

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02540

研究課題名（和文）光共振器中の超伝導体ジョセフソン接合におけるテラヘルツ帯レーザー発振の実証

研究課題名（英文）Demonstration of terahertz lasers utilizing superconducting Josephson junctions in optical resonators

研究代表者

辻本 学（Tsuji moto, Manabu）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：20725890

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高温超伝導体の固有ジョセフソン接合と光共振器を結合させ、テラヘルツ帯レーザー発振の観測を試みた。前半では、単結晶メサの不均一性と固有接合の自発的な同期に着目し、不均一性の小さい素子で高強度なテラヘルツ波が得られることを見出し、高性能な素子の設計指針を得た。後半では、メサと外部共振器の電磁結合に着目し、平面マイクロストリップ共振器を実装した。実験の結果、三角形パッチ共振器と接続した素子で広範囲な周波数可変性を実証した。高効率な発振は観測されなかったが、低温領域でインピーダンス整合を示唆するプラトー挙動を観測し、外部共振器を介した固有接合型テラヘルツ光源の制御手法を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子状態の操作や読み出しに最適な超伝導素子は、量子計算に限らず微小信号計測などの基本素子として、最先端の科学技術基盤の形成に貢献している。最近、ジョセフソン接合素子を用いたレーザー発振が報告されており、本研究の実施はこうした新しい用途の超伝導素子の誕生につながることで期待される。発振可能な1テラヘルツ付近の電磁波は光と電波の特徴を合わせ持ち、非破壊イメージングや高速無線通信、センシングなどの身近な技術への応用が注目されている。このように、超伝導レーザーは画期的なテラヘルツ波の発生方法であり、学術的な新規性や創造性に優れるだけでなく、社会利便性の向上にも貢献するものと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, I investigated terahertz laser emission using high-temperature superconducting Josephson junctions coupled to external optical resonators. The first part focused on studying the inhomogeneity of single-crystal mesas and the synchronization of intrinsic junctions. Small inhomogeneities were found to enable high-intensity terahertz wave emission, offering valuable design guidelines for high-performance devices. In the second part, I explored the electromagnetic coupling between superconducting mesas and external planar microstrip resonators. The experiments demonstrated wide frequency tunability in devices connected to triangular patch resonators, although high-efficiency oscillation was not observed. Overall, this study enhances our understanding of terahertz laser emission and provides insights into optimizing device performance through design guidelines and control methods.

研究分野：超伝導量子デバイス工学

キーワード：高温超伝導体 固有ジョセフソン接合 超伝導量子デバイス テラヘルツ波 レーザー発振

### 1. 研究開始当初の背景

量子状態の読み出しや操作に適した超伝導素子は、微小信号計測や量子計算用途の基本素子として、最先端の科学技術の基盤形成に貢献している。研究代表者はこれまで、超伝導素子を用いた高性能光源の開発を行ってきた。光のコヒーレンスを積極的に利用した基礎実験としては、フォトンの誘導放出による光増幅作用、いわゆるレーザー発振実験が有名である。超伝導素子の場合、超伝導体絶縁体超伝導体からなるジョセフソン接合が高周波共振器と強く結合した際に、レーザー発振に類似するマイクロ波増幅作用が観測されている[1]。しかし、超伝導レーザー発振の特徴や原理は未だ解明されておらず、実用光源としての潜在性能も不明である。

最近、研究代表者を含む複数の研究グループによって、高温超伝導体のナノ構造からのテラヘルツ帯の電磁波放射の観測が実証された。現在までに得られている最大放射出力は数マイクロワットレベルであり、実用的な光源として使用するためにはミリワット級の高強度化が求められている。そこで研究代表者は、高強度かつ高コヒーレントなフォトンを大量生成できるレーザー発振を実現することで、上記課題を解決できると考えた。

周波数が1テラヘルツ(=10<sup>12</sup> Hz)帯の電磁波は、光と電波の長所を兼ね備えており、非破壊イメージング、高感度センシング、分光分析、医療診断などへの応用が期待されている。現在、半導体分野を中心にテラヘルツ光源の開発が進められているが、高強度なテラヘルツ波を発生できる光源は限られているため、テラヘルツ波の利用普及は停滞している。本研究で実証を目指す超伝導レーザーは、新物質と新原理に基づいた画期的なテラヘルツ波の発生方法であり、超伝導レーザーの実証によって、テラヘルツ技術に革命的な進歩をもたらすことが期待される。

