては、アンテナの電磁界シミュレーション、および、RTD の等価回路モデルによって行い、増幅動作が得られるように構造設計を行う。設計したデバイスの作製は、多層レジストを駆使した独自の半導体プロセスを駆使してこれを行う。作製デバイスは、フェムト秒パルスレーザーと光伝導アンテナによって発生させた広帯域 THz パルスを照射し、返ってきた反射信号を解析することで評価する。これにより負性導電メタ表面の増幅動作を示す。また、メタ表面の各メタ原子を結合させ、コヒーレント動作を達成し、面発光レーザーのような動作を目指す。さらに、外部光学素子と結合させ新たな動作を引き出す。

4. 研究成果

本研究で提案する新たなアクティブメタマテリアルを構成するメタ原子は図2に示されるもので、微細アンテナの中央に InGaAs/AlAs の 2 重障壁 RTD が集積されており、サイズは THz 波長より十分小さい数 $10 \mu\text{m}$ 四方である。端部には抵抗が 2 つ集積されており、低周波で RTD の負性抵抗を打ち消し、メタ原子単体では RTD の容量との LC 発振を生じさせず安定な動作を実現する。

高周波ではインダクタンスのインピーダンスが高くなり、抵抗が切り離され、RTDの微分負性抵抗が現れることになる。そしてメタ原子をアレイ状に並べることで、負性導電率を持つ壁（誘電正接が負の媒質）が形成され、電磁波を増幅して反射することが可能になる。

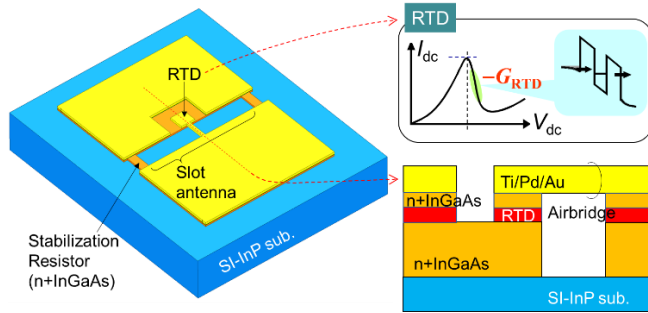


図 2：メタ原子の構造

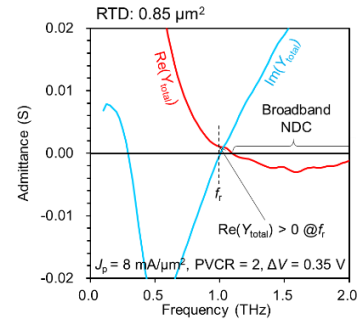


図 3：周波数特性

この構造について、動作シミュレーションを行った。アンテナ特性のシミュレーションは3次元電磁界シミュレーターを用い、これと、独自に構築したRTDの等価回路モデルと組み合わせ全体のアドミタンスを求めることで、非発振特性が得られること、および、負性導電特性を見積もった。得られた結果を図3に示す。アドミタンスの虚部がゼロとなる共振点が1THzにあるが、その際に実部は正となっており、非発振特性が得られる。それよりも高い周波数では、負性の導電特性が1-2 THzの広帯域で得られることが分かった。

このシミュレーションを元に、SI-InP基板上にRTD層構造をエピ成長させたウエハを自前の半導体プロセス技術を用いてデバイスに加工した。動作周波数は下がるが、安定したプロセスが行えるよう、サイズを大きくしている。作製したRTDメタ原子の光学・電子顕微鏡像を図4に示す。電流電圧特性を測定したところ、図5に示すように、発振デバイスに見られるような不連続な電流の飛びが発生せず、滑らかな電流電圧特性であり、非発振化していることが分かった。作製したメタ表面を、図6に示すテラヘルツ時間領域分光システムに入れ、フェムト秒パルスレーザーと光伝導アンテナで生成したテラヘルツパルスを送入し、デバイスの反射特性を広帯域に測定した。測定システム、および、得られた反射特性とシミュレーション結果を図7に示す。およそ200GHzを中心に100GHzの広帯域に渡って強い反射が得られた。さらに、バイアスを変えていくと反射強度が高まり、RTDの負性抵抗による増幅が得られていることが明らかとなった。これは理論計算結果の傾向と一致する。これにより、RTDメタマテリアルによって広帯域な増幅が可能であることを示すことができた。

