

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23681030

研究課題名(和文)高温超伝導体コヒーレントテラヘルツ光源の実証と実用化

研究課題名(英文) Demonstration and utilization of high temperature coherent terahertz emitter

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) 21,400,000円、(間接経費) 6,420,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温超伝導体を用いたテラヘルツ光源の特性を明らかにし、その特性の設計・制御に初めて成功した。電波と光の中間に位置するテラヘルツ光は、高い透過性と分解能を備え、現在精力的に開発が進められている波長帯の電磁波である。高温超伝導テラヘルツ光源から放射される電磁波は通信用のキャリア電波として利用可能な特性を示し、同一の素子で周波数を外部から調整可能であることがわかった。一連の研究においてこれまで問題であった素子特性の非制御性をなくすことに成功した。

研究成果の概要(英文)：The properties of terahertz emitter made of high-temperature superconductor (HTSC) have been revealed in this project. We have also been successful in designing the properties of the device for the first time. Terahertz waves laying between radio waves and light waves show peculiar features of rather high transmittance and high spacial resolution and its technology has been investigated intensively. This study reveals that the terahertz wave from an HTSC emitter is highly coherent, so that the HTSC emitter can be utilized for a source of carrier wave for next-generation high-speed communication infrastructures. It is also found that the emission frequency of a device is externally tunable. The poor reproducibility of devices mentioned in previous studies has been improved.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：マイクロ・ナノデバイス

キーワード：固有ジョセフソン接合 テラヘルツ発振 Bi2212 同期現象 ジョセフソン効果

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。2008 年以降の進展として、(1)申請者が開発した素子作成技術に基づき、筑波大のグループが多数の報告(2)2010 年、物質材料研究機構とチュービンゲン大学(独)の研究チームなどから再現性に関する報告が挙げられるが、実験結果の普遍性が十分でないため、現象の理解は進んでいなかった。

2. 研究の目的

本研究では、十分に制御された素子作製プロセスを採用することにより、再現性の高い実験を目指し、以下の(a-c)の3項目を明らかにすることを目的とした。

- (a) THz 発振のメカニズムは何か？
- (b) 出力はどこまで上昇可能か？
- (c) 発振されている THz 波はコヒーレントか？

3. 研究の方法

前節(a-c)に対応して、方法を述べる。

(a) 固有ジョセフソン接合からの THz 発振の原理は、次のように理解されている。積層する個々の固有ジョセフソン接合の位相が伝搬方向に π 変化する π キンク状態が実現し、層間結合のためにすべての層に渡って同期して交流ジョセフソン効果に従う振動数で振動する(図1)。しかしながら、 π キンクのような急峻な位相変化の起源については、明らかではない。そこで本研究では、 π キンクの起源が注入電流による温度上昇であるとして、電極形状を変えた素子を作製して、発振との関係を明らかにする。

(b) 発振出力の最大値は最大ジョセフソン電流密度の2乗に比例すると指摘されており、発振強度の増大には、最大ジョセフソン電流の大きい固有ジョセフソン接合を用いればよい。Bi2212のBiサイトを一部Pbに置換すると、超伝導ギャップを変化させずに最大ジョセフソン電流を増大させることができることを、我々は明らかにした。本研究では、BiPb2212単結晶から作製した固有ジョセフソンデバイスからの THz 波検出を試みた。BiPb2212は還元が比較的困難であり、目的の

ドーパ量を得るために、超伝導基板から固有ジョセフソン接合スタックを取り外したデバイスを作製した。

(c) THz 波のコヒーレンスはデジタル通信への応用上極めて重要な問題である。実験的な確認は、前述の発振メカニズムと同時に超伝導のコヒーレンスを検証することにもなり、超伝導研究にとってのマイルストーンとなる。本研究では、高分解能の分光系を構築して、スペクトル線幅を測定する。

4. 研究成果

同一の Bi2212 単結晶から取りだした複数の結晶片上に同一形状(80 x 400 x 1.0 μm^3)の複数のメサ構造を Ar イオンミリングによって形成し、配線用の電極の厚さを 30, 70, 400 nm と変えた素子(それぞれタイプ A, B, C)について電流電圧特性の測定を行い、同時に Si ポロメータによる THz 発振の検出を行った。その結果、タイプ A についてはメサ素子によって2-3種の特徴を持つ発振、タイプ B については2種の特徴を持つ発振が検出されたが、タイプ C ではいずれの素子でも発振は観測されなかった。THz 発振は IV 特性の準粒子ブランチ上で観測されているため、素子は自己発熱しており、熱拡散経路によって IV 特性は大きく変わる。超伝導体単結晶上のメサ構造の場合、配線電極が主な熱拡散経路となるため、自己発熱による温度上昇は電極の厚さに強く依存する。THz 発振が検出された素子では、IV 特性の臨界電流直上に電圧のオーバーシュートが観測される。これは自己発熱による超伝導ギャップの抑制と考えられ、電極が薄い素子ではより顕著であり、THz 発振に自己発熱が関与していることが考察される。一方、厚い電極を持つ素子でもメサ内部で THz 波は励起されているがシールド効果により検出されなかったとした場合、発振する素子において発振時に IV 特性の異常が観測されるはずだが、系統的な異常は観測されていない。また、超伝導電極を持つ素子でも発振を検出したという報告もあり、タイプ C ではメサ内部でもジョセフソンプラズマ振動が励起されていないと結論できる。