### 2. 研究の目的

超伝導体ジョセフソン接合から放射されるテラヘルツ波の周波数は、ジョセフソン関係式と内部空洞共振条件で決まる。最近の研究では、発振周波数は熱浴温度にも依存することが明らかにされている[6,7]。発振周波数の連続可変性能はテラヘルツミキサの局部発振器としての応用に向いている。一方、ジョセフソン周波数が共振条件から外れると放射強度はゼロになるか、あるいは著しく低下することが知られている。この課題の解決に向けて、本研究ではサブテラヘルツ帯のマイクロストリップ共振器を高温超伝導体メサと結合させることで、超伝導体と真空のインピーダンス不整合を改善し、共振器を介して光源の特性を制御する技術を開発する。共振器を用いてテラヘルツ波の放射特性を制御する試みは過去に行われておらず、周辺構造の付与によって性能の安定化や、レーザー発振などの新機能発現が期待できる。本研究の究極的な目標は、超伝導体ジョセフソン接合と結合した共振器を用いてテラヘルツ波の放射効率を高め、連鎖反動的な誘導放出に基づいたレーザー発振の実証を行うことである。本研究ではその前段階として、超伝導体ジョセフソン接合と結合するサブテラヘルツ帯の共振器を実装することを目的として研究を実施した。

### 3. 研究の方法

高品質なピスマス系銅酸化物高温超伝導体 **Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+</sub>** (以後、**Bi-2212** と略記)の単結晶は、天然に積層した固有ジョセフソン接合を形成している。研究代表者はこれまで、**Bi-2212**の固有ジョセフソン接合を含むメサ構造を用いたテラヘルツ光源の研究に関して、幾何学的共振条件[3]、テラヘルツ波の広帯域チューニング[4]、及び温度分布制御による高強度化[5]などの諸特性を明らかにしてきた。これらの知見を基に本研究で作製する **Bi-2212** メサ型テラヘルツ光源の概略図を図1(a)に示す。**Bi-2212**の単結晶は溶媒移動型帯溶融法で作製した。単結晶のドーピングレベルは微量酸素を含むアルゴンガス雰囲気中のアニール処理で調整した。アニール後、熱伝導性銀ペーストを用いて単結晶をサファイア基板に接着し、テープへき開した結晶面に真空蒸着法で銀電極を蒸着した。その後、紫外線リソグラフィとアルゴンイオンミリングで単結晶表面にサブマイクロンサイズの矩形メサをパターニングした。メサの寸法は原子間力顕微鏡のプロファイル計測などで評価した。

上記の従来プロセスに加えて、本研究では図1(a)の黄色で示す二対の三角形パッチからなるマイクロストリ

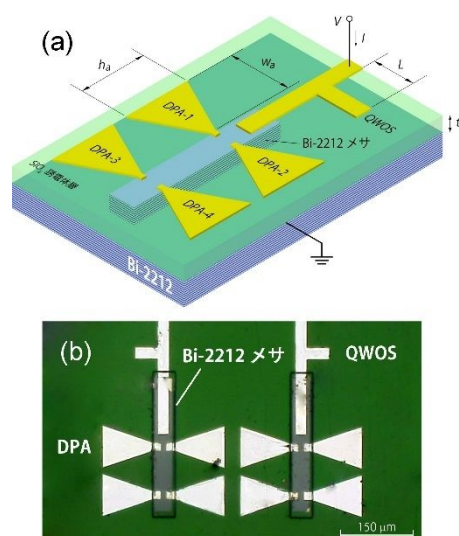


図1: 高温超伝導体 **Bi-2212** の単結晶を使ったコヒーレントテラヘルツ光源の(a)模式図、及び(b)光学顕微鏡写真。

ップ共振器を作製した。以降、この三角形パッチ部を **DPA** (デルタパッチアンテナ) と呼ぶ。**DPA** は広帯域特性を持つ自己補完型モノポールアンテナであり、**DPA** の小さいインピーダンス特性は超伝導体発振器との結合で有利に働く。**DPA** の誘電体下地層は、厚さ **600 nm** の **SiO<sub>2</sub>** 層を採用した。**DPA** のパターンングはリフトオフ法で行った。さらに、本研究ではバイアス電極と一体化した四分の一波長オープンスタブ (**QWOS**) を実装した。**QWOS** はメサ部で発生した交流電力が電極のストリップラインを介してグラウンド側に散逸されるのを防ぐノッチフィルタの役割を持つ。**DPA** の設計パラメータは図 **1(a)** に示すパッチ幅 ( $w_a$ )、パッチ高さ ( $h_a$ ) 及び誘電体層の厚さ ( $t_a$ ) である。これらの値は電磁界シミュレータ **Sonnet** を用いて決定した。

作製した **DPA** 及び **QWOS** を実装した **Bi-2212** メサの光学顕微鏡写真を図 **1(b)** に示す。本研究では、同一基板上に **4** つのメサを作製し、それらの特性を比較することで素子間の特性ばらつきを評価した。素子特性は **Gifford-McMahon** 型クライオクーラーを搭載した光学式クライオスタットを用いて評価した。電流電圧特性はデジタルマルチメータなど標準的な電子機器を用いて測定した。クライオスタットの光学窓から放射されるテラヘルツ波の強度はシリコンボロメータで測定した。発振スペクトルの測定ではスプリットミラー式フーリエ変換型干渉計を使用した。