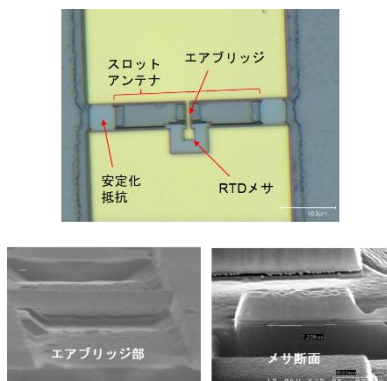


図 4：作製したメタ原子

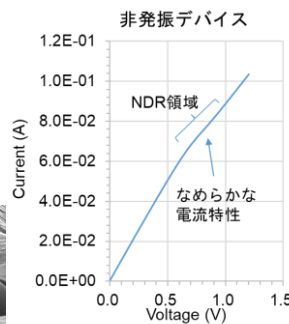


図 5：電流電圧特性

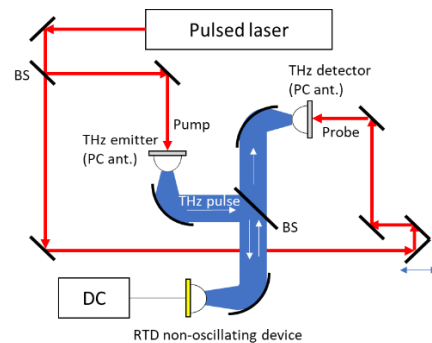


図 6：測定システム

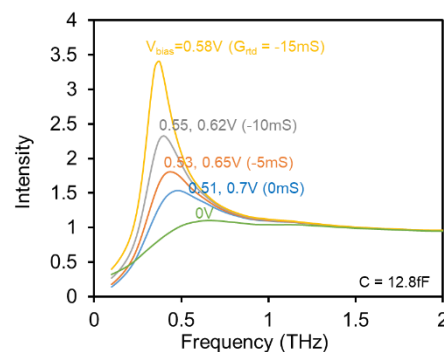
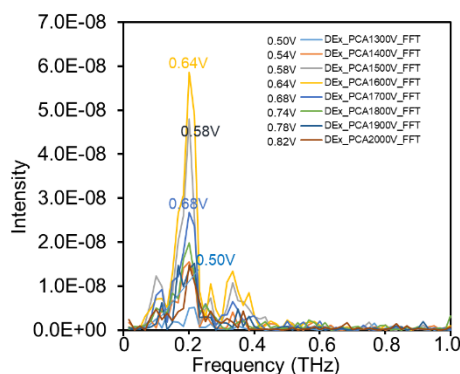


図 7：テラヘルツ時間領域分光法によって測定した応答特性（左）と理論計算結果（右）

このメタ原子を並べたメタマテリアルであるが、外部共振器などの光学素子と強い結合を行うにはメタ原子が同期動作する必要がある。多数動作は複雑となるが、その動作を図8に示すような2次元的なアドミタンス行列計算を駆使することによって解析した。解析より、メタ原子同士が結合した状態においては、メタ原子の個数分だけ異なる動作モードが存在し、それらは、図9に示すような結合素子の平面内における定在波の分布と一致することが明らかとなった。しかしながら、異なるモードが同時に存在するのは好ましくないため、そこで、隣接素子間にメタ原子の非発振動作に利用していた抵抗を用いた結合構造を付加することによって、隣接素子間の動作位相が逆相となる動作モード (Eigenmode N) を安定動作させることが出来ることを見出した。しかしながら、このような逆相動作ではスロットアンテナの放射方向において、電界が打ち消されるため放射されなくなってしまふ。そのため、素子を90度曲げて接続し電界が遠方で打ち消されないような独自構造を提案し、まず、2素子の結合アレイにおいて、コヒーレント動作を確認すると共に、放射の電界方向から想定した動作モードで動作していることを明らかにした。その後、アレイ数を10程度に拡大したデバイスを作製し、こちらでも、コヒーレントな動作が得られ、出力結合により700 GHz帯でミリワット出力を得た。

