

令和 2 年 6 月 28 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06367

研究課題名(和文) 固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子の大規模アレーの開発

研究課題名(英文) Development of large-scale arrays of Terahertz-wave oscillators using intrinsic Josephson junctions

研究代表者

立木 隆 (Tachiki, Takashi)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・電気情報学群
・教授

研究者番号：60531796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：銅酸化物超伝導体の固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子のアレーによる高出力化を目指し、同素子の放射特性を理論と実験により検討した。まず、接合系を連続体近似した3次元キャビティモデルを用いて計算した素子アレーの全放射電力は、各素子が121共振モードで動作したとき、素子数の2乗に比例して増加した。次に、発振素子用2軸低温回転ステージを有する測定系により、放射パターンを測定した。シリコン半球レンズを取り付けた単素子について測定されたパターンであるが、レンズによる集光を考慮したシミュレーション結果とよく一致した。これらの結果は、同発振素子のアレーの設計・製作および測定に役立てられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固有ジョセフソン接合は、バイアス電圧を制御するだけで容易に発振周波数を可変できる特長を有し、社会的ニーズが高いテラヘルツ技術で注目を集めている。従来、同素子の放射特性の数値シミュレーションは計算時間やマシンパワーを必要としていたが、連続体近似を用いたモデリングによりそれらを低減し、さらにアレーの特性が得られるようにモデルを拡張した。この成果は素子特性のシミュレーションの発展に寄与できる。また、本研究で構築した放射パターン測定系は、同素子の単体およびアレーの特性評価のみならず、他の冷却型発振素子の精密な放射パターンを取得できる汎用性があり、テラヘルツ技術分野において意義がある。

研究成果の概要(英文)：To realize high power generation by arrays of the terahertz-wave oscillators using intrinsic Josephson junctions (IJJs) in cuprate superconductors, the radiation properties of the devices have been theoretically and experimentally investigated. The total radiation power of the arrays calculated by a continuum approximation method applying to a 3D-cavity model for a stack of IJJs was proportional to the square of the number of oscillator elements, when the elements were operated in the 121 cavity mode. A radiation pattern of the single oscillator coupled with a Si hemispherical lens was obtained by a measurement system with a cryogenic biaxial rotation stage for the oscillator. The measured pattern was in good agreement with one obtained by the numerical simulation on the assumption of the effect of the lens. These results are useful for designing and testing the arrays of the oscillators.

研究分野：工学

キーワード：テラヘルツ波 発振素子 銅酸化物超伝導体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非破壊検査や創薬、次世代情報通信等、様々な分野で期待されるテラヘルツ技術において高出力でコンパクトな固体発振素子の開発は急務である。このような固体発振素子として量子カスケードレーザーや共鳴トンネルダイオード等が挙げられる。一方、銅酸化物超伝導体に内在する固有ジョセフソン接合を用いた発振素子は、直流のバイアス電圧を印加するだけで発振周波数 $0.3 \sim 2.4$ THz の広い周波数領域において比較的狭線幅の連続波を放射できる。しかしながら、固有ジョセフソン接合を形成するビスマス系超伝導体 (通称 Bi-2212) 単結晶のメサ構造で構成される単素子の全放射電力 (出力) は、最高でも数十 μW と低い。これに対して、同発振素子のアレー化により素子数の2乗に出力が比例し、3素子のアレーで数百 μW 以上の放射電力が得られたものの、それ以上の素子数では出力が飽和傾向を示すといった現状である。同発振素子のアレーによる更なる高出力化を実現するためには、個々の素子の動作モードや放射指向性等を理論的、実験的に検討し、その知見に基づいてアレーを設計・製作して特性評価を行う必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子のアレー化による出力向上のための知見を得ることである。そのための検討事項を以下に示す。

- (1) 放射パターン測定系の構築と単素子の特性評価
- (2) 多素子アレーの理論的検討と設計・試作
- (3) 多素子アレーの放射電力・放射指向性評価

以上の検討することにより、高出力と高い指向性を有する発振素子アレーの開発を目指す。

3. 研究の方法

固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子の発振原理は、交流ジョセフソン効果による直流電圧に比例した周波数 (484 GHz/mV) の交流電流の発生、メサを共振器とした増幅およびメサ側面からのテラヘルツ波放射である。