ビームスプリッターにワイヤグリッド偏光子を用いた Martin-puplett 型分光系において、可動鏡のスキャン距離を 20 cm 確保し、最高の分解能を 0.75 GHz に設計した。これは市販の分光器において高分解能オプションを加えた場合を大きく上回る。本装置で測定した固有ジョセフソン接合 THz 光源からのスペクトルを図 1(a)および(b)に示す。スペクトルの線幅はここでも分解能で与えられ、極めて単色性が高く、コヒーレントであることが分かる。ここで得られた線幅から仮に Q 値を見積もると 400 程度であり、メサ構造の形状から予想される値よりはるかに大きいことが分かる。

図 1 に示すように、発振周波数は温度・バイアス電流の増加に対して共に減少する振

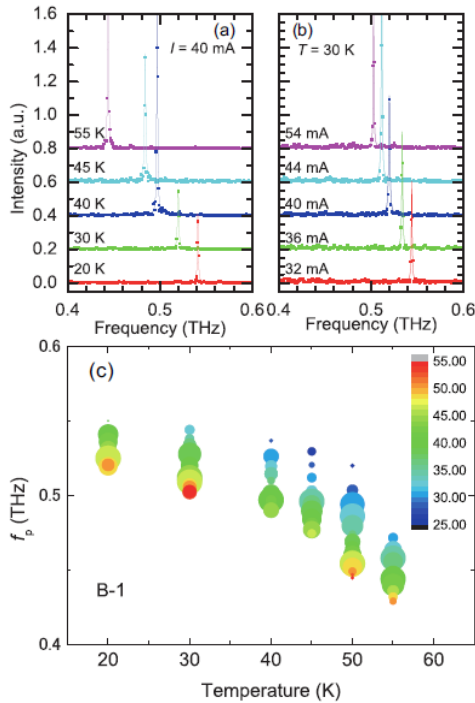


図1: 発振スペクトルの(a)温度依存性および(b)バイアス依存性。(c)発振周波数の温度依存性。シンボルの大きさはFFTの振幅、色はバイアス電流を示す。

る舞いを示す。バイアス電流 40 mA の時、温度を 20 K から 55 K まで増加させると、発振周波数は 541 GHz から 444 GHz に減少する。また、温度を 30 K に固定した場合、バイアス電流を 32 mA から 54 mA に増加させると、発振周波数は 544 GHz から 502 GHz に変化する。この周波数の温度依存性については、ロンドン侵入長の温度依存性とメサ構造の非対称性を用いて定性的に説明できる。さらに、バイアス電流増加による発振周波数の減少はメサの実効的な温度上昇により説明できる。温度依存性についても、発振周波数からは熱浴（サンプルステージ）の温度よりもメサの実効温度は 10 K 以上高いことが推測される。このような狭い温度・バイアス範囲での急激な周波数変化は超伝導に由来する独特の性質であり、今後の研究の進展が期待される。

両面劈開法により BiPb2212 単結晶から固有接合スタックを取り外して、還元アニールを繰り返して、ドーパ量を減少させた結果、Si ポロメータによって電磁波の放射を検出するのに成功した。Bi2212 以外の物質から発振を検出したのは、世界で初めてである。発振強度は Bi2212 のチャンピオンデータには及ばなかったものの、比較的高い強度での発振を検出した。FTIR 分光による発振スペクトルは 0.75 THz 付近にピークを示した。本素子における発振スタック幅はおよそ 90 μm であるので、Bi2212 におけるこれまでの結果から予想される発振周波数は 0.4 THz 程度となり、測定された周波数はその倍となっている。これには、いくつかの理由が考察される。ひとつは、スタック内部に高次の定在波が励起

されたことが考えられる。もう一つは、Pb 置換によって実効的な誘電率が大きく変化したことが考えられる。今後の詳細な研究によってその起源が明らかにされるであろう。

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 6 件)

