

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 17 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02606

研究課題名(和文) 超伝導固有ジョセフソン接合における多光子レーザー発振の実証

研究課題名(英文) Demonstration of multi-photon laser emission from superconducting intrinsic Josephson junctions

研究代表者

掛谷 一弘 (Takeya, 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) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：空間を飛ぶ電波・光を用いて大量のデータをやりとりする高速無線通信の要望が、コロナ禍を経てますます高まっています。その世界的な需要に対応するために、さらに進化した無線ネットワーク、Beyond 5G/6G技術の開発が急ピッチで進んでいます。こうした無線通信に必要な電磁波の周波数帯であるテラヘルツ帯の光源のひとつとして、超伝導テラヘルツ光源が研究されています。本研究では、超伝導だけが持つ性質であるジョセフソン効果を利用することで、市販の信号発生器から発生する3ギガヘルツのマイクロ波信号をテラヘルツ波に乗せて送信する、テラヘルツ波エフエム技術の開発に成功しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導テラヘルツ光源は小型で安定に動作する固体デバイスであり、単色テラヘルツ発振、広帯域チューニング性能、アレイ化による高出力発振、高い放射効率、円偏光テラヘルツ電磁波の発生など、他の技術にはないユニークな特徴を備えています。本研究で新たに実現したFM方式は、従来の複雑かつ特殊な光学機器を使用する方式よりも単純でありながら、高い精度で周波数や帯域を制御できる点で優れています。これまでに報告された超伝導テラヘルツ光源の周波数範囲は0.15テラヘルツから2テラヘルツの領域であり、Beyond 5G/6G通信のターゲットとなる周波数領域が含まれます。

研究成果の概要(英文)：The demand for high-speed wireless communications that exchange large amounts of data using radio waves and light flying through space has been increasing ever since the Corona Disaster. To meet this global demand, development of even more advanced wireless networks, Beyond 5G/6G technologies, is proceeding at a rapid pace. Superconducting terahertz light sources are being studied as one of the light sources in the terahertz band, the frequency band of electromagnetic waves necessary for such wireless communications. In this research, we have successfully developed terahertz-wave FM technology that transmits 3 gigahertz microwave signals generated by a commercial signal generator in terahertz waves by utilizing the Josephson effect, a property that only superconductors possess.

研究分野：超伝導デバイス

キーワード：ジョセフソン効果 テラヘルツ放射 高温超伝導体 周波数変調 テラヘルツ通信 周波数変換

1. 研究開始当初の背景

銅酸化物高温超伝導体 Bi2212 は超伝導層の CuO₂ 層と絶縁層である BiO 層が c 軸方向に交互に積み重なった結晶構造を持つ。超伝導の強さを示す秩序変数は CuO₂ 二重層に偏在しており、c 軸方向の伝導はジョセフソン効果によって記述される。このように、超伝導体の結晶構造に由来する構造を固有ジョセフソン接合と呼ぶ [1]。

ジョセフソン接合を流れる超伝導電流 I と接合にかかる電圧 V は、ジョセフソン関係式

$$I(t) = I_c \sin \gamma(t) \quad (1)$$

$$V(t) = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\gamma(t)}{dt} \quad (2)$$

を満たす。ここで、 I_c はジョセフソン臨界電流、 $\gamma(t)$ は接合を形成する 2 つの超伝導体の秩序変数のゲージ不変位相差、 e は電気素量、 \hbar はディラック定数である。式(2) より、接合間に定電圧を印加したとき、位相差は $\frac{2eV}{\hbar}t$ で変化する。これを式(1) に代入すると、接合間に

$$f = \frac{2e}{h}V \quad (3)$$

の交流電流が流れることが分かる。これを交流ジョセフソン効果と呼ぶ。

2007 年、Bi2212 単結晶上に形成された台地状の構造 (メサ構造) から交流ジョセフソン効果に起因するテラヘルツ波が放射されることが発見された [2]。メサ構造をもつ発振器は 1000 程度積層するジョセフソン接合内を流れる交流ジョセフソン電流により励起されたジョセフソンプラズマ振動が空洞共振効果などによって同期し、メサ構造表面に巨視的な高周波電流が流れる時に放射が検出される [3]。これを著者らはジョセフソンプラズマ放射 JPE と呼んでいる。