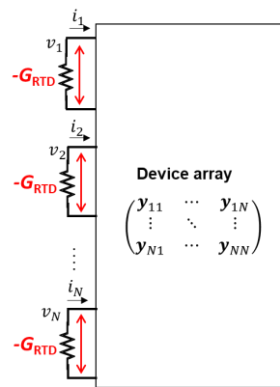


図8：アレイ解析用行列

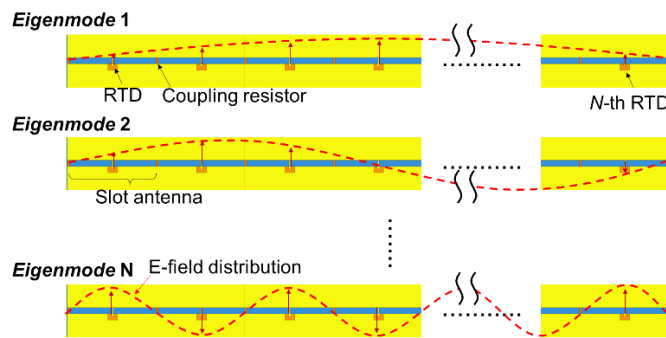


図9：1次元的な結合素子における動作モード

さらに、この結合構造について、図10に示すように電極を交差させることによって逆相動作しつつも電界方向をそろえることができる構造を新たに提案し、これを拡張した2次元アレイ構造を考案した。図10下に3×3のアレイにおける放射パターンのシミュレーション結果を示す。指向性が高く、平面波状の電磁波伝搬が得られており、外部共振器などの光学素子との強い結合が期待される。作製した2×2アレイのデバイスの光学顕微鏡、および、細部のSEM写真を図11に示す。エアブリッジ構造などがきれいに形成できていることが分かる。作製したデバイスの電流電圧特性とその発振スペクトルを図11下に示す。スペクトルは500GHzに1本だけ立っており、コヒーレントな出力結合を得ることができた。さらにこれを拡張すれば大出力と高指向性が期待される。

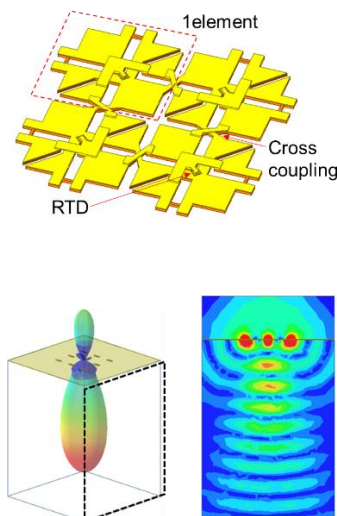


図10：2次元アレイ

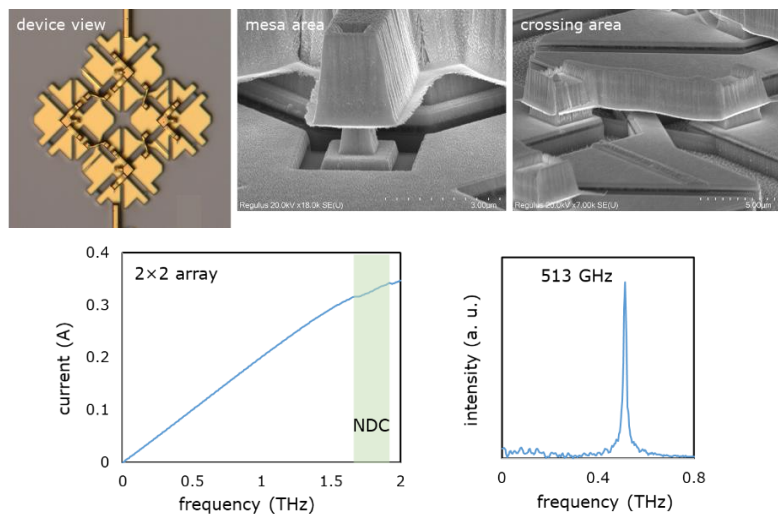


図11：作製した2×2アレイとその特性

最後に、このように作製したRTDメタマテリアルについて、光学素子である誘電体を用いた導波路と結合させた構造を作製し、誘電体導波路からの反射信号によってどのように特性が変化

