

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286006

研究課題名(和文)高温超伝導テラヘルツ光源の時間領域コヒーレンス測定と元素置換による高強度化

研究課題名(英文)Time-domain coherence measurement and substitution effect of HTSC THz source

研究代表者

掛谷 一弘 (Takeya, Itsuhiro)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80302389

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導体において実証されているテラヘルツ発振について、より実用性の高い特徴を示すために、通信応用に重要な円偏光の放射が起きていることを明らかにした。また、高いコヒーレンスを確認する手法として、時間領域分光測定を行った。これは、ジョセフソン接合という振動子が同期していく様子を確認するという教育的な手法である。放射強度の向上には超伝導素子の温度上昇を抑える構造が必要であり、その構造を備えたモジュールを設計し、モジュールによる効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：On terahertz radiations from high-Tc superconductors, we have been successful in emission of circularly-polarized waves from truncated-edged mesa structures. This feature is useful for applications of mobile communications. Furthermore, time-domain spectroscopy measurements were progressed in HTSC terahertz emitters to verify highly-coherent emission from them. In order to have higher emission power, we designed module structures which may suppress temperature rise of superconducting device. The module was tested by comparing emission properties of actual emitters.

研究分野：固体物理

キーワード：固有ジョセフソン接合 テラヘルツ波 時間領域測定 置換効果

1. 研究開始当初の背景

超伝導ジョセフソン接合は巨視的コヒーレンスが実現されている系であるため、コヒーレント電磁波を取り出す試みは古くからなされていた。交流ジョセフソン効果により電磁波を励起するジョセフソン接合は超高効率・高周波の通信素子として極めて魅力的である。とくに、固有ジョセフソン接合系では、90年代後半から THz 波の検出が世界中で試みられてきた。これらの物質群では、ジョセフソンプラズマ周波数 (~1 THz) は超伝導ギャップ (~10 meV) より十分低エネルギーであるため、電磁波源となるプラズマ励起による散逸が極めて少ないからである。

申請者らは 2007 年、世界ではじめて高温超伝導体からの単色 THz 波連続発振を明確な形で検出し、分光することに成功した。その後の本研究組織をはじめとする精力的な研究により、非常に高い潜在能力が明らかになってきているが、実際の光源に利用するには、最大出力を増加させ、高いコヒーレンスを実証させる必要がある。

2. 研究の目的

高温超伝導テラヘルツ光源を用いたセンチサイズの構築のために、本研究の期間内には以下のことを明らかにする。

A. 高温超伝導テラヘルツ光源からの振動電場の時間領域観測

高温超伝導 THz 光源のコヒーレンスを観測するために、テラヘルツ振動電場をピコ秒の時間領域で観測する。この実証により、高温超伝導テラヘルツ光源が通信用に利用できることを明白にする。

B. 高温超伝導体に対する化学的手法を用いた発振出力、周波数帯域の上昇

高い電流密度で発振条件を実現し、ミリワット級の発振を達成し、高温超伝導テラヘルツ光源の強度を実用の域に引き上げる。

C. 発振振幅の時間発展観測による同期メカニズムの解明

テラヘルツ電場の時間発展を測定することにより、固有ジョセフソン接合間の同期メカニズムを明らかにして、同期のための最適条件を見いだす。

3. 研究の方法

研究目的 A に対しては、時間領域テラヘルツ分光計の構築を構築し、発振の時間発展を観測する準備として、超伝導体薄膜の透過スペクトル特性を測定した。研究目的 B に対しては、Bi2212 の陽イオンを置換して得られる既知の超伝導体単結晶を育成し、発振素子に加工することにより、発振特性の変化を観測した。研究目的 C に関しては、メサ構造を変更することにより、発振される電磁波の偏光を制御する。また、熱伝導理論との比較により、発振出力を最大化するための周辺部材構造を検討して、モジュール化を試みた。

4. 研究成果

超伝導体のテラヘルツ時間領域分光を行い、本研究目的に向けた実験環境を整備した。具体的には、テラヘルツ時間領域分光に適したクライオスタットを購入し、測定系に組み込んだ。その結果、検出感度がおよそ 5 倍向上し、周波数分解能は 2 倍向上した。また、測定周波数範囲を拡大するために、光伝導アンテナを購入すると並行して、ナローバンド THz パルス照射が可能となるように、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターのグループと共同研究を開始した。