これまでに JPE の多様な特性が明らかにされてきたが、超伝導ジョセフソン効果に独特であり、半導体では原理的に実現不可能な特性の開拓が望まれていた。

2. 研究の目的

式(3) より、JPE の放射周波数は、接合間に印加する電圧に単純に比例し、実験的にも複数の研究グループにより確かめられている [4,5]。そこで我々は、JPE の印加電圧に変調を加えることで放射テラヘルツ波の周波数変調(FM)が可能であると考え、そのスペクトルの観測を試みた。つまり、JPE に変調電圧

$$V(t) = V_0 + V_m \cos \omega_m t \quad (4)$$

を印加したときを考える。JPE は電圧 V_0 印加時、角周波数 $\omega_m = 2\pi f_m$ 、振幅 A_c のテラヘルツ波を放射するものとする。このとき、FM 信号は

$$s_{FM}(t) = A_c \sin(\omega_c t + m_f \sin(\omega_m t)) \quad (5)$$

となる。ここで、 m_f は最大角周波数偏移幅 ω_d を変調周波数で除した、変調指数と呼ばれるパラメータである。よって式(3) より、JPE における固有ジョセフソン接合の積層数が N のとき、

$$\omega_c = \frac{2eV_0}{\hbar N} \quad (6)$$

$$m_f = \frac{2eV_m}{\hbar N \omega_m} \quad (7)$$

となり、直流電圧は中心周波数を決定し、変調指数は変調振幅と変調周波数によって決まる。

また、式(5) をフーリエ変換して得られる FM 信号のスペクトルは、

$$P_{\text{FM}}(\omega) = \frac{1}{2} A_c^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(m_f) \delta(\omega_c - n\omega_m) \quad (8)$$

となることが知られている。ここで J_n は n 次の第一種ベッセル関数である。つまり、理論上は直流電圧 V_0 印加時の放射角周波数 ω_c を中心に、 ω_m おきに無限に FM スペクトルが見られる。しかし、実際は分光器の感度が有限であることから無限に続く FM スペクトルは見られない。

3. 研究の方法

本研究で用いた測定系を図 1 に示す。ファンクションジェネレータから直流電圧を、シンセサイザから交流電圧を発生させ、バイアステーを介して重畳し、JPE に印加した。放射されたテラヘルツ波を、ビームスプリッタを用いて分割し、一方は固定鏡、他方は移動鏡を介してポロメータに入射させ、得られた信号をフーリエ変換することで周波数スペクトルを得た。このとき、分解能 Δf は移動ミラーの可動域 L と光速 c に依存し、

$$\Delta f = \frac{c}{2L} \quad (9)$$

である。今回、 $L = 20$ cm であるため、分解能は 0.75 GHz となる。テラヘルツ波は大気中の水蒸気によって容易に減衰するため、光学系は密封された空間に配置し、乾燥空気を注入して湿度が 10% 以下になるような環境で測定を行った。

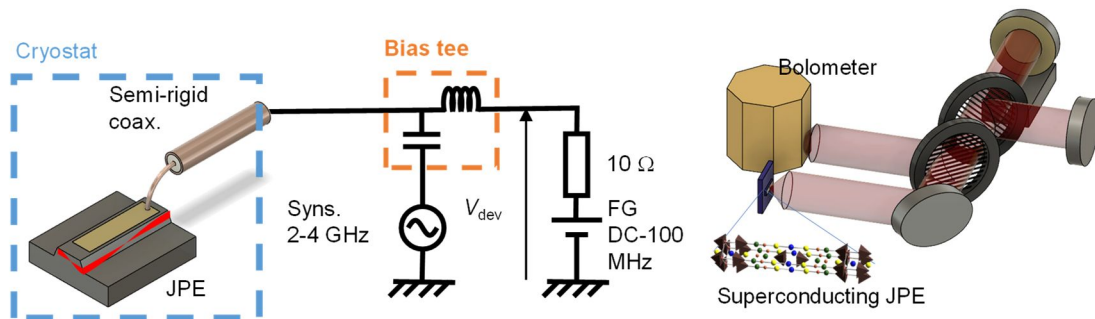


図 1: バイアス回路 (左) およびフーリエ分光装置 (右) の概念図。下図の結晶構造は、Bi2212 単結晶の方位と電磁波の放射方向の対応を示すために描かれている。

4. 研究成果

ここで用いたデバイスでは、積層するすべての IJJ が電圧状態となっているマッカンバープランチで放射が観測された。放射が観測された複数の電圧条件に固定し、分光器で得られたスペクトルを図 2 に示す。この結果から、を放射周波数は 840-890 GHz の範囲にあり、メサ構造への印加電圧に対して比例する関係にあった。