するかを調べた。400 GHz 帯に単一のスペクトルを持つ発振素子を用いたところ、戻り信号によってコム状のスペクトルが現れることが分かった。自由空間上に意図的に戻り光を発生させた際にコム状のスペクトルが観測されることが分かっているが、集積化されたものでもこの現象が起こることを示したのはこの研究が初めてである。さらに、このコム状スペクトルの範囲は約 100GHz 程度に広く、自由空間上の光学系で組んだものが数 GHz であったことから、各段にコム帯域を拡大出来ていることが分かった。これは、誘電体導波路により効率的に戻り信号を生成できたためだと考えられる。コム発生は光の周波数領域で盛んに研究されているが、テラヘルツ帯においてコムを直接発生できるデバイスは報告される中では RTD が唯一である。これらコム発生は RTD の持つ電流電圧特性の非線形性、および、容量における非線形性も関連していると考えられるが、まだ、発生メカニズムは明確には明らかになっておらず、新たな分野として発展する可能性が期待される。

以上、RTD を用いた新たなアクティブメタマテリアルについて研究を行い、非発振型のデバイスからは増幅特性が得られ、また、メタ原子同士を結合したデバイスではコヒーレントな動作が得られることを実験と理論の両面から明らかにした。さらに、誘電体導波路との結合では、広帯域なコム状スペクトルが発生するなど新たな動作も明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 鈴木左文	4. 巻 65
2. 論文標題 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器とその無線通信応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 270-275
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1380/vss.65.270	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 Adrian Dobroiu, Kotaro Asama, Safumi Suzuki, Masahiro Asada, Hiroshi Ito	4. 巻 43
2. 論文標題 Terahertz-wave three-dimensional imaging using a resonant-tunneling-diode oscillator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 464-478
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10762-022-00863-5	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 Yusei Suzuki, Ta Van Mai, Xiongbin Yu, Safumi Suzuki, Masahiro Asada	4. 巻 12
2. 論文標題 Phase Control of Terahertz Waves Using Injection-Locked Resonant Tunneling Diode Oscillator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 481-488
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TTHZ.2022.3170516	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 Masahiro Asada, Safumi Suzuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Intrinsic Frequency Limit of Direct Modulation of Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Emitters and Effect of External Feedback Injection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv preprint	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2204.00731	査読の有無 無
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 鈴木左文	4. 巻 J106-C
2. 論文標題 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器の新世代技術	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 105-111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2022JC10013	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 Fanqi Meng, Feifan Han, Ulrich Kentsch, Alexej Pashkin, Ciaran Fowley, Lars Rebohle, Mark D Thomson, Safumi Suzuki, Masahiro Asada, Hartmut G Roskos	4. 巻 47
2. 論文標題 Coherent coupling of metamaterial resonators with dipole transitions of boron acceptors in Si	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 4969-4972
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.466392	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 該当する

1. 著者名 Mingxiang Stephen Li, Ta Van Mai, Christophe Fumeaux, Safumi Suzuki, Withawat Withayachumnankul	4. 巻 13
2. 論文標題 Terahertz Resonant-Tunneling Diode With Series-Fed Patch Array Antenna	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 178-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/THZ.2023.3239809	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 該当する

1. 著者名 Suzuki Yusei, Mai Ta Van, Yu Xiongbin, Suzuki Safumi, Asada Masahiro	4. 巻 Online
2. 論文標題 Phase Control of Terahertz Waves Using Injection-Locked Resonant Tunneling Diode Oscillator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	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/THZ.2022.3170516	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 該当する

1. 著者名 Van Ta Mai, Suzuki Yusei, Yu Xiongbn, Suzuki Safumi, Asada Masahiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Structure dependence of oscillation characteristics of structure-simplified resonant-tunneling-diode terahertz oscillator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 042003 ~ 042003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac5b32	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 該当する

1. 著者名 Bezhko Mikhail, Suzuki Safumi, Asada Masahiro	4. 巻 60
2. 論文標題 Analysis of output power characteristics for resonant-tunneling diode terahertz oscillator with cylindrical cavity resonator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 121002 ~ 121002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac3721	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 該当する