高温超伝導 Bi2212 の単結晶を薄膜状に劈開加工して、THz-TDS 観測を行った。LaAlO₃ 基板に接着した単結晶を THz パルスが透過するほどに薄く劈開し、幅 80 ミクロンのストライプ状に加工した。これに垂直に当てた THz パルスの透過強度を測定したところ、0.4THz をピークとする幅 0.2THz の吸収線が観測された。中心周波数は発振と一致するものの、幅は発振から大きく広がって、THz 発振は引き込み現象が起きていることが考察される。

すでに発振が報告されている Bi2212 に加え、元素の一部を Pb (鉛) や La (ランタン) で置換した超伝導体から作製した試料からのテラヘルツ波の放射が観測された。これらの超伝導体からテラヘルツを発振させたのは、本研究が初めてである。発振周波数は Bi2212 よりも高く、元素置換によって高温超伝導テラヘルツ光源の新しい機能が引き出された。この成果は、本研究の目標である 1 ミリワットの放射パワーの達成のために調整しうるパラメータとして、高温超伝導体を構成する元素の組成比が加わったことを示している。また、La 置換により結晶がアンダードープになるので、デバイス作製のプロセスが一つ省略できることがわかった。

移動体間の通信には、パッチアンテナから放射される円偏波ミリ波が用いられている。本研究では、パッチアンテナ理論に基づいて高温超伝導体テラヘルツ光源のメサ形状を設計・加工し、複数のデバイスから 450 GHz 付近の電磁波の発振を検出した。偏光子を用いた偏光測定の結果、得られた最高の円偏光度は 99.7%にも及び、モノリシックなテラヘルツ光源からの円偏波放射としては、これまでに報告されたものに比べて最高の値を得た。局所的な温度上昇を考慮した数値計算との比較から、電場の回転方向を推定することができ、パッチアンテナとの比較から、メサ構造内の電流分布が明らかになった。

これまでの研究で、高温超伝導体テラヘルツ光源の特性制御には、デバイスの温度分布が重要な役割を果たしていることが分かった。しかしながら、既存のデバイス作成法は、熱伝導で重要となる超伝導体結晶と基板の接着にかんする再現性が非常に低く、数値計算との比較の障害になっていた。本研究では、再現性と耐久性の高いポリイミド樹脂を用

いてデバイスを作成し、熱浴との接触条件を変えて発振特性の変化を観測した。その結果、金属部品と一体化させた場合の方が、発振強度・発振周波数ともに高く、冷却の効果がみられる結果を得た。この成果は、高温超伝導体テラヘルツ光源を実用化するうえで重要なパッケージ化技術の基盤になる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9 件)