#### 4. 研究成果

図 **2(a)** に電流電圧特性の熱浴温度依存性を示す。挿入図は **10 K** における電流電圧特性の全体像を示す。矢印で示された経路に沿って、ヒステリシスを伴うループ曲線が描かれている。臨界電流値 **13.0 mA** で不可逆のジャンプが生じ、ゼロ電圧状態から有限電圧状態にスイッチする。有限電圧状態では、交流ジョセフソン効果によって単結晶内部に振動電流が励起され、それが放射源となってテラヘルツ波が放射される。同図では、電流電圧特性と同時に測定したシリコンボロメータの出力をカラープロットで示している。矢印は各熱浴温度でボロメータ出力が最大となるバイアス点を指している。測定した同一基板上的全てのメサにおいて、超伝導転移温度以下の広い温度範囲で再現性の高い安定な放射を観測した。

図 **2(b)** では、発振スペクトルの熱浴温度依存性をプロットした。これらのデータは最大のボロメータ出力が得られるバイアス点で測定した (図 **2(a)** 矢印参照)。図 **2(b)** の矢印は発振スペクトルの中心周波数として定義した発振周波数を表している。任意の熱浴温度において、発振周波数は印加電圧から見積もられるジョセフソン周波数と一致する。

図 **3(a)** 及び図 **3(b)** では、発振周波数と発振強度の熱浴温度依存性をプロットした。**A1** から **A4** は同一基板上に作製した異なるメサを指している。図に示す通り、全てのメサはほぼ均一の発振特性を示した。わずかな発振特性の差異は、**Bi-2212** の超伝導転移温度や超伝導臨界電流値といった物性値の単結晶内部の不均一性に起因している。

図 **3(a)** で示す通り、熱浴温度が **40 K** より低い場合、発振周波数がおおよそ **0.85 THz** の一定値を示すプラトーが確認できた。一方、**40 K** より高温側では発振周波数は単調に減少している。また、図 **3(b)** が示す通り、**30 K** と **65 K** の温度で発振強度が最大値を示した。図 **3(b)** の破線は、この **2** つのピーク構造をわかりやすく図示している。発振強度と周波数測定の結果から、それぞれのピークがメサをはさんで向かい合った **DPA** の異なる共振モードであることがわかった。標準的なアンテナ理論では、**2** つのモノポールアンテナの対は単一のダイポールアンテナと等価

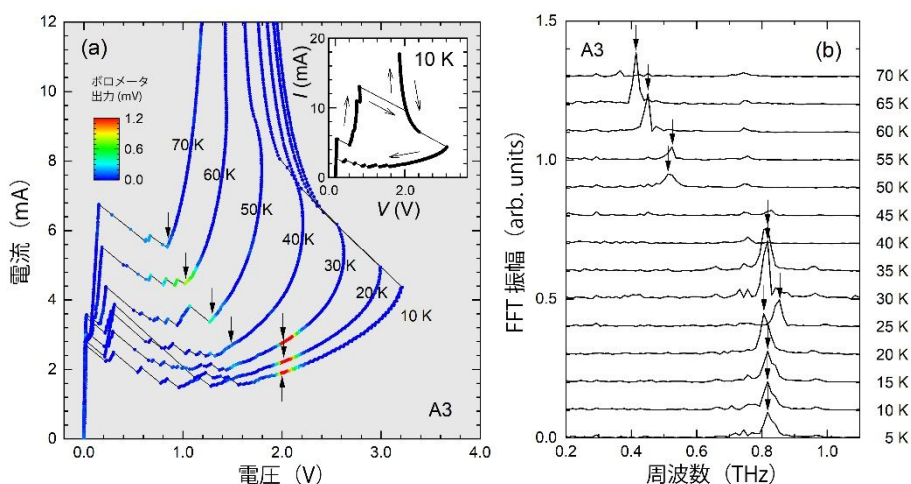


図 2 : (a) **Bi-2212** メサの電流電圧特性の熱浴温度依存性。プロットの色は同時測定したシリコンボロメータの出力を示す。挿入図は **10 K** における電流電圧特性の全体図。(b) 発振スペクトルの熱浴温度依存性。

である。よって、DPA の対はインピーダンスの小さい Bi-2212 メサを介して結合し、一つのダイポールアンテナとして振る舞うことが可能である。ダイポールアンテナの基本モード周波数は DPA 単体の基本モードのちょうど半分であり、30 K と 65 K のピークと良い一致を示した。共振モードをさらに詳しく解析するためには、放射テラヘルツ波の指向性と偏波特性を調べることが有効である。共振モードを解析することで、Bi-2212 メサと共振器の結合に関する知見が得られると期待している。

