

令和 元年 9 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2018

課題番号：15KK0204

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（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Time-domain coherence measurement and substitution effect of HTSC THz source Research Project(Fostering Joint International Research)

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,100,000円

渡航期間： 8ヶ月

研究成果の概要（和文）：銅酸化物高温超伝導体から作られた、テラヘルツ周波数領域の電磁波を放射する高温超伝導テラヘルツ光源は、超伝導の特徴が現れる新しい光源である。本研究では、この光源の放射強度を実用レベルに到達させるために、発振の過程を時間分解で観測することを目標として、日本とフランスの技術を融合させることを試みた。当初目的とした時間分解観測には至らなかったが、外部電磁場と素子との結合に関する成果は得られた。また、この素子を移動体間的高速通信に応用するために、受信アンテナの向きに感度が依存しない、円偏光を放射させることを試みたところ、連続テラヘルツ光源として最高の円偏光度が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、超伝導体を研究対象として来た研究代表者と、半導体を研究対象として来たフランス側研究協力者の異分野融合研究である。研究領域の異なる研究者が協働することにより、それまでお互いに見てきた着眼点からの研究が進められる。本研究自身の意義は、移動体間高速通信に使える新しいテラヘルツ光源を見つけ出したという点にあるが、それに留まらず、半導体と超伝導体の利点を組み合わせたハイブリッドデバイスが近い将来に創成されることが期待される。

研究成果の概要（英文）：A high temperature superconducting terahertz light source emitting electromagnetic waves in the terahertz frequency region, which is made of a copper oxide high temperature superconductor, is a new light source in which the superconducting characteristics appear. In this research, in order to reach the practical level of the radiation intensity of this light source, we tried to combine the technologies of Japan and France with the goal of observing the process of synchronization in a time-domain. Although we did not reach the observation that was originally aimed at, results concerning the coupling of the external electromagnetic field and the device were obtained. In addition, we tried to radiate circularly polarized light whose sensitivity does not depend on the direction of the receiving antenna, and the highest degree of circular polarization was obtained among existing continuous terahertz light sources.

研究分野：超伝導

キーワード：テラヘルツ分光 時間領域分光 ジョセフソン効果 高温超伝導体 円偏光 同期現象 量子カスケードレーザー 非平衡状態観測

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導テラヘルツ光源は、結晶を構成する固有ジョセフソン接合が交流ジョセフソン効果に従って同期振動し、外部に 0.3-1.6THz の電磁波を放射する。70 K を超える温度でもサブテラヘルツの発振が観測されていることもあり、「テラヘルツギャップ」を埋める有力な光源のひとつとして急速に注目されている。同期現象のミクロなメカニズムは、解明によりミリワット級の発振を設計することができるだけでなく、通信応用に必要な変調制御の原理を与えるので、実用化に向けた不可欠の課題である。申請者は、平成 19 - 21 年度科研費基盤(A)(研究分担者)、平成 23 - 25 年度科研費若手(A)(研究代表者)、そして平成 26 - 28 年度基盤(B)(基課題)で高温超伝導テラヘルツ光源の研究に取り組み、以下の特性を明らかにしてきた。

高温超伝導テラヘルツ光源の発振周波数は、バイアス電圧と素子のサイズによって決まる
発振周波数・強度は、素子自身の温度分布や電極構造に強く依存する

単一素子において発振周波数が、30%以上も変化できる

しかしながらこれまでに得られている最大の放射電力は 0.6 マイクロワットであり、実用テラヘルツ光源としては不十分であるうえに、発振周波数などの素子の特性を制御することが容易ではないという課題があった。

2. 研究の目的

放射出力を最適化するためには、積層する多数の固有ジョセフソン接合の振動が同期する様子や、同期によって得られる素子表面の電流分布を仔細に観察する必要がある。そこで、研究項目を以下の 2 点に設定する：(1)同期現象を明らかにするために、発振電場の時間発展を観測する。これは、超伝導秩序パラメータ の時間発展を可視化することに相当する。(2)空間に放射される電磁波の偏光を精密に測定して、素子表面に誘起されている電流分布を推定し、同期の状態に関する新しいパラメータを得る。