- [1] A. Uzawa, S. Komori, Y. Kamei, and I. Kakeya, **Terahertz conductivity in the under-doped Pb1212 epitaxial film** Physica C, **530**, 14-16 (2016).
DOI:[10.1016/j.physc.2016.05.012](https://doi.org/10.1016/j.physc.2016.05.012)
- [2] A. Elarabi, Y. Yoshioka, M. Tsujimoto, Y. Nakagawa, and I. Kakeya, **Polarization Enhancement of Terahertz Radiation Generated by Intrinsic Josephson Junctions in a Truncated Edge Square Bi2Sr2CaCu2O8+δ Mesa**, Physics Procedia, **81**, 133-136 (2016).
DOI:[10.1016/j.phpro.2016.04.022](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.04.022)
- [3] Itsuhiko Kakeya and Huabing Wang, **Terahertz-wave emission from Bi2212 intrinsic Josephson junctions: a review on recent progress**, Superconductor Science and Technology, **29**, 073001-(1-18) (2016).
DOI:[10.1088/0953-2048/29/7/073001](https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/7/073001)
- [4] M. Tsujimoto, I. Kakeya, T. Kashiwagi, H. Minami, and K. Kadowaki, **Cavity mode identification for coherent terahertz emission from high-Tc superconductors**, Optics Express, **24**, 4591-4599 (2016).
DOI: [10.1364/OE.24.004591](https://doi.org/10.1364/OE.24.004591)
- [5] M. Tsujimoto, Y. Maeda, H. Kambara, A. Elarabi, Y. Yoshioka, Y. Nakagawa, Y. Wen, T. Doi, H. Saito and I. Kakeya **Terahertz emission from a stack of intrinsic Josephson junctions in Pb-doped Bi2Sr2CaCu2O8+δ**, Supercond. Sci. Technol., **28**, 105015-(1-5) (2015).
DOI: [10.1088/0953-2048/28/10/105015](https://doi.org/10.1088/0953-2048/28/10/105015)
- [6] H Akiyama, S Pyon, T Tamegai, M Tsujimoto, I Kakeya, **Thermal imaging of Bi2212 THz oscillator**, Physica C: Superconductivity and its Applications, **518**, 77-80 (2015)
DOI:[10.1016/j.physc.2015.06.005](https://doi.org/10.1016/j.physc.2015.06.005)
- [7] Itsuhiko Kakeya, Nobuo Hirayama, Yuta Omukai and Minoru Suzuki **Temperature dependence of terahertz emission by an asymmetric intrinsic Josephson junction device**, J. Appl. Phys. **117**, 043914-(1-5) (2015) DOI: [10.1063/1.4906849](https://doi.org/10.1063/1.4906849)
- [8] M Tsujimoto, H Kambara, Y Maeda, Y Yoshioka, Y Nakagawa and I Kakeya, **Imaging of local temperature distributions in mesas of high-Tc superconducting terahertz sources**, Journal of Physics: Conference Series **568** 022048 (2014)
doi:[10.1088/1742-6596/568/2/022048](https://doi.org/10.1088/1742-6596/568/2/022048)
- [9] 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 Bi2Sr2CaCu2O8+δ for Intense Terahertz Radiation**, Phys. Rev. Applied, **2**, 044016-(1-5),
doi:[10.1103/PhysRevApplied.2.044016](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.2.044016)

[学会発表](計 29 件)

- [1] Itsuhiko Kakeya, “**Generation of circularly-polarized terahertz waves from Bi2212 intrinsic Josephson junctions**”, International Workshop on Superconductivity and Related Functional Materials 2016 ([IWSRFM2016](https://www.itsrfrf2016.jp/)), 2016/12/20, Tsukuba, Japan
- [2] 掛谷一弘, “**Generation of elliptically polarized terahertz waves from Bi2212 intrinsic Josephson junctions**”, [14th International workshop on High-frequency Superconducting Electronics](https://www.itsrfrf2016.jp/), 2016 年 4 月 10 日 ~ 17 日, Bjorkilden (スウェーデン)
- [3] 掛谷一弘, 「超伝導自由度間相互作用に注目した多層固有ジョセフソン接合系におけるテラヘルツ発振と巨視的量子トンネル現象」, 日本物理学会第 71 回年次大会, 「固有ジョセフソン接合の最前線」シンポジウム, 2016 年 3 月 19 日 ~ 22 日, 東北学院大学 (仙台市)
- [4] A. Elarabi, S. Tokito, Y. Yoshioka, T. Doi, M. Tsujimoto, and I. Kakeya, “**Generation of circularly-polarized terahertz waves from Bi2212 intrinsic Josephson junctions**“, [第 24 回渦糸物理国内会議](https://www.itsrfrf2016.jp/), 2016 年 11 月 30 日, 秋田芸術村温泉ゆほぼ (秋田県仙北市)
- [5] A. Elarabi, Y. Yoshioka, T. Doi, M. Tsujimoto, and I. Kakeya, “**Generation of Circularly Polarized Terahertz Radiation**