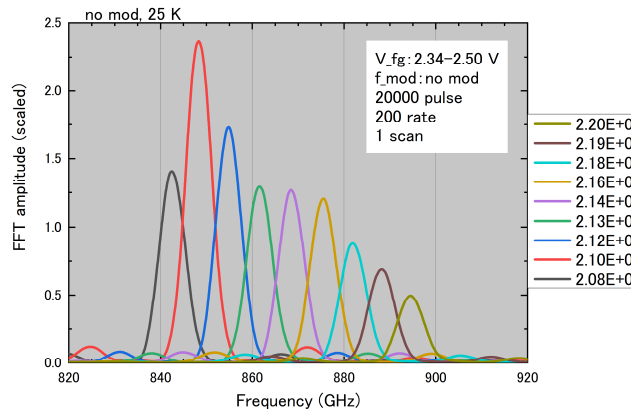


図 2: 素子温度 25 K における無変調バイアス時の放射スペクトル。枠外の凡例はメサ構造に加えられた電圧を示す。

次に、直流バイアス電圧と変調電圧の振幅を固定し、2-3.5 GHz の変調を加えた結果を図 3 (左)に示す。変調周波数の増加に伴いピーク間隔が大きくなっていく様子が観測できた。さらに、そのピークは無変調バイアス電圧での放射周波数を中心とし、変調周波数と一致する間隔に現れる式(8)を示しており、これは周波数変調テラヘルツ波が放射されていることを示している。これらのスペクトルを復調できれば、テラヘルツ波に変調信号によって情報を乗せ、高速通信への応用が実現する。

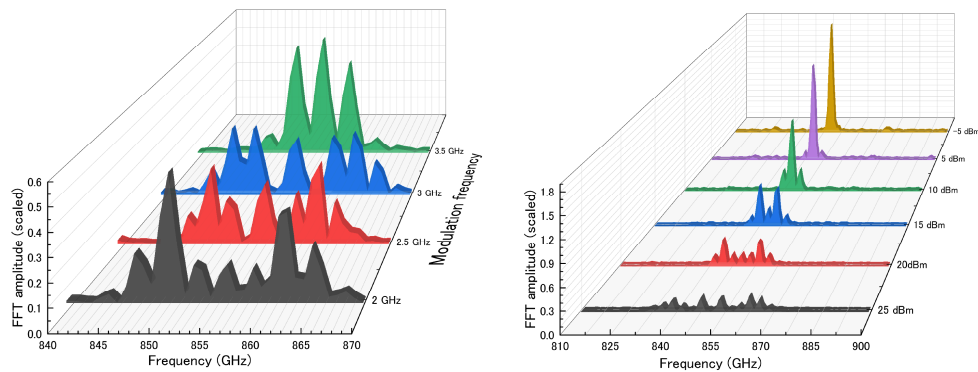


図 3: (左) 変調周波数 2-3.5 GHz での放射スペクトル。変調周波数に応じた間隔の複数ピークが観測されている。(右) 変調周波数 3 GHz における変調振幅依存性。変調振幅はマイクロ波シンセサイザの出力で表されている。

それをふまえ、次に、直流バイアス電圧、変調電圧の周波数を 3 GHz に固定し、変調電圧の振幅を-5dBm から 25dBm に変化させた。その結果が図 3(右)である。変調振幅を大きくするにつれ、バンド幅が広がっていく様子が観測できた。そのピーク間隔は一樣に 3 GHz である。一方、テラヘルツ波は大気中の水蒸気にも容易に減衰されるという弱点があるため、長距離通信に用いるには課題を残すが、その特性を逆に利用して超近距離高速通信に用いることで、盗聴の危険性のない安全なネットワークを構築できる可能性も持つ。

これまでの測定ではそれぞれ変調周波数、変調振幅を可変とし、バイアス電圧は常に固定し、JPE の周波数スペクトルについて考察を行ってきた。そこで、次は変調周波数が 3 GHz と 10 kHz のときに変調振幅を固定し、直流バイアス電圧を変化させた。その結果が図 4 である。まず、10 kHz ではピーク間隔が 3 GHz より非常に狭く無数のピークが観測されるはずであるが、ピーク分離するには分光器の分解能が不十分であるため、ピークの包絡線のみが見られているためである。