3. 研究の方法

研究項目(1)のために、量子カスケードレーザー(QCL)のゲイン観測で実績のあるフランス École Normale Supérieure (ENS), Paris の研究室に滞在して研究を行った。QCL では、ブロードバンドなテラヘルツパルスによって量子井戸における電子の 2 準位間に反転分布が生じ、その誘導放出を観測している。一方、固有ジョセフソン接合では、集団励起モードであるジョセフソンプラズマがサブテラヘルツ領域に存在する。テラヘルツ発振は、メサ構造内に励起されたジョセフソンプラズマ波がメササイズによって決まる波数に対応する周波数で発振する。そこで我々は、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) によって、テラヘルツ領域におけるメサ構造デバイスの透過スペクトルを観測したうえで、バイアス印加による透過スペクトルの変化を観測することを行った。

また、研究項目(2)のために、円偏光を放射する形状のデバイスについて、ENS の遠赤外分光器を用いて周波数の精密測定を行い、京都大学にてストークス偏光パラメータの測定を行った。また、ドイツ・チュービンゲン大学の低温走査レーザー顕微鏡を使用して、素子の局所的な温度分布を測定し、偏光と温度分布の関係を解析した。

4. 研究成果

(1) 時間発展観測

発振デバイス構造の試料を測定する前に、LAO 基板上にポリイミドで接着した Bi2212 単結晶を数ミクロン程度に薄く劈開し、80 ミクロン幅のストライプ状に加工した試料の透過スペクトルを測定した。その結果、0.5THz 付近と 2 THz 付近に吸収が観測された。それぞれ、ストライプに閉じ込められたジョセフソンプラズマとフォノン振動に由来する吸収と考えられる。しかしながら、ジョセフソンプラズマ吸収は比較的弱く、線幅は数百 GHz であって、自励発振スペクトルとは中心周波数は近いものの、線幅は大きく異なる。

次に、発振バイアス条件における透過スペクトルの変化を観測するために、京大で作製した発振素子について ENS で FTIR 分光を行い、クライオスタットを THz-TDS 分光系に移動させて、テラヘルツパルス照射した。しかしながら、直前の FTIR 分光で特定した発振バイアス条件に設定した場合に、透過スペクトルに有意の変化は見られなかった。これは、以下の技術的な問題が解決されていないためだと考えられる。第一に、測定素子そのものの無バイアス状態での透過スペクトルが特定できていないことが挙げられる。そのために、バイアス印加によるスペクトルの変化を十分に判断できないという状況になっている。このことから、テラヘルツパルスを結晶より十分小さい領域に絞るなどといった光学系の改良が必要であることがわかった。第二に、外部から照射したテラヘルツ電磁波と素子とのインピーダンスマッチングが十分でなく、メサ構造内部の状態が透過電磁波に反映されていない可能性がある。今回の実験は、自励放射実験に実績のある構造の素子をそのまま使用したので、外部から照射された電磁波との結合については全く考慮されていない。したがって、外部電磁場と結合が強くなるためにアンテナや共振器を付加するなど、デバイス構造の改良が必要であることがわかった。これは、ENS の共同研究先が有する QCL とテラヘルツパルスの結合についての数値計算資源を活用することができる。

2018 年 2 月に研究代表者の研究室にチタンサファイアフェムト秒パルスレーザーが移設されたため、京都大学で効率的な研究ができるように、ENS と同様のテラヘルツ時間発展分光計を京都大学で構築することを進めていった。ENS から提供された、彼らの分光系で使用しているものと同様のアンテナを組み込み、京都大学で放射分光と THz-TDS の同時計測が可能となった。

(2) 偏光制御

円盤の一部を切り取った形状を持つメサ構造素子を作成し、偏光板を用いた透過測定から偏光楕円軸比が 3dB 以下という高い円偏光度のテラヘルツ放射に成功した。また、この時の発振周波数の測定も行い、軸比の周波数依存性がパッチアンテナモデルから予想されるものより広い範囲で低い軸比（円偏光）が観測されていることから、発振周波数の引き込み現象が起きていることが考えられる。