本研究では、高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  の単結晶を用いたテラヘルツ光源と、その周辺のマイクロストリップ共振器の結合について実験的な検証を行った。具体的には、三角形パッチ共振器と四分の一波長オープスタブを単結晶メサと接続し、周辺構造を介した発振特性の制御を試みた。実験の結果、広範囲で可変な周波数特性を持つ素子を実現したが、当初期待していたレーザー発振に付随する放射出力の飛躍的な向上は認められなかった。一方で、熱浴温度を変えながら発振スペクトルを精緻に測定した結果、低温領域での発振周波数のプラトー挙動と、発振強度の 2 ピーク構造を観測できた。これら一連の結果は、サブテラヘルツ帯のマイクロストリップ共振器と超伝導体ジョセフソン接合との相互作用を示唆している。本研究の実施で得られた知見は、小型かつモノリシクな超伝導体テラヘルツ光源のさらなる性能向上や、多機能化の実現につながると考えている。今後は、共振器の設計や機能を高度化させることで、高強度かつ高コヒーレントな特性を有する超伝導体テラヘルツ光源の創製を実現したい。

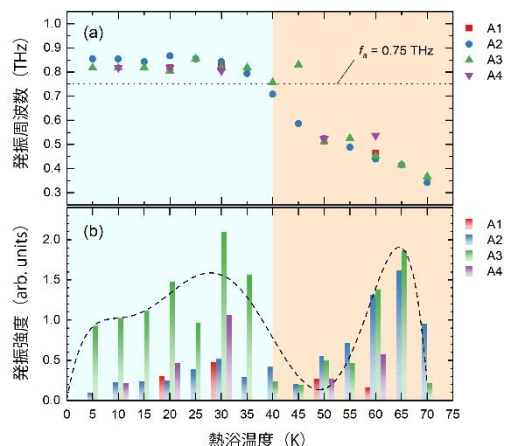


図 3 : (a)発振周波数及び(b)発振強度の熱浴温度依存性。同一単結晶基板上に作製した 4 つのメサ A1 から A4 の特性をプロットした。

#### <引用文献>

- [1] M. C. Cassidy, A. Bruno, S. Rubbert, M. Irfan, J. Kammhuber, R. N. Schouten, A. R. Akhmerov, and L. P. Kouwenhoven, *Demonstration of an Ac Josephson Junction Laser*, *Science* **355**, 939 (2017).
- [2] L. Ozyuzer et al., *Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors*, *Science* **318**, 1291 (2007).
- [3] M. Tsujimoto, K. Yamaki, K. Deguchi, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki, K. Kadowaki, and R. A. Klemm, *Geometrical Resonance Conditions for THz Radiation from the Intrinsic Josephson Junctions in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$* , *Phys. Rev. Lett.* **105**, 037005 (2010).
- [4] M. Tsujimoto et al., *Broadly Tunable Sub-Terahertz Emission from Internal Current-Voltage Characteristic Branches Generated from  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$* , *Phys. Rev. Lett.* **108**, 107006 (2012).
- [5] M. Tsujimoto, H. Kambara, Y. Maeda, Y. Yoshioka, Y. Nakagawa, and I. Kakeya, *Dynamic Control of Temperature Distributions in Stacks of Intrinsic Josephson Junctions in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  for Intense Terahertz Radiation*, *Physical Review Applied* **2**, 044016 (2014).
- [6] T. M. Benseman, A. E. Koshelev, K. E. Gray, W.-K. Kwok, U. Welp, K. Kadowaki, M. Tachiki, and T. Yamamoto, *Tunable Terahertz Emission from  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  mesa Devices*, *Phys. Rev. B Condens. Matter Mater. Phys.* **84**, 064523 (2011).
- [7] I. Kakeya, N. Hirayama, Y. Omukai, and M. Suzuki, *Temperature Dependence of Terahertz Emission by an Asymmetric Intrinsic Josephson Junction Device*, *J. Appl. Phys.* **117**, 043914 (2015).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Genki Kuwano, Manabu Tsujimoto, Youta Kaneko, Kanae Nagayama, Takayuki Imai, Yukino Ono, Shinji Kusunose, Takuya Yuhara, Hidetoshi Minami, Takanari Kashiwagi, and Kazuo Kadowaki	4. 巻 129
2. 論文標題 Experimental validation of a microstrip antenna model for high-Tc superconducting terahertz emitters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 223905-(1-6)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0054018	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 辻本学, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男	4. 巻 121
2. 論文標題 高温超伝導体単結晶を使ったコヒーレントテラヘルツ量子光源の創製	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 30-33
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 Manabu Tsujimoto, Youta Kaneko, Genki Kuwano, Kanae Nagayama, Takayuki Imai, Yukino Ono, Shinji Kusunose, Takanari Kashiwagi, Hidetoshi Minami, Kazuo Kadowaki, Yilmaz Simsek, Ulrich Welp, and Wai-Kwong Kwok	4. 巻 29
2. 論文標題 Design and characterization of microstrip patch antennas for high-Tc superconducting terahertz emitters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 16980-16990
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.420417	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 該当する
1. 著者名 T. M. Benseman, A. E. Koshelev, V. Vlasko-Vlasov, Y. Hao, U. Welp, W.-K. Kwok, B. Gross, M. Lange, D. Koelle, R. Kleiner, H. Minami, M. Tsujimoto, and K. Kadowaki	4. 巻 100
2. 論文標題 Observation of a two-mode resonant state in a Bi2Sr2CaCu2O8+ mesa device for terahertz emission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144503-(1-14)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.144503	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 G. Kuwano, M. Tsujimoto, Y. Kaneko, T. Imai, Y. Ono, S. Nakagawa, S. Kusunose, H. Minami, T. Kashiwagi, K. Kadowaki, Y. Simsek, U. Welp, and W.-K. Kwok	4. 巻 13
2. 論文標題 Mesa-sidewall effect on coherent terahertz radiation via spontaneous synchronization of intrinsic Josephson junctions in Bi2Sr2CaCu2O8+	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014035-(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.13.014035	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