1. 著者名 Bezhko Mikhail, Suzuki Safumi, Iino Shota, Asada Masahiro	4. 巻 40
2. 論文標題 Fabrication of sub-micrometer 3D structures for terahertz oscillators by electron beam gray-tone lithography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science & Technology B	6. 最初と最後の頁 023206 ~ 023206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/6.0001647	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 該当する

1. 著者名 Tanaka Hiroki, Fujikata Hidenari, Han Feifan, Suzuki Safumi	4. 巻 63
2. 論文標題 Investigation of heat-dissipation structures in resonant tunneling diodes and their characteristics on terahertz oscillators	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 011004 ~ 011004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad169a	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 Han Feifan、Shimura Takumi、Tanaka Hiroki、Suzuki Safumi	4. 巻 16
2. 論文標題 Two coupled resonant-tunneling-diode oscillators with an air-bridged transmission line for high-power coherent terahertz radiation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 064003 ~ 064003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/acdb2d	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 Van Mai Ta、Asada Masahiro、Namba Tsuneyuki、Suzuki Yusei、Suzuki Safumi	4. 巻 13
2. 論文標題 Coherent Power Combination in a Resonant-Tunneling-Diode Arrayed Oscillator With Simplified Structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	6. 最初と最後の頁 405 ~ 414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/THZ.2023.3270672	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 Masahiro Asada、Safumi Suzuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Simple model for frequency response of a resonant tunneling diode caused by potential change of quantum well due to electron charge	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv preprint	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) 10.48550/arXiv.2305.17396	査読の有無 無
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63件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 31件)