この測定では、バイアス電圧を小さくしていくことで中心の放射周波数が減少し、それに伴いスペクトルの位置も移動していく様子が分かる。そして放射周波数が放射範囲から外れると、スペクトルが見られなくなっていく。ここで最も興味深いことは、 $f_m = 10$ kHz では 835 GHz までしかスペクトルが見られなかったのに対し、 $f_m = 3$ GHz では 815 GHz までスペクトルが広がったことである。図 2 より無変調時の JPE の放射範囲は 840 GHz 程度までであり、それより低い周波数では放射しない。これは、JPE 内のジョセフソンプラズマ振動同期現象のコヒーレント時間が有限であるためと考えられる。つまり、10 kHz ではバイアス電圧が放射範囲から外れ、再び放射範囲に入る前に完全に同期振動が止まってしまっているのに対して、3 GHz では同期振動が止まる前に再び放射範囲に入っていると考察できる。これらを比較して、同期のコヒーレント時間 τ を考察すると、およそ

$$0.15 \text{ ns} < \tau < 50 \text{ } \mu\text{s} \quad (11)$$

と推定できる。より厳密に緩和時間を見積もるためには、変調周波数を細かく変える必要がある。

さらに、より高周波数の変調を加えることができれば JPE の放射範囲を超えて帯域幅をとれる可能性を示しており、より高周波を加えられる測定系・JPE デバイスの作製が必要である。成果の詳細は文献 [6] で公表されているので、参照いただきたい。

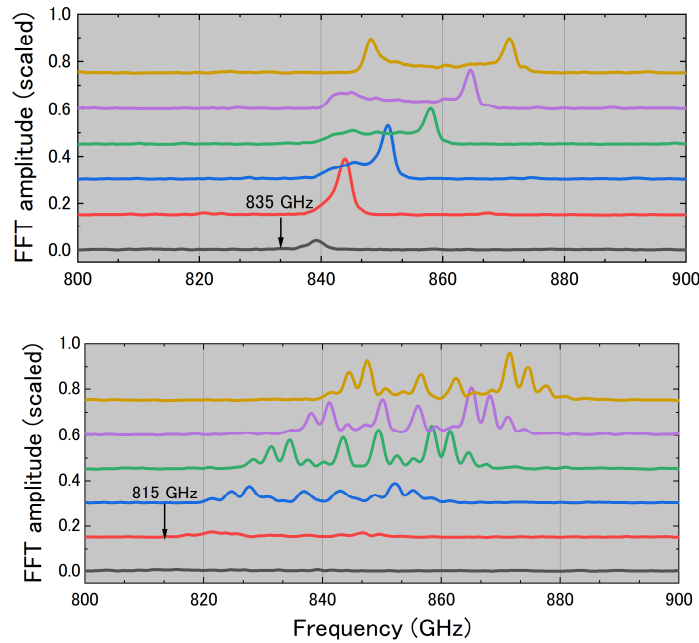


図 4: 変調周波数 10 kHz のスペクトル (上) および 3 GHz のスペクトル (下)、それぞれの図の上から下にかけて直流電圧 V_0 を減少させている。 V_0 に対応して中心周波数が減少している。