〔学会発表〕 計57件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 鈴木祥平, 桑野玄気, 永山佳苗, 齋藤佑真, 山口啄弥, 湯原拓也, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男, 辻本学
2. 発表標題 Bi-2212固有接合型テラヘルツ光源アレイのストークス偏波パラメータ測定
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Kuwano, K. Nagayama, S. Shouhei, T. Yuhara, T. Kashiwagi, H. Minami, K. Kadowaki, and M. Tsujimoto
2. 発表標題 Mesa sidewall effects on synchronization of intrinsic Josephson junctions in high-Tc superconducting Bi2Sr2CaCu2O8+d terahertz emitters
3. 学会等名 The 12th International Conference on Intrinsic Josephson Effect and Horizons of Superconducting Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻本学
2. 発表標題 高温超伝導体単結晶の積層固有ジョセフソン接合系におけるテラヘルツ発振現象の研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑野玄気, 永山佳苗, 鈴木祥平, 湯原拓也, 齋藤佑真, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男, 辻本学
2. 発表標題 固有ジョセフソン接合型テラヘルツ発振素子のメサ台形歪みと放射特性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木祥平, 桑野玄気, 永山佳苗, 齋藤佑真, 山口啄弥, 湯原拓也, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男, 辻本学
2. 発表標題 Bi-2212固有接合型テラヘルツ光源アレイのストークス偏波パラメータ測定
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻本学, 齋藤嘉人, 高野義彦, 掛谷一弘
2. 発表標題 Bi-2212ウィスカ十字接合テラヘルツ発振素子の三次元電磁界シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川駿吾, 柏木隆成, 中山繭, 金正赫, 辻本学, 中尾裕則, 石田茂之, 永崎洋, 長谷川幸雄, 木村尚次郎, 茂筑高士, 門脇和男
2. 発表標題 Bi-Sr比とPb置換量を制御したBi2212単結晶の超伝導転移温度のホール濃度依存性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤準一朗, 石田茂之, 永崎洋, 中川駿吾, 辻本学, 柏木隆成, 西尾太一郎
2. 発表標題 Bi <sub>2+x</sub> Sr <sub>2-x</sub> Ca <sub>1-y</sub> Y <sub>y</sub> Cu <sub>2</sub> O <sub>8+</sub> 単結晶における臨界電流密度のドーピング量依存性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 掛谷一弘, 前田慶一郎, 巴山顕, 栗山由也, アセムエルアラビ, 辻本学, 浅井栄大
2. 発表標題 固有ジョセフソン接合メサ構造の臨界電流分布制御による円偏光テラヘルツ波放射
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻本学, 藤田秀眞, 桑野玄気, 前田慶一郎, アセムエルアラビ, 掛谷一弘
2. 発表標題 Bi-2212固有接合系における巨視的ジョセフソン振動の相互同期
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑野玄気, 永山佳苗, 鈴木祥平, 楠瀬慎二, 湯原拓也, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男, 辻本学
2. 発表標題 Bi-2212固有ジョセフソン接合型テラヘルツ発振素子におけるメサ周辺構造の影響
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 巴山顕, 藤田秀真, 前田慶一郎, 辻本学, 掛谷一弘
2. 発表標題 Bi2212メサアレイからのテラヘルツ偏光測定による相互同期解析II
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南英俊, 楠瀬慎二, 湯原拓也, 齋藤佑真, 桑野玄気, 永山佳苗, 柏木隆成, 辻本学, 門脇和男
2. 発表標題 スロットアレイに結合したBi2212メサアレイからのTHz波放射
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柏木隆成, 桑野玄気, 中川駿吾, 楠瀬慎二, 中山繭, Kim Jeonghyuk, 永山佳苗, 湯原拓也, 山本卓, 辻本学, 南英俊, 門脇和男
2. 発表標題 固有ジョセフソン接合素子アレイを用いたテラヘルツ波発振器の開発 II
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山繭, 柏木隆成, 中川駿吾, Kim Jeonghyuk, 桑野玄気, 楠瀬慎二, 辻本学, 南英俊, 茂筑高士, 中尾裕則, 石田茂之, 永崎洋, 長谷川幸雄, 門脇和男
2. 発表標題 Bi2212-THz波発振器の発振特性と材料特性の関係
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑野玄気, 永山佳苗, 鈴木祥平, 楠瀬慎二, 湯原拓也, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男, 辻本学
2. 発表標題 Bi-2212固有ジョセフソン接合列の特性分布制御とコヒーレントなテラヘルツ波放射
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 湯原拓也, 南英俊, 楠瀬慎二, 齋藤佑真, 桑野玄気, 永山佳苗, 柏木隆成, 辻本学, 門脇和男
2. 発表標題 方形パッチアンテナと共平面結合したBi2212固有ジョセフソン接合系のテラヘルツ発振
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 2021年