- from BSCCO Mesa Structure”、2016年11月25日、[第15回低温工学・超伝導若手合同講演会](#)、大阪市立大学文化交流センター（大阪市）
- [6] 掛谷 一弘, エララビ アセム, 温 一凡, 土居 卓司, 辻本 学, 「[高温超伝導体 Bi2212 テラヘルツ光源の多機能化](#)」, 第63回応用物理学会春季学術講演会、「高温超伝導 30周年記念シンポジウム」, 2016年3月19日~22日、東京工業大学大岡山キャンパス（目黒区）
- [7] 辻本学, 齊藤寛, 土居卓司, 温一凡, Asem Elarabi, 掛谷一弘, 足立伸太郎, 渡辺孝夫, 「Bi-2223 固有ジョセフソン接合を使ったテラヘルツ発振の検証」, 日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日~22日、東北学院大学（仙台市）
- [8] Asem Elarabi, Yusuke Yoshioka, Manabu Tsujimoto, Takuji Doi, Itsuhiro Kakeya, “Circularly-Polarized Terahertz Radiation from a High-Tc Bi-2212 Mesa” 第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月13日~16日、朱鷺メッセ（新潟市）
- [9] 土居 卓司, 辻本 学, Elarabi Asem, 温 一凡, 掛谷 一弘, 「[高温超伝導体 Bi2212 を用いたテラヘルツ波光源のパッケージ化](#)」, 第63回応用物理学会春季学術講演会、2016年3月19日~22日、東京工業大学大岡山キャンパス（目黒区）
- [10] Asem Elarabi, Yusuke Yoshioka, Manabu Tsujimoto, Takuji Doi, Itsuhiro Kakeya, “Circularly-Polarized Terahertz Emission from Monolithic Bi2212 Sources”, The 10th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High- T_c Superconductors (Plasma⁺ 2016), 2016/10/09 – 12, Nanjing, China.
- [11] 掛谷一弘, ”Terahertz Emission and Coupled Macroscopic Quantum Tunneling in BSCCO Intrinsic Josephson Junction“, 9th International Conference on Magnetic and Superconducting Materials (MSM15), 2015年4月30日~5月3日、アンタルヤ（トルコ）
- [12] 掛谷一弘, 「固有ジョセフソンテラヘルツ光源の高強度化と高機能化に向けて」, 日本原子力機構計算科学研究センターセミナー「固有ジョセフソン接合の新展開」, 2015年2月27日、東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト（柏市）
- [13] 辻本学, 「高温超伝導体を使ったコヒーレントな連続テラヘルツ光源の開発」、第14回低温工学・超伝導若手合同講演会、2015年12月11日、大阪市立大学文化交流センター（大阪市）
- [14] 辻本学, 齊藤寛, 土居卓司, 温一凡, Asem Elarabi, 掛谷一弘, 「**Bi-2212 固有ジョセフソン接合テラヘルツ発振におけるストライプ状微細発振構造に関する考察**」, 第23回渦糸物理国内会議、2015年12月9日、休暇村志賀島（福岡市）
- [15] A. Elarabi, Y. Yoshioka, M. Tsujimoto, Y. Nakagawa, I. Kakeya, “Generation of Elliptically Polarized Terahertz Waves using a High-Tc Superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ”, 28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015) Funabori, Tokyo, Nov. 18, 2015
- [16] 温一凡, 野村義樹, 辻本学, 掛谷一弘, 「Bi2212 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ発振に関する元素置換効果」, 日本物理学会 2015年秋季大会、2015年9月18日、関西大学千里山キャンパス（吹田市）
- [17] 辻本学, 齊藤寛, 土居卓司, 温一凡, Asem Elarabi, 掛谷一弘, Fabian Rudau^A, Raphael Wieland^A, Reinhold Kleiner^A, 「 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波発生におけるストライプ状微細発振構造の起源」, 日本物理学会 2015年秋季大会、2015年9月18日、関西大学千里山キャンパス（吹田市）
- [18] 鶴沢旭, 小森祥央, 掛谷一弘, 「[テラヘルツ時間領域分光による \$\text{Pb}_{1-y}\text{Sr}_y\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{2+y}\text{O}_{7+\delta}\$ 超伝導ゆらぎ観測](#)」, 第76回応用物理学会周期学術講演会、2015年9月13日、名古屋国際会議場（名古屋市）
- [19] 温一凡, 吉岡祐介, 野村義樹, 辻本学, 掛谷一弘, 「[La ドープ \$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}\$ によるテラヘルツ波発振 II](#)」, 第76回応用物理学会周期学術講演会、2015年9月13日、名古屋国際会議場（名古屋市）
- [20] 掛谷一弘, 吉岡祐介, 辻本学, 中川裕也, 「 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 固有ジョセフソン接合テラヘルツ光源の偏光制御のための形状および電極効果」, 日本物理学会第70回年次大会、2015年3月21日~24日、早稲田大学早稲田キャンパス（新宿区）