- [1] I. Kakeya, N. Hirayama, T. Nakagawa, Y. Omukai, and M. Suzuki. Temperature and current dependencies of terahertz emission from stacks of intrinsic Josephson junctions with thin electrodes revealed by a high-resolution FT-IR spectrometer. *Physica C: Superconductivity*, 491:11-15, aug 2013. [DOI | [http](#)]
- [2] H. Kambara, I. Kakeya, and M. Suzuki. Increase of superfluid density with growth of quasiparticle density of states probed by intrinsic tunneling spectroscopy in $\text{Bi}_{1.9}\text{Pb}_{0.1}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. *Physical Review B*, 87(21):214521, jun 2013. [DOI | [http](#)]
- [3] I. Kakeya, Y. Omukai, T. Yamamoto, K. Kadowaki, and M. Suzuki. Effect of thermal inhomogeneity for terahertz radiation from intrinsic Josephson junction stacks of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. *Applied Physics Letters*, 100(24):242603, 2012. [DOI | [http](#)]
- [4] H. Kambara, I. Kakeya, and M. Suzuki. Intrinsic Tunneling Spectroscopy for Pb-Substituted Bi2212 in the Underdoped Region. *Journal of Physics: Conference Series*, 400(2):022043, dec 2012. [DOI | [http](#)]
- [5] Y. Omukai, I. Kakeya, and M. Suzuki. Simultaneous Observation of Three Types of Terahertz Radiation from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Intrinsic Josephson Junctions. *Journal of Physics: Conference Series*, 400(5):052027, dec 2012. [DOI | [http](#)]
- [6] A. E. Koshelev, A. I. Buzdin, I. Kakeya, T. Yamamoto, and K. Kadowaki. Fluctuating pancake vortices revealed by dissipation of the Josephson vortex lattice. *Physical Review B*, 83(22):224515, jun 2011. [DOI | [http](#)]

[学会発表](計 28 件)

- [1] 辻本学, 中川裕也, 吉岡佑介, 前田圭穂, 神原仁志, 掛谷一弘, 「 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ テラヘルツ光源のメサ内温度分布制御による高出力化」, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014 年 3 月 18 日, 青山学院大学 (相模原市)
- [2] 辻本学, 中川裕也, 吉岡佑介, 亀井裕太, 前田圭穂, 神原仁志, 掛谷一弘, 「 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ テラヘルツ光源におけるメサ内温度分布の動的制御」, 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）
- [3] 前田圭穂, 吉岡佑介, 神原仁志, 辻本学, 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）
- [4] Itsuhiro Kakeya, "THz emission properties of various device geometries on Bi2212 crystals", Workshop on THz emission from intrinsic Josephson junctions, March 10, 2013, Katsura campus, Kyoto University
- [5] Itsuhiro Kakeya and Minoru Suzuki, "Collective quantum functions of superconducting intrinsic Josephson junctions", 6th GCOE International Symposium on Photonics and Electronics Science and Engineering, March 11, 2013, Katsura campus, Kyoto University
- [6] Itsuhiro Kakeya, "Enhancement of Macroscopic Quantum Tunneling in Intrinsic Josephson Junctions of BSCCO Cuprates due to Short-Ranged Inter-Junction Couplings", 2nd Workshop on THz radiation from intrinsic Josephson junctions, Aug. 30, 2013, Tsukuba, Japan.
- [7] I. Kakeya, N. Hirayama, S. Mizuta, T. Nakagawa, Y. Kamei, Y. Maeda, and M. Suzuki, "Monochromatic, continuous, and tunable sub-terahertz emission from high-temperature superconducting intrinsic Josephson junction stacks", International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013, Apr. 1-5, 2013.
- [8] 野村義樹, 神原仁志, 掛谷一弘, 鈴木実, 「 $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_{2-y}\text{La}_y\text{CuO}_{6+\delta}$ の固有トンネル分光による超伝導ギャップの観測」, 第 60 回応用物理学会春期学術講演会, 2013 年 3 月 27 日、神奈川工科大学
- [9] 中川拓人, 平山伸夫, 水田慎吾, 亀井裕太, 前田圭穂, 吉岡佑介, 掛谷一弘, 鈴木実, 「高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ発振の温度範囲における電極厚依存性」, 第 60 回応用物理学会春期学術講演会, 2013 年 3 月 27 日、神奈川工科大学
- [10] 掛谷一弘, 平山伸夫, 中川拓人, 水田慎吾, 鈴木実, 「Bi2212 固有ジョセフソン接合からの発振スペクトル線幅」, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 29 日、広島大学東広島キャンパス
- [11] 前田圭穂, 吉岡佑介, 平山伸夫, 辻本学, 掛谷一弘, 「Pb 置換 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波発振に関する検討」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013 年 9 月 18 日、同志社大学京田辺キャンパス
- [12] 辻本学, 中川裕也, 吉岡佑介, 亀井裕太, 前田圭穂, 水田慎吾, 掛谷一弘, 「 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ テラヘルツ発振素子の電流注入調節による特性制御」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013 年 9 月 18 日、同志社大学京田辺キャンパス
- [13] I. Kakeya, N. Hirayama, S. Mizuta, T. Nakagawa, and M. Suzuki, "Temperature and bias tuning of terahertz emission from Bi2212 intrinsic Josephson junction stacks" 11th Euroconference on Applied Superconductivity (EUCAS2013), Sep. 18, 2013, Genova, Italy
- [14] 辻本学, 中川裕也, 吉岡佑介, 亀井裕太, 前田圭穂, 水田慎吾, 掛谷一弘, 「2 電極構造を有する $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ テラヘルツ発振素子による電流注入効果の検証」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 28 日、徳島大学常三島キャンパス
- [15] 吉岡佑介, 辻本学, 平山伸夫, 中川拓人, 鈴木実, 掛谷一弘, 「固有ジョセフソン接合からの THz 発振周波数の温度依存性」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 28 日、徳島大学常三島キャンパス
- [16] 辻本学, 中川裕也, 吉岡佑介, 亀井裕太, 前田圭穂, 水田慎吾, 掛谷一弘, 「2 電極を有する Bi-2212 テラヘルツ光源の電流注入調節による特性制御」, 第 21 回渦糸物理国内会議, 2013 年 12 月 13 日、東北大学金属材料研究所（仙台市）
- [17] Y. Yoshioka, N. Hirayama, S. Mizuta, T. Nakagawa, I. Kakeya, and M. Suzuki, "Frequency tuning range of intrinsic Josephson junction terahertz emitter as functions of device geometries and structures", International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013, Apr. 1-5, 2013.
- [18] 前田圭穂, 吉岡佑介, 神原仁志, 辻本学, 掛谷一弘, 「Pb 置換 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ発振」, 第 21 回渦糸物理国内会議, 2013 年 12 月 13 日、東北大学金属材料研究所（仙台市）
- [19] Itsuhiro Kakeya, Yuta Omukai, and Minoru Suzuki, "Effect of thermal inhomogeneity for terahertz-wave excitation in intrinsic Josephson junction stack", International workshop on Pathbreaking Phase Sciences in Superconductivity 2012, 2012/01/14, Osaka, Japan
- [20] 掛谷一弘, 「高温超伝導体固有ジョセフソン接合における巨大量子同期現象: テラヘルツ波発振、巨視的量子トンネル」, 低温工学協会・超伝導学会関西支部 2012 年第 1 回講演会, 2012 年 5 月 25 日、京都大学桂キャンパス
- [21] Itsuhiro Kakeya, "Effect of thermal inhomogeneity of intrinsic Josephson junction stack for excitation of synchronized terahertz Josephson