1. 発表者名 中川駿吾, 柏木隆成, 中山繭, Kim Jeonghyuk, 山口啄弥, 桑野玄気, 楠瀬慎二, 辻本学, 南英俊, 中尾裕則, 茂筑高士, 石田茂之, 永崎洋, 長谷川幸雄, 木村尚次郎, 門脇和男
2. 発表標題 Bi2212-THz波発振器におけるデバイス特性の材料組成依存性の研究
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 2021年

1. 発表者名 柏木隆成, Kim Jeonghyuk, 中川駿吾, 中山繭, 山口啄弥, 松前貴司, 倉島優一, 日暮栄治, 高木秀樹, 森龍也, 桑野玄気, 楠瀬慎二, 永山佳苗, 湯原拓也, 齋藤佑真, 鈴木祥平, 辻本学, 南英俊, 門脇和男
2. 発表標題 基板接合技術を用いた高温超伝導体テラヘルツ波発振器の開発
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 2021年

1. 発表者名 南英俊, 楠瀬慎二, 齋藤佑真, 湯原拓也, 桑野玄気, 永山佳苗, 柏木隆成, 辻本学, 門脇和男
2. 発表標題 結晶背面から給電する高温超伝導テラヘルツ波発振素子
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 2021年

1. 発表者名 巴山顕, 小林亮太, 藤田秀真, 辻本学, 掛谷一弘
2. 発表標題 Bi2212メサアレイからのテラヘルツ偏光測定による相互同期解析III
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 2021年