< 参考文献 >

- [1] R. Kleiner, F. Steinmeyer, G. Kunkel, and P. Müller, *Intrinsic Josephson Effects in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ Single Crystals*, Phys Rev Lett **68**, 2394 (1992).
- [2] L. Ozyuzer et al., *Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors*, Science (1979) **318**, 1291 (2007).
- [3] I. Kakeya and H. Wang, *Terahertz-Wave Emission from $\text{Bi}2212$ Intrinsic Josephson Junctions: A Review on Recent Progress*, Supercond Sci Technol **29**, 073001 (2016).
- [4] 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 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ Mesa Devices*, Phys Rev B **84**, 064523 (2011).
- [5] M. Tsujimoto et al., *Broadly Tunable Subterahertz Emission from Internal Branches of the Current-Voltage Characteristics of Superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ Single Crystals*, Phys Rev Lett **108**, 107006 (2012).
- [6] M. Miyamoto, R. Kobayashi, G. Kuwano, M. Tsujimoto, and I. Kakeya, *Wide-Band Frequency Modulation of a Terahertz Intrinsic Josephson Junction Emitter of a Cuprate Superconductor*, Nat Photonics **18**, 267 (2024).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10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 Kobayashi Ryota, Hayama Ken, Kakeya Itsuhiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Circuit models of simultaneously biased intrinsic Josephson junction stacks for terahertz radiations in high-bias regime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 093002 ~ 093002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac8597	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 Kobayashi Ryota, Hayama Ken, Fujita Shuma, Tsujimoto Manabu, Kakeya Itsuhiro	4. 巻 17
2. 論文標題 Spontaneous Frequency Shift and Phase Delay of Coupled Terahertz Radiation Mediated by the Josephson Plasmon in a Cuprate Superconductor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 54043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.17.054043	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 Saito Yoshito, Adachi Shintaro, Matsumoto Ryo, Nagao Masanori, Fujita Shuma, Hayama Ken, Terashima Kensei, Takeya Hiroyuki, Kakeya Itsuhiro, Takano Yoshihiko	4. 巻 14
2. 論文標題 THz emission from a Bi2Sr2CaCu2O8+ cross-whisker junction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 033003 ~ 033003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abe166	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 Komori Sachio, Kakeya Itsuhiro	4. 巻 90
2. 論文標題 Interlayer Transport and Josephson Coupling in a 1212-type Cuprate Superconductor with a (Pb,Cu) ₂ O Barrier Layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024702 ~ 024702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.024702	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 Hayama Ken, Fujita Shuma, Kuriyama Yuya, Maeda Keiichiro, Tsujimoto Manabu, Kakeya Itsuhiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Mutual Synchronization of Terahertz Emissions from Multiple Intrinsic Josephson Junction Mesas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET)	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/UCET51115.2020.9205454	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 Tsujimoto M., Fujita S., Kuwano G., Maeda K., Elarabi A., Hawecker J., Tignon J., Mangeney J., Dhillon S.S., Kakeya I.	4. 巻 13
2. 論文標題 Mutually Synchronized Macroscopic Josephson Oscillations Demonstrated by Polarization Analysis of Superconducting Terahertz Emitters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 051001-051001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.13.051001	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 Miyamoto Masashi, Kobayashi Ryota, Kuwano Genki, Tsujimoto Manabu, Kakeya Itsuhiro	4. 巻 18
2. 論文標題 Wide-band frequency modulation of a terahertz intrinsic Josephson junction emitter of a cuprate superconductor	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Photonics	6. 最初と最後の頁 267 ~ 275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41566-023-01348-0	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 Elarabi Asem, Saito Yoshito, Asai Hidehiro, Kobayashi Ryota, Hayama Ken, Maeda Keiichiro, Fujita Shuma, Yoshioka Yusuke, Takano Yoshihiko, Tsujimoto Manabu, Kakeya Itsuhiro	4. 巻 63
2. 論文標題 Polarized terahertz electromagnetic-wave radiation from cuprate superconductor Bi2212 mesa structures	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 020801 ~ 020801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad0cdd	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 Saito Y., Kakeya I., Takano Y.	4. 巻 121
2. 論文標題 Polarization analysis of terahertz emission from Bi-2212 cross-whisker intrinsic Josephson junction devices and their refractive index	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 123290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0123290	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 KAKEYA Itsuhiro	4. 巻 E106.C
2. 論文標題 Terahertz Radiations and Switching Phenomena of Intrinsic Josephson Junctions in High-Temperature Superconductors: Josephson Phase Dynamics in Long- and Short-Ranged Interactions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 272 ~ 280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2022SEI0004	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 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 9件)