まず、目的に挙げた検討事項(2)の多素子アレーの理論的検討の結果が先行したため、そのモデルについて説明する。すなわちメサに含まれる多数 (500 以上) の固有ジョセフソン接合を連続体近似したサイン・ゴードン方程式に放射的境界条件を課した3次元キャビティモデルである。このモデルに基づいた解析式により素子アレーの放射特性 (放射電力、放射パターン) を数値シミュレーションした。その際、図1の素子アレーの概略図に示す素子間隔 D は一定とし、共振モードによる特性の違いを検討した。

次に、検討事項(1)として図2(a)に示す放射パターン測定系を構築した。これは、同発振素子を取り付けた回転ステージおよび放射電力を測定する低温シリコンボロメータから構成される。低温回転ステージ (attocube 製 ANR240, ANRv51) は同図(b)に示すように2軸回転できるため、3次元の放射パターンの測定が可能である。なお、同測定系における平均の角度ステップは $0.14 \sim 0.29^\circ$ 、検出可能な電力密度は 0.035 nW/m^2 である。

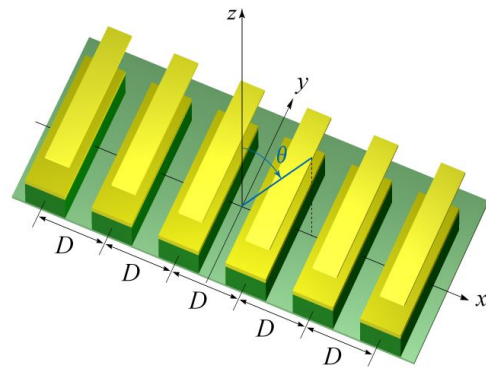
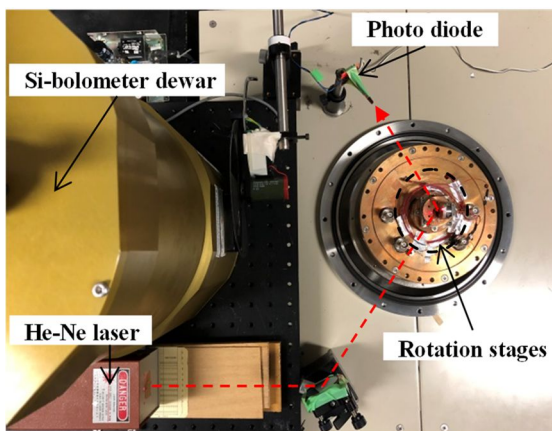
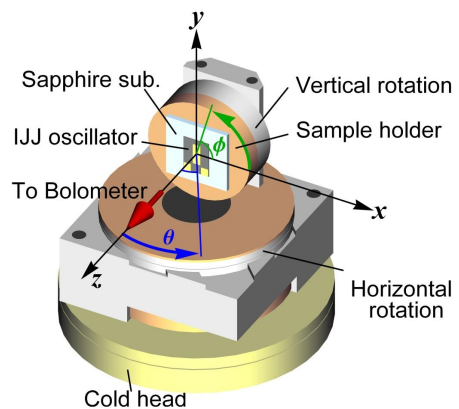


図1 固有ジョセフソン接合を用いた発振素子のアレーの概略図



(a) 測定系の写真



(b) 低温回転ステージの概略図

図2 放射パターン測定系

4. 研究成果

検討事項(2)の放射特性のシミュレーション結果を図3に示す。まず、図1に示す θ 回転時の放射パターンは、我々がアレーに最適と予想した121共振モードによる動作(同図(a))では、素子数 M の増加に伴って基板に垂直な方向で指向性が高くなっている。これに対して基本モードに近い111モード動作では、単素子($M=1$)で $\pm 45^\circ$ 方向に高い放射が、 M の増加に伴って基板に平行な方向に近づくようになった。これらの放射パターンを反映して素子アレーの全放射電力は、121モード動作では、 M の2乗で増加するのに対して、111モード動作では、飽和傾向を示した。これより先行研究の出力飽和の原因が111モード動作である可能性が示唆され、121モード動作が実現されれば出力の大幅な改善が期待される。