- [21] 辻本学, 神原仁志, 岸本卓也, 温一凡, 吉岡佑介, 中川裕也, 秋山弘樹^A, 卞舜生^A, 為ヶ井強^A, Fabian Rudau^B, Raphael Wieland^B, Reinhold Kleiner^B, 掛谷一弘, 「Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} 固有ジョセフソン接合メサ構造における温度分布の動的制御とテラヘルツ発振の同時観測」、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 21 日~24 日、早稲田大学早稲田キャンパス (新宿区)
- [22] Akira Uzawa, Sachio Komori, Itsuhiro Kakeya, “Superconducting Fluctuation in PbSr₂Y_{1-x}Ca_xCu₂O_{7+δ} Epitaxial Films Observed by Terahertz Time-Domain Spectroscopy”, 28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015) Funabori, Tokyo, Nov. 17, 2015
- [23] Manabu Tsujimoto, Hitoshi Kambara, Takuya Kishimoto, Yifan Wen, Yusuke Yoshioka, Yuya Nakagawa and Itsuhiro Kakeya, “Dynamic Control of Temperature Distributions in Stacks of Intrinsic Josephson Junctions for Intense Terahertz Emission”, Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2015), March 8-13, 2015, San Diego, USA
- [24] Yusuke Yoshioka, Yuya Nakagawa, Manabu Tsujimoto and Itsuhiro Kakeya, “Manipulating polarization of terahertz waves from high-Tc superconductor intrinsic Josephson junctions”, Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2015), March 8-13, 2015, San Diego, USA
- [25] 辻本学, 神原仁志, 吉岡佑介, 中川裕也, Fabian Rudau¹, Boris Gross¹, Reinhold Kleiner¹, 掛谷一弘, ¹Univ. Tübingen, 「Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} 固有ジョセフソン接合を用いた超伝導テラヘルツ光源の開発」、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 18 日、北海道大学 (札幌市)
- [26] M. Tsujimoto, H. Kambara, Y. Yoshioka, Y. Nakagawa, and I. Kakeya, “**Dynamic Control of Temperature Distributions and Terahertz Waves in Stacks of Intrinsic Josephson Junctions in Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ}**”, 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors, Kyoto, Japan, Dec. 1, 2014
- [27] 前田圭穂, 吉岡佑介, 神原仁志, 辻本学, ^o掛谷一弘, 「**Pb 置換 Bi₂212 からのテラヘルツ発振**」、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 28 日、東海大学 (平塚市)
- [28] 吉岡佑介, 岸本卓也, 中川裕也, 辻本学, 掛谷一弘, 「**Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} 固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波源の偏波制御**」、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 18 日、北海道大学 (札幌市)
- [29] M. Tsujimoto, H. Kambara, Y. Maeda, Y. Yoshioka, Y. Nakagawa, and I. Kakeya, “**Terahertz Emission from a Stack of Intrinsic Josephson Junctions in Pb-doped Bi-2212**”, 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors, Kyoto, Japan, Dec. 2, 2014
- 〔図書〕(計 1 件)
掛谷一弘ほか「超伝導渦糸状態の物理」裳華房、5.3.2 節および 5.4.1 節、2017 年
- 〔産業財産権〕
○出願状況 (計 1 件)
名称: 「テラヘルツ帯電磁波発振装置」
発明者: 辻本学, 掛谷一弘
権利者: 国立大学法人京都大学
種類: 特願
番号: 2015-246505
出願年月日: 2015 年 12 月 17 日 .
国内外の別: 国内
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://sk.kucee.kyoto-u.ac.jp>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
掛谷一弘 (KAKEYA, Itsuhiro)
京都大学工学研究科准教授
研究者番号: 80302389
- (2) 研究分担者
辻本学 (TSUJIMOTO, Manabu)
筑波大学数理物質系助教
研究者番号: 20725890