1. 発表者名 Safumi Suzuki
2. 発表標題 Novel resonant-tunneling-diode terahertz oscillators and applications
3. 学会等名 The 8th International Conference on Antennas and Electromagnetic Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Safumi Suzuki
2. 発表標題 Recent developments of RTD THz oscillators in Japan
3. 学会等名 Int. School on Terahertz photonics and electronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Safumi Suzuki
2. 発表標題 Resonant Tunneling Diode Technology for Future Terahertz Applications
3. 学会等名 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Tanaka, Hidenari Fujikata, Feifan Han, Akira Ishikawa, Safumi Suzuki and Masahiro Asada
2. 発表標題 Successful operation of large-area resonant tunneling diodes without heat destruction by introducing a heat-dissipation InP conduction layer
3. 学会等名 Int. Conf. Solid State Devices Materials (SSDM) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hidenari Fujikata, Hiroki Tanaka, Feifan Han, Akira Ishikawa, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada
2. 発表標題 Terahertz Oscillator Using Rectangular-Cavity Resonator And Large-Area RTD With Heat Dissipation Structure
3. 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Adrian Dobroiu, Jia Ito, Safumi Suzuki, Masahiro Asada, and Hiroshi Ito
2 . 発表標題 Real-time Subcarrier FMCW Radar In The Terahertz Range Based On A Resonant-tunneling-diode Oscillator: Evaluation And Demonstration
3 . 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Feifan Han, Hidenari Fujikata, Hiroki Tanaka, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada
2 . 発表標題 High-Power Cavity-Type RTD THz Oscillators Integrated With Impedance-Matched Slot Antenna
3 . 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Fanqi Meng, Feifan Han, Ulrich Kentsch, Alexej Pashkin, Ciaran Fowley, Lars Rebohle, Mark D. Thomson, Safumi Suzuki, Masahiro Asada, and Hartmut G. Roskos
2 . 発表標題 Coherent Coupling Of A Metamaterial Resonator With Hydrogen-like Acceptor Impurities In Si
3 . 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. V. Mai, T. Namba, Y. Suzuki, S. Suzuki and M. Asada
2 . 発表標題 Array Configuration for High Output Power in Structure-simplified Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator
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 Masahiro Asada and Safumi Suzuki
2. 発表標題 Ultimate Frequency Limit of Direct Modulation in Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Emitters
3. 学会等名 Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 W Prost, K Arzi, S Clochiatti, E Mutlu, S Suzuki, M Asada, Nils Weimann
2. 発表標題 Triple barrier resonant tunneling diodes for THz emission and sensing
3. 学会等名 SPIE Optical Engineering + Applications, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications XIII, Proceedings Volume 12230 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mai Van Ta, Tetsuyuki Namba, Yusei Suzuki, Safumi Suzuki, Masahiro Asada
2. 発表標題 Oscillation frequency increase in structure simplified RTD oscillator with array configuration
3. 学会等名 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 Adrian Dobroiu, Jia Ito, Safumi Suzuki, Masahiro Asada, Hiroshi Ito
2. 発表標題 Demonstration of a real-time terahertz-wave radar based on a resonant-tunneling-diode oscillator
3. 学会等名 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 Feifan Han, Hidenari Fujikata, Hiroki Tanaka, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada
2. 発表標題 High-Power Cavity-Type RTD THz Oscillators Integrated with Slot Antenna
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中大基、藤方秀成、韓非凡、石川暁、鈴木左文
2. 発表標題 放熱と低導体損のための厚いInP導電層を用いた高出力共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器
3. 学会等名 電子デバイス研究会・マイクロ波テラヘルツ光電子技術研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 大基、藤方 秀成、韓 非凡、石川 暁、鈴木 左文
2. 発表標題 導体損失を削減した空洞共振器型共鳴トンネルダイオード発振器からの高出力テラヘルツ放射
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 太一、浅田 雅洋、鈴木 左文
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオードプッシュプッシュテラヘルツ発振器の提案
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 マイ ヴァン タ、難波経之、鈴木左文
2. 発表標題 オフセット給電スロットアンテナ集積共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器の2素子アレイ
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木左文、浅田雅洋
2. 発表標題 テラヘルツ帯共鳴トンネルダイオードの進展と展望
3. 学会等名 ワイドギャップ半導体学会 第10回研究会 テラヘルツ・高周波デバイスの進展・新技術とB5G/6G無線通信へ向けた展望（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木左文
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器とレーダー・3Dイメージング応用
3. 学会等名 第67回 光波センシング技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木左文
2. 発表標題 未来のテラヘルツ応用のための共鳴トンネルダイオード発振器
3. 学会等名 シリコン材料・デバイス研究会、先端CMOSデバイス・プロセス技術（IEDM特集）（招待講演）
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Safumi Suzuki
2 . 発表標題 Proposal of stable operation of resonant tunneling diodes satisfying non-oscillation condition in terahertz frequency range
3 . 学会等名 Int. Conf. Solid State Devices Materials (SSDM) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Mai Van Ta, Yusei Suzuki, Keiji Kozaka, Xiongbn Yu, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada
2 . 発表標題 Structure Dependence Of RTD Oscillator Without MIM Capacitors
3 . 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Adrian Dobroiu, Kotaro Asama, Safumi Suzuki, Masahiro Asada, and Hiroshi Ito
2 . 発表標題 Three-dimensional Terahertz Imaging Using An Amplitude-modulated Resonant-tunneling-diode Oscillator
3 . 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Jia Ito, Adrian Dobroiu, Safumi Suzuki, Masahiro Asada, and Hiroshi Ito
2 . 発表標題 Real-time Distance Measurement Using A Subcarrier FMCW Radar Based On A Terahertz-wave Resonant-tunneling-diode Oscillator
3 . 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Mikhail Bezhko, Shota Iino, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada
2. 発表標題 Frequency Increase In Resonant-Tunneling Diode Cavity-type Terahertz Oscillator
3. 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mingxiang Stephen Li, Safumi Suzuki, Christophe Fumeaux, and Withawat Withayachumnankul
2. 発表標題 Improving The Radiation Performance Of Resonant-Tunneling Diode By Using Planar Metallic Arrays
3. 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hidenari Fujikata, Feifan Han, Kazunori Kobayashi, Hiroki Tanaka, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada
2. 発表標題 Oscillations At 300-400 GHz In Structure-Simplified Resonant-Tunneling-Diode Oscillators With Rectangular-Cavity Resonators
3. 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusei Suzuki, Mai Van Ta, Xiongbin Yu, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada
2. 発表標題 Phase Control Of Injection-Locked RTD Terahertz Oscillator
3. 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiongbin Yu, Tetsuya Miyagawa, Yusei Suzuki, Mai Van Ta, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada
2. 発表標題 Perimeter Dependence Of Oscillation Frequency Property Of Resonant Tunneling Diode Terahertz Oscillator Using Split Ring Resonator
3. 学会等名 Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Asada and Safumi Suzuki
2. 発表標題 Recent progress of terahertz emitters using resonant tunneling diodes
3. 学会等名 RJUSE TeraTech (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mai Van Ta, Yusei Suzuki, Keiji Kozaka, Xiongbin Yu, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada
2. 発表標題 Resonant-tunneling-diode oscillator array with zigzag arrangement for terahertz power combination
3. 学会等名 RJUSE TeraTech (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mikhail Bezhko, Shota Iino, Safumi Suzuki, Masahiro Asada
2. 発表標題 Frequency Increase in Resonant-Tunneling Diode Cavity-type Terahertz Oscillator
3. 学会等名 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 Mai Van Ta、Yusei Suzuki、Xiongbn Yu、Safumi Suzuki、Masahiro Asada
2. 発表標題 High output powers of structure-simplified RTD oscillators with offset-fed slot and coplanar stripline antennas
3. 学会等名 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 雄成、マイ ヴァンタ、兪 熊斌、鈴木 左文、浅田 雅洋
2. 発表標題 注入同期による共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器の位相制御
3. 学会等名 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 藤方 秀成、韓 非凡、小林 和憲、田中 大基、鈴木 左文、浅田 雅洋
2. 発表標題 矩形型空洞共振器を集積したTHz共鳴トンネルダイオード発振器の作製と評価
3. 学会等名 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 伊藤 滋亜、ドロコ アドリアン、鈴木 左文、浅田 雅洋、伊藤 弘
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器を用いたサブキャリアFMCWレーダによるリアルタイム距離測定
3. 学会等名 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 Mai Van Ta, Tsuneyuki Namba, Yusei Suzuki, Safumi Suzuki, and Masahiro Asada
2. 発表標題 Resonant-tunneling-diode oscillator array with zigzag arrangement for terahertz power combination
3. 学会等名 テラヘルツ応用システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Asada and Safumi Suzuki
2. 発表標題 Recent Progress of Resonant-Tunneling-Diode THz Emitters
3. 学会等名 International Symposium on Future Trends of Terahertz Semiconductor Technologies (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 大基、藤方 秀成、韓 非凡、石川 暁、鈴木 左文、浅田 雅洋
2. 発表標題 放熱用InP導電層導入による共鳴トンネルダイオードの大面积動作
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤方 秀成、韓 非凡、石川 暁、田中 大基、鈴木 左文、浅田 雅洋
2. 発表標題 放熱構造を持つ矩形空洞共振器集積共鳴トンネルダイオードTHz発振器
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Adrian Dobroiu, Safumi Suzuki, Masahiro Asada
2. 発表標題 Terahertz-wave radar and imaging based on resonant tunneling diode oscillators
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. V. Mai, T. Namba, S. Suzuki
2. 発表標題 Two-element array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillator integrated with offset-fed slot antenna
3. 学会等名 The 35th URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Suzuki, T. Namba, T. V. Mai
2. 発表標題 Multi-Element Structure-simplified Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator Array
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Terahertz-Related Devices and Technologies (TeraTech 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Suzuki
2. 発表標題 Developments and future prospects of THz resonant tunneling diodes
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Terahertz-Related Devices and Technologies (TeraTech 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Suzuki
2 . 発表標題 Resonant Tunneling Diode Technology for Future THz Applications
3 . 学会等名 The 26th edition of the European Microwave Week (EuMW 2023) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 M. Asada, S. Suzuki
2 . 発表標題 Reduction Of Spectral Linewidth Of Resonant-Tunneling Diode THz Oscillators Due To External Feedback
3 . 学会等名 The 48th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Endo, S. Suzuki
2 . 発表標題 Terahertz Resonant-Tunneling-Diode Oscillator With Coupled OffsetFed Slot-Ring Antenna Pairs
3 . 学会等名 The 48th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 T. Sato, T. Mai, S. Suzuki
2 . 発表標題 Limit Of Oscillation Frequency In Two-element Slot-ring Type RTD Oscillator Array
3 . 学会等名 The 48th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Suzuki
2. 発表標題 Terahertz Resonant-Tunneling Diodes
3. 学会等名 The 20th International Conference on IC Design and Technology (ICIDT) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木左文
2. 発表標題 テラヘルツ共鳴トンネルダイオードの技術進展
3. 学会等名 テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会第53回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木左文
2. 発表標題 テラヘルツ共鳴トンネルダイオード発振器
3. 学会等名 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会5月研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 遠藤匠永, 鈴木左文
2. 発表標題 2つのリングスロットアンテナを集積したオフセット給電共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振デバイス
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 リガケイ, Dobroiu Adrian, 鈴木左文
2. 発表標題 テラヘルツ3DイメージングのためのRTD発振器ドットプロジェクター
3. 学会等名 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 志村拓海, 韓非凡, 田中大基, 鈴木左文
2. 発表標題 2つのRTDと空洞共振器を結合した高出力コヒーレントテラヘルツ発振器
3. 学会等名 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 Zhenling Tang, Safumi Suzuki
2. 発表標題 Two-dimensionally arrayed resonant-tunneling-diode terahertz oscillator
3. 学会等名 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 吉田裕二, 佐藤太一, 浅田雅洋, 鈴木左文
2. 発表標題 2次高調波の出力向上のためのオフセットリングスロット集積共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器
3. 学会等名 シンポジウムテラヘルツ科学の最先端X
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 八重樫暁, ドブロコ アドリアン, 鈴木左文
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器を用いたサブキャリアFMCWレーダーによる3Dイメージング
3. 学会等名 シンポジウムテラヘルツ科学の最先端X
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中大基, 藤方秀成, 韓非凡, 志村拓海, 鈴木左文
2. 発表標題 空洞共振器型RTD発振器によるミリワット級高出力テラヘルツ発振
3. 学会等名 電子デバイス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 韓非凡, 志村拓海, 田中大基, 鈴木左文
2. 発表標題 2つのRTDを空洞共振器内に集積した共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器の出力向上
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 遠藤匠永, 鈴木左文
2. 発表標題 2つのオフセット給電スロットリングアンテナを集積した共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器のミリワット高出力動作
3. 学会等名 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 リガケイ, ドプロコ アドリアン, 鈴木左文
2. 発表標題 RTD発振器ドットプロジェクターを用いたテラヘルツイメージングにむけた予備実験
3. 学会等名 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 鈴木左文
2. 発表標題 電子デバイスを用いた高出力テラヘルツ信号源の開発
3. 学会等名 テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計5件