1. 発表者名 G. Kuwano, K. Nagayama, S. Suzuki, S. Kusunose, T. Yuhara, T. Kashiwagi, H. Minami, K. Kadowaki, and M. Tsujimoto
2. 発表標題 Mesa sidewall effect on Bi-2212 intrinsic Josephson junction terahertz emitters
3. 学会等名 2021 American Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Nagayama, G. Kuwano, S. Suzuki, T. Yuhara, S. Kusunose, T. Kashiwagi, H. Minami, K. Kadowaki, S. Adachi, S. Yamaguchi, T. Watanabe, and M. Tsujimoto
2. 発表標題 Design and characterization of single crystalline Bi-2223 mesas towards the observation of coherent terahertz radiation emitted from trilayer intrinsic Josephson junctions
3. 学会等名 2021 American Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻本学, 前田慶一郎, 藤田秀眞, 桑野玄気, アセムエララビ, 掛谷一弘
2. 発表標題 ストークスパラメーター測定によるBi-2212固有ジョセフソン接合型テラヘルツ発振素子の偏波解析
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志津友幸, 柏木隆成, 中尾裕則, 中川駿吾, 今井貴之, 中山繭, Kim Jeonghyuk, 辻本学, 南英俊, 石田茂之, 茂筑高士, 永崎洋, 門脇和男
2. 発表標題 高温超伝導体のデバイス利用に向けた材料研究
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南英俊, 大野雪乃, 楠瀬慎二, 湯原拓也, 桑野玄気, 今井貴之, 金子陽太, 中川駿吾, 柏木隆成, 辻本学, 門脇和男
2. 発表標題 高温超伝導THz波発振素子の不均一動作の研究
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井貴之, 柏木隆成, 中川駿吾, 桑野玄気, 大野雪乃, 金子陽太, 楠瀬慎二, Kim Jeonghyuk, 中山繭, 山本卓, 辻本学, 南英俊, 門脇和男
2. 発表標題 高温超伝導Bi2212単結晶を用いたTHz発振器の高出力化に向けた素子製作方法の開発
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柏木隆成, 今井貴之, 桑野玄気, 大野雪乃, 中川駿吾, 志津友幸, 金子陽太, 楠瀬慎二, 中山繭, Kim Jeonghyuk, 山本卓, 辻本学, 南英俊, 門脇和男
2. 発表標題 固有ジョセフソン接合素子アレイを用いたテラヘルツ波発振器の開発
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野雪乃, 南英俊, 桑野玄気, 楠瀬慎二, 湯原拓也, 金子陽太, 今井貴之, 中川駿吾, 柏木隆成, 辻本学, 門脇和男
2. 発表標題 外部共振器と結合したBi2212-THz波発振素子の高周波化
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田秀眞, 前田慶一郎, 辻本学, 掛谷一弘
2. 発表標題 偏波測定による固有ジョセフソン接合メサ同期振動の解析
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田慶一郎, 藤田秀眞, アセムエルアラビ, 辻本学, 掛谷一弘
2. 発表標題 高温超伝導体円偏光テラヘルツ光源における偏光特性の評価と制御
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻本学, 前田慶一郎, 藤田秀眞, 桑野玄気, 金子陽太, 永山佳苗, 掛谷一弘
2. 発表標題 Bi-2212固有ジョセフソン接合型テラヘルツ発振素子の偏波解析
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑野玄気, 金子陽太, 永山佳苗, 今井貴之, 大野雪乃, 楠瀬慎二, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男, 辻本学, 掛谷一弘
2. 発表標題 Bi-2212固有ジョセフソン接合型テラヘルツ光源におけるメサ側壁効果
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子陽太, 桑野玄気, 今井貴之, 大野雪乃, 楠瀬慎二, 中川駿吾, 永山佳苗, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男, 辻本学
2. 発表標題 平面アンテナと結合したBi-2212固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波放射
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 巴山顕, 藤田秀眞, 栗山由也, 前田慶一郎, 辻本学, 掛谷一弘
2. 発表標題 高温超伝導体メサ構造アレイにおけるバイアス印加方法によるテラヘルツ偏光特性の変化
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田慶一郎, 藤田秀真, アセムエルアラビ, 辻本学, 掛谷一弘
2. 発表標題 高温超伝導体円偏光テラヘルツ光源における偏光特性の評価と制御
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永山佳苗, 桑野玄気, 金子陽太, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男, 足立伸太郎, 山口隼平, 渡辺孝夫, 辻本学
2. 発表標題 Bi-2223固有ジョセフソン接合におけるテラヘルツ発振の観測に向けた素子開発
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻本学
2. 発表標題 Bi-2212テラヘルツ発振素子の電磁場解析
3. 学会等名 つくば・柏・本郷超伝導かけしプロジェクトワークショップ(3)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柏木隆成, 今井貴之, 志津友幸, 中川駿吾, 中山繭, Kim Jeonghyuk, 桑野玄気, 大野雪乃, 金子陽太, 楠瀬慎二, 永山佳苗, 湯原拓也, 山本卓, 辻本学, 南英俊, 茂筑高士, 中尾裕則, 永崎洋, 石田茂之, 馬渡康徳, 長谷川幸雄, 門脇和男
2. 発表標題 Bi2212-THz発振器の材料と発振特性に関する研究
3. 学会等名 つくば・柏・本郷超伝導かけしプロジェクトワークショップ(3)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楠瀬慎二, 南英俊, 大野雪乃, 湯原拓也, 桑野玄気, 金子陽太, 今井貴之, 永山佳苗, 柏木隆成, 辻本学, 門脇和男
2. 発表標題 円形パッチアンテナと結合したBi2212固有ジョセフソン接合系からのテラヘルツ波放射
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 湯原拓也, 南英俊, 大野雪乃, 楠瀬慎二, 桑野玄気, 今井貴之, 金子陽太, 永山佳苗, 柏木隆成, 辻本学, 門脇和男
2. 発表標題 パッチ型共振器に結合したBi2212メサアレイからのTHz波放射
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野雪乃, 南英俊, 楠瀬慎二, 湯原拓也, 桑野玄気, 今井貴之, 金子陽太, 永山佳苗, 柏木隆成, 辻本学, 門脇和男
2. 発表標題 Bi2212固有ジョセフソン接合系から共平面給電されたパッチアンテナ型テラヘルツ発振器
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南英俊, 大野雪乃, 楠瀬慎二, 湯原拓也, 今井貴之, 桑野玄気, 金子陽太, 永山佳苗, 柏木隆成, 辻本学, 門脇和男
2. 発表標題 スロットアレイに結合したBi2212メサアレイからのTHz波放射
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 巴山顕, 藤田秀眞, 栗山由也, 前田慶一郎, 辻本学, 掛谷一弘
2. 発表標題 Bi2212メサアレイからのテラヘルツ偏光測定による相互同期解析