前述のように、軸比測定から円偏光を指摘したが、この測定からは円二色性分光で不可欠な光子のヘリシティ（電場の回転方向）を特定することはできない。そこで、発振周波数領域に対応する波長板を導入し、ヘリシティまでも特定するストークス偏光パラメータの測定を行った。まずは、ENS の THz-TDS システムで位相遅延の実験を行い、波長板が意図通り動作していることを確認した。次に、波長板と偏光板を組み合わせた光学系を構築し、ストークス偏光パラメータを測定した。その結果、電極と摂動素子の位置関係とヘリシティの関係がわかった。また、LTSLM の測定から、電極の直下において素子の局所温度上昇がみられることがわかった。局所温度上昇とヘリシティの関係を予言した浅井らによる数値計算と合わせて考察した結果、上述のストークパラメータによる測定とコンシステントであることが判明した。

また、円偏光素子から発振電磁波を分光したところ、バイアスに変調を加えることで単一の発振周波数が、最大3に分裂することがわかった。このことは、超伝導テラヘルツ光源の応用を示唆しているだけでなく、研究項目(1)の時間発展観測へのヒントにもなる。

また、円偏光発振から視点を変えて、複数メサ同時発振時の偏光評価を行った。通常作成されている長方形メサ構造素子について、単一メサでは偏光が楕円であったものが、同時に2つのメサが発振する状態での偏光は、より直線に近いものになった。これは、2つのメサが位同期して発振している証拠となる。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

A. Shinojima, I. Kakeya, S. Tada, "Association of Space Flight With Problems of the Brain and Eyes," [JAMA ophthalmology **136** \(9\), 1075-1076;](#)
DOI:[10.1001/jamaophthalmol.2018.2635](#).

A. Elarabi, Y. Yoshioka, M. Tsujimoto, I. Kakeya, "Circularly polarized terahertz radiation monolithically generated by cylindrical mesas of intrinsic Josephson junctions," [Applied Physics Letters **113** \(5\), 052601;](#) DOI:[/10.1063/1.5040159](#).

A. Elarabi, Y. Yoshioka, M. Tsujimoto, and I. Kakeya, "Monolithic Superconducting Emitter of Tunable Circularly Polarized Terahertz Radiation," [Phys. Rev. Applied **8**, 064034 \(2017\);](#)
DOI: [10.1103/PhysRevApplied.8.064034](#)

Y. Nomura, R. Okamoto, and I. Kakeya, "Negative correlation between enhanced crossover temperature and fluctuation-free critical current of the second switch in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ intrinsic Josephson junction," [Superconductor Science Technology, **30**, 105001\(2017\);](#) DOI: [10.1088/1361-6668/aa7b23](#)

M. Tsujimoto, T. Doi, G. Kuwano, A. Elarabi, and I. Kakeya, "Engineering and characterization of a packaged high- T_c superconducting terahertz source module," [Superconductor Science and Technology **30**, 064001\(2017\);](#)
DOI:[10.1088/1361-6668/aa67aa](#)

Y. Nomura, R. Okamoto, and I. Kakeya, "Dynamics of First and Second Switches in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ Intrinsic Josephson Junction Stacks Measured by Specifically Designed Electronics," [IEEE Transactions on Applied Superconductivity **27**, 7200205, \(2017\);](#)
DOI: [10.1109/TASC.2016.2642043](#)

[雑誌論文](計 6 件)

Asem Elarabi, "Polarization Properties of Terahertz Radiation Monolithically Generated from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ Mesas", 2018年9月21日、3rd International Science and Applications of Thin Films, Conference & Exhibition (トルコ)

Itsuhiro Kakeya, "Evolution of collective intrinsic Josephson phenomena in cuprate superconductors," A. A. Abrikosov Memorial Conference, 2018年6月27日、Landau Institute of Theoretical Physics, Chernogolovka, Russia

掛谷一弘、「モノリシック超伝導ジョセフソンプラズマ光源の偏光測定と制御」、第26回渦糸物理国内会議、2018年12月5日、スパリゾートハワイアンズ(いわき市)

藤田秀眞、「高温超伝導体メサ構造アレイからのテラヘルツ放射の偏光特性」、低温工学・超

電導学会関西支部若手合同講演会、2018年11月30日、関西学院大学大阪梅田キャンパス（大阪市）

掛谷一弘、「銅酸化物超伝導体における準粒子トンネル伝導の強磁場応答」、強磁場コラボラトリにおける物性研究の現状と展望、2018年11月28日、東北大学片平キャンパス（仙台市）

掛谷一弘、「銅酸化物高温超伝導体における集団的固有ジョセフソン現象」、つくば-柏-本郷超伝導かけはしプロジェクト ワークショップ、2018年3月27日、物質材料研究機構（つくば市）