1. 著者名 監修：斗内政吉、第二章著者：鈴木左文、浅田雅洋	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 317
3. 書名 テラヘルツ波産業創成の課題と展望	

1. 著者名 監修：川西哲也、第4-1節著者：鈴木左文	4. 発行年 2023年
2. 出版社 S&T出版	5. 総ページ数 238
3. 書名 6G/7Gのキーデバイス	

1. 著者名 Chap. 9 by S. Suzuki, M. Asada. Edited by Gun-Sik Park, Masahiko Tani, Jae-Sung Rieh, Sang Yoon Park	4. 発行年 2024年
2. 出版社 Jenny Stanford Publishing	5. 総ページ数 772
3. 書名 Advances in Terahertz Source Technologies	

1. 著者名 Sec. 24 by Masahiro Asada, Safumi Suzuki. Edited by Thomas Kurner, Daniel M. Mittleman, Tadao Nagatsuma	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 531
3. 書名 THz Communications	

1. 著者名 Chap. 11 by Masahiro Asada, Safumi Suzuki. Edited by Dimitris Pavlidis.	4. 発行年 2021年
2. 出版社 John Wiley & Sons, Ltd	5. 総ページ数 554
3. 書名 Fundamentals of Terahertz Devices and Applications	

〔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
---------	---------

ドイツ	Goethe-University of Frankfurt am Main			
オーストラリア	University of Adelaide			