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田慶一郎, 巴山顕, 栗山由也, アセムエルアラビ, 辻本学, 浅井栄大, 掛谷一弘
2. 発表標題 固有ジョセフソン接合メサ構造の臨界電流分布によるテラヘルツ偏光制御
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桑野玄気, 金子陽太, 永山佳苗, 今井貴之, 大野雪乃, 楠瀬慎二, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男, 辻本学
2. 発表標題 Bi-2212固有ジョセフソン接合系のテラヘルツ発振現象におけるメサ側壁効果
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子陽太, 桑野玄気, 永山佳苗, 今井貴之, 大野雪乃, 楠瀬慎二, 柏木隆成, 南英俊, 門脇和男, 辻本学
2. 発表標題 開放型平面アンテナを付与したBi-2212固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波放射特性
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Kadowaki , J-L. Zhong , R. Ohta , Y. Tanabe , K. Murayama , K. Nakamura , G. Kuwano , T. Imai , T. Shizu , S. Ohtsuki , Y. Ohno , S. Kusunose , S. Nakagawa , M. Tsujimoto , H. Minami , T. Kashiwagi , and T. Yamamoto
2 . 発表標題 High resolution and high sensitivity molecular spectroscopy using THz emitters of high-Tc superconducting Bi-2212 mesa structures
3 . 学会等名 XVII International Workshop on Vortex Matter in Superconductors ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 I. Kakeya , A. Elarabi , S. Fujita , K. Maeda , and M. Tsujimoto
2 . 発表標題 Circularly polarized terahertz radiation from intrinsic Josephson junctions
3 . 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Kashiwagi , S. Nakagawa , T. Imai , G. Kuwano , Y. Kaneko , Y. Ono , S. Kusunose , T. Yamamoto , H. Minami , M. Tsujimoto , and K. Kadowaki
2 . 発表標題 Development of high-Tc superconducting THz emitters
3 . 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 I. Kakeya , A. Elarabi , K. Maeda , S. Fujita , and M. Tsujimoto
2 . 発表標題 Monolithic terahertz emitter of high-temperature superconductors
3 . 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Tsujimoto , G. Kuwano , Y. Kaneko , T. Imai , Y. Ono , S. Nakagawa , S. Kusunose , T. Kashiwagi , H. Minami , and K. Kadowaki
2 . 発表標題 Coherent terahertz radiation from homogeneous intrinsic Josephson junction stacks of cuprate high-temperature superconductors
3 . 学会等名 44th International Conference on Infrared , Millimeter , and Terahertz Waves ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 G. Kuwano , Y. Kaneko , T. Imai , Y. Ono , S. Nakagawa , S. Kusunose , T. Kashiwagi , H. Minami , K. Kadowaki , and M. Tsujimoto
2 . 発表標題 Control of mesa sidewalls for coherent terahertz radiation from intrinsic Josephson junctions of high-Tc superconductors
3 . 学会等名 44th International Conference on Infrared , Millimeter , and Terahertz Waves ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Maeda , S. Fujita , A. Elarabi , M. Tsujimoto , and I. Kakeya
2 . 発表標題 Stokes-parameter analysis of circular polarized terahertz waves from superconducting Josephson plasma emitter
3 . 学会等名 44th International Conference on Infrared , Millimeter , and Terahertz Waves ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Ono , H. Minami , G. Kuwano , S. Kusunose , T. Imai , Y. Kaneko , S. Nakagawa , T. Kashiwagi , M. Tsujimoto , and K. Kadowaki
2 . 発表標題 Terahertz radiation from the high-Tc superconductor intrinsic Josephson junctions coupled to an external resonator
3 . 学会等名 44th International Conference on Infrared , Millimeter , and Terahertz Waves ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kadowaki, Y. Ono, G. Kuwano, T. Imai, Y. Kaneko, S. Nakagawa, S. Kusunose, T. Kashiwagi, M. Tsujimoto, H. Minami, and R. Klemm
2. 発表標題 Filling and bridging the THz gap using high-Tc superconducting Bi2Sr2CaCu2O8+ intrinsic Josephson junction emitters
3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kashiwagi, S. Nakagawa, T. Imai, G. Kuwano, Y. Kaneko, Y. Ono, S. Kusunose, T. Yamamoto, H. Minami, M. Tsujimoto, and K. Kadowaki
2. 発表標題 Development of high-Tc superconducting THz emitters
3. 学会等名 Materials Research Meeting 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〕

-

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	柏木 隆成  (Kashiwagi Takanari)  (40381644)	筑波大学・数理物質系・講師    (12102)	

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		
米国	Argonne National Laboratory		
トルコ	Sabanci University		