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 高野義彦, 齋藤嘉人, 掛谷一弘
2. 発表標題 Bi2212ウィスカ十字接合からのテラヘルツ波放射特性評価
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 掛谷一弘, 小林亮太, 巴山顕, 藤田秀真, 辻本学
2. 発表標題 放射テラヘルツ波の偏光評価による固有ジョセフソン接合列間結合
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 掛谷 一弘
2. 発表標題 積層固有ジョセフソン接合メサ構造からの円偏光テラヘルツ波放射と非線形振動子同期現象
3. 学会等名 電子情報通信学会2022年総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kakeya Itsuhiro
2. 発表標題 Mutual synchronization of Josephson plasma oscillations in high-temperature superconductors
3. 学会等名 Material Research Meeting 2021 (MRM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kakeya Itsuhiro
2. 発表標題 Mutual synchronization of non-linear Josephson oscillations mediated by superconducting plasmons of cuprate superconductors
3. 学会等名 Low dimensional superconducting hybrids for novel quantum functionalities (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kakeya Itsuhiro
2. 発表標題 Mutual synchronization and helicity switching of terahertz radiation from intrinsic Josephson junction stack demonstrated by polarization analysis
3. 学会等名 12th International Conference on Intrinsic Effects and Horizons of Superconducting Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林亮太, 巴山顕, 藤田秀眞, 掛谷一弘
2. 発表標題 固有ジョセフソン接合メサアレイの同期発振観測と解析
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 齋藤嘉人, 掛谷一弘, 高野義彦
2. 発表標題 ウイスカ十字接合からのテラヘルツ発振
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 I. Kakeya
2. 発表標題 Mutual Synchronization of Terahertz Emissions from Multiple Intrinsic Josephson Junction Mesa
3. 学会等名 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE UK - CHINA EMERGING TECHNOLOGIES (UCET) 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田慶一郎, 巴山顕, 栗山由也, ELARABI A., 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, ELARABI Asem, 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 末木聖大, 中村公大, HAWECKER J., MANGENEY J., TIGNON J., DHILLON S. S., 掛谷一弘
2. 発表標題 テラヘルツ時間領域分光法を用いた高温超伝導体の面内異方性測定法の開発 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 巴山顕, 藤田秀眞, 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 齋藤嘉人, 齋藤嘉人, 足立伸太郎, 松本凌, 藤田秀眞, 巴山顕, 長尾雅則, 掛谷一弘, 竹屋浩幸, 高野義彦, 高野義彦
2. 発表標題 新機能開拓を目指したBi-2212ウィスカ十字接合の作製
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 掛谷一弘
2. 発表標題 高温超伝導体固有ジョセフソン接合の物理と応用：単結晶がそのまま集積デバイスに
3. 学会等名 令和2年度第1回ナノ材料部門委員会第1回研究会 令和2年度第3回半導体エレクトロニクス部門委員会第2回研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 巴山 顕, 小林 亮太, 藤田 秀眞, 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 中村 公大, 末木 聖大, Juliette Mangeney, Jerome Tignon, Sukhdeep Dhillon, 小森 祥央, J.W.A. Robinson, 掛谷 一弘
2. 発表標題 高温超伝導体・強磁性体二層膜におけるテラヘルツ時間領域分光法による複素伝導率解析
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 齋藤 嘉人, 足立 伸太郎, 松本 凌, 藤田 秀真, 巴山 顕, 長尾 雅則, 掛谷 一弘, 寺嶋 健成, 竹屋 浩幸, 高野 義彦
2. 発表標題 BSCCO0ウィスカ十字接合を用いたテラヘルツ発振
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 Itsuhiko Kakeya
2. 発表標題 Josephson plasma emitter of a Bi2212 high-temperature superconductor as a novel terahertz source
3. 学会等名 MRM2023/IUMRS-ICS2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Itsuhiko Kakeya
2. 発表標題 Terahertz electromagnetic wave radiations from intrinsic Josephson junction stack of Bi2212 cuprate
3. 学会等名 5th INTERNATIONAL WORKSHOP ON High Temperature Superconductors in High Frequency Fields (HTSFF2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Itsuhiko Kakeya
2. 発表標題 Frequency modulation in terahertz Josephson plasma emitter of an intrinsic Josephson junction stack
3. 学会等名 13th International Conference on the Intrinsic Josephson Effect and High-Temperature Superconductivity (IJJ13) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Itsuhiro Takeya
2. 発表標題 Terahertz electromagnetic-wave radiation from cuprate superconductors: Synchronous phenomena of intrinsic Josephson junctions
3. 学会等名 EM-NANO2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Itsuhiro Takeya
2. 発表標題 Mutual synchronization and helicity switching of terahertz radiation from intrinsic Josephson junction stack demonstrated by polarization analysis
3. 学会等名 12th International Conference on Intrinsic Effects and Horizons of Superconducting Spintronics, 2021/9/22, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 高温超伝導テラヘルツ光源	発明者 掛谷一弘、前田慶一郎	権利者 京都大学
産業財産権の種類、番号 特許、2020-082648	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>京都大学集積機能工学研究室 http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/</p>

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	浅井 栄大 (Asai Hidehiro) (00722290)	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・研究員 (82626)	
研究分担者	町田 昌彦 (Machida Masahiko) (60360434)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究主席 (82110)	

	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
研究協力者	辻本 学 (Tsujimoto Manabu) (20725890)	産業技術総合研究所・量子・AI融合技術ビジネス開発グローバル研究センター・主任研究員 (82626)	

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