前田慶一郎、アセムエララビ、藤田秀真、掛谷一弘、「高温超伝導体テラヘルツ光源における円偏光特性の精密評価」、第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月20日、名古屋国際会議場（名古屋市）

掛谷一弘、アセムエララビ、前田慶一郎、藤田秀真、辻本学、「モノリシック超伝導ジョセフソンプラズマ光源の偏光測定と制御」、第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月20日、名古屋国際会議場（名古屋市）

アセムエララビ、藤田秀真、辻本学、R. Wieland, F. Rudau, R. Kleiner, 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の偏光特性とデバイス表面温度分布」、日本物理学会2018年秋季大会、2018年9月12日、同志社大学京田辺キャンパス（京田辺市）

Asem S Elarabi, Yusuke Yoshioka, Yusuke Todaka, Shuma Fujita, Manabu Tsujimoto, Itsuhiro Kakeya "Monolithic generation of polarized THz radiation from superconducting Bi-2212 mesas", 第65回応用物理学会春季学術講演会、2018年3月19日、早稲田大学西早稲田キャンパス（東京都）

藤田 秀真、戸高 裕介、アセム エララビ、掛谷 一弘、「偏光解析による固有ジョセフソン接合テラヘルツ光源の同期モードの特定」、第65回応用物理学会春季学術講演会、2018年3月19日、早稲田大学西早稲田キャンパス（東京都）

掛谷一弘、「固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波放射の偏光測定」、ワークショップ新規超伝導体・ナノ構造超伝導体における渦糸物理、2018年2月24日、東京大学本郷キャンパス（東京都）

I. Kakeya, "Evolution of collective inter-layer intrinsic Josephson phenomena in three BSCCO superconductors", Seminar of Department of Solid State Spectroscopy, Max-Planck Institute for Solid State Research, 2017/9/13, Stuttgart (Germany) .

I. Kakeya, "Phase dynamics of stacked intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$: role of the CuO_2 planes composing superconducting layers" Special Seminar of Institute for Laser Physics, University of Hamburg, 2017/8/21, Hamburg (Germany) .

I. Kakeya, "Emission of coherent terahertz electromagnetic wave from intrinsic Josephson junctions of high-temperature superconductors: progress and perspective" Seminar of Laboatoire Pierre Aigrain, École Normale Supérieure, 2017/7/17, Paris (France) .

I. Kakeya, "Phase dynamics of stacked intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$: role of the CuO_2 planes composing superconducting layers" Seminar of Laboratoire des Solides Irradiés, École Polytechnique, 2017/6/12, Palaiseau (France) .

I. Kakeya, "Phase dynamics of stacked intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$:"

role of the CuO₂ planes composing superconducting layers” Seminar of Department of Physics, University of College London, 2017/5/25, London (United Kingdom).

Asem Elarabi, Y. Yoshioka, M. Tsujimoto, I. Kakeya, “**Generation of Circularly Polarized THz Radiation from Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} Mesa Structures**”, 30th International Symposium on Superconductivity (ISS2017), 2017/12/14, Tokyo

Asem Elarabi, “**Investigations of the polarization behavior of high-T_c superconducting terahertz emitters**”, 第 25 回渦糸物理国内会議、 2017 年 11 月 29 日、沖縄科学技術大学院大学（恩納村）

Asem Elarabi, Y. Yoshioka, M. Tsujimoto, I. Kakeya: “**Monolithic polarization control of THz radiation using Bi-2212 mesa geometrical structures.**” 応用物理学会第 78 回秋季学術講演会, 2017 年 9 月 7 日, 福岡市

21 Asem Elarabi, Y. Yoshioka, M. Tsujimoto, T. Doi, and I. Kakeya, “**Generation of Circularly-Polarized Terahertz Emission from a High-T_c BSCCO Mesa**”, ワークショップ「**ナノ構造超伝導体中の渦糸物理**」, 2017 年 1 月 29 日, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス（堺市）

〔学会発表〕(計 21 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
なし

〔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・大学院工学研究科・准教授
研究者番号： 80302389

(2) 研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

Jerome Tignon
パリ高等師範学校・物理学研究所・教授
Sukhdeep Dhillon
パリ高等師範学校・物理学研究所・CNRS フェロー
Reinhold Kleiner
チュービンゲン大学・物理学科・教授