plasma oscillations", The 8th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (PLASMA 2012), 2012/06/10-13, Izmir, Turkey

- [22] 平山伸夫, 水田慎吾, 中川拓人, 掛谷一弘, 鈴木実, 「高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波発振における周波数制御」第 73 回応用物理学学会学術講演会、愛媛大学、松山大学、2012 年 9 月 13 日
- [23] 平山伸夫, 水田慎吾, 掛谷一弘, 鈴木実, 「 $\text{Bi}2212$ 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波発振周波数のバイアス電流・温度依存性」, 日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学、2012 年 9 月 20 日
- [24] I. Kakeya, "Conditions of terahertz radiation from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions", Superconductivity Centennial Conference, 2011/09/20, The Hague, The Netherlands.
- [25] 大向勇太, 掛谷一弘, 鈴木実, 「 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波発振に関する電極の影響」, 日本物理学会 2011 年秋季大会、2011/09/24、富山大学
- [26] 掛谷一弘, 大向勇太, 鈴木実, 「 $\text{Bi}2212$ 固有接合における THz 波励起の電極による抑制」, F09 第 19 回 渦糸物理国内会議、2011/12/9、物質材料研究機構
- [27] I. Kakeya, Y. Omukai, and M. Suzuki, "Effect of thermal diffusion on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa structures for terahertz radiation", The 13th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors, 2011/08/01, Chicago, USA
- [28] Yuta Omukai, Tomonari Kawasaki, Itsuhiro Kakeya, and Minoru Suzuki, "Terahertz Radiation from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Intrinsic Josephson Junctions above Critical Current", The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), 2011/08/12, Beijing, China.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称:「温度分布型超伝導体テラヘルツ発振器および温度分布型超伝導体テラヘルツ発振器の製造方法」

発明者: 掛谷一弘、大向勇太、鈴木実

権利者: 国立大学法人京都大学

種類: 特願

番号: 2012-118983

出願年月日: 平成 24 年 5 月 24 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://sk.kuee.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