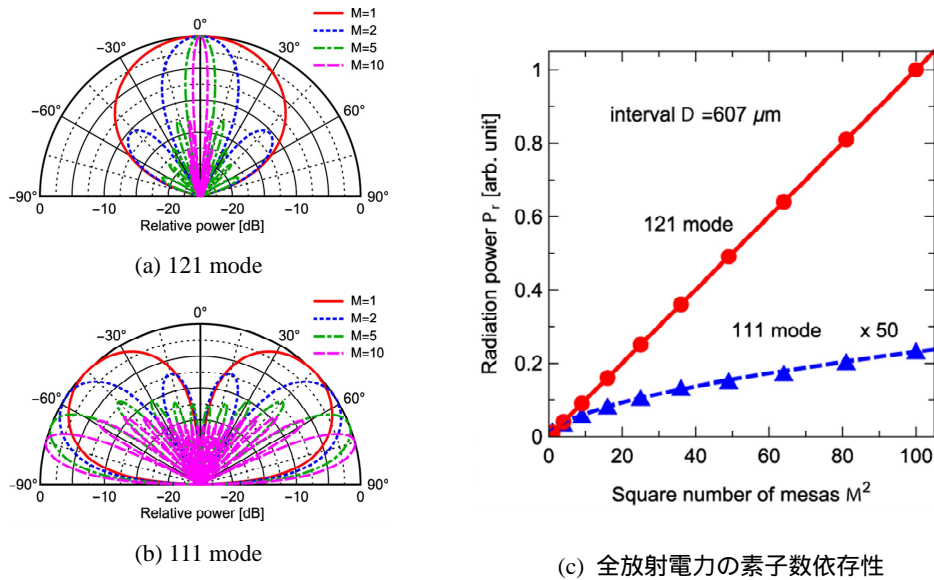


図3 共振モードごとの単素子の放射パターンと素子アレーの放射電力の素子数依存性 (数値シミュレーション)

次に検討事項(1)として本研究で構築した放射パターン測定系により単素子の特性評価を行った。製作したBi-2212メサの寸法は $80\ \mu\text{m} \times 140\ \mu\text{m} \times 1.1\ \mu\text{m}$ であり、その値から共振周波数は111モードで455 GHz, 121モードで600 GHzである。様々なバイアス条件での発振周波数の測定により、製作した素子は111モード動作のみ発振することがわかった。そのため、放射出力が弱く、同測定系で放射パターンを測定できなかったため、同素子の直上に直径5 mmのシリコン半球レンズを配置した。このときの測定結果を図4(a)に示す。測定温度は最も高い放射電力が得られた41 Kである。これより、 $\pm 45^\circ$ 方向に分かれた特性(同図(b)の青線)を示すと予想されていた111モード動作ではあったが、レンズによる集光効果により、基板面に対して垂直方向に半値幅 15° のパターンを示した。このことは、実験と同材料、同形状のレンズの集光効果を考慮した数値シミュレーションの結果(同図(b)の赤線)と酷似している。

本研究では、121モード動作が可能な素子を製作できなかったため、検討事項(3)までに至らなかった。121モードで動作させるためには、素子への直流バイアスのマージンを広げる必要がある。研究期間中、 N_2 アニールによるBi-2212単結晶のキャリアドープ量を制御することで

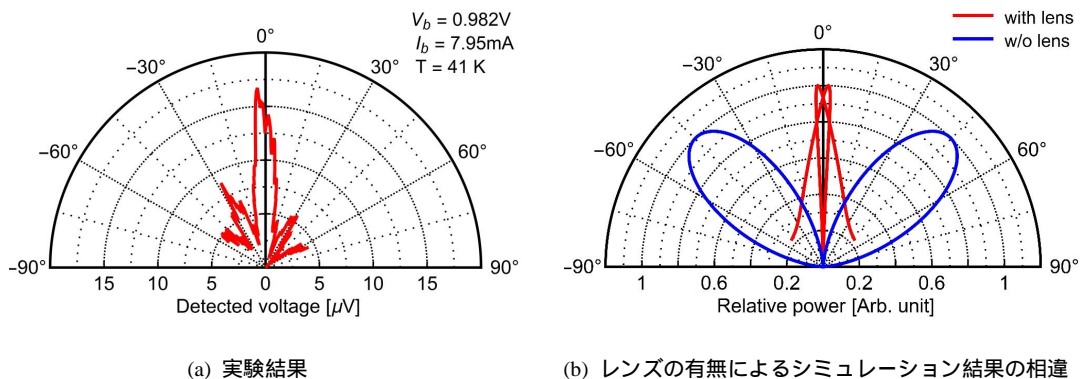


図4 直上にSi半球レンズを置いた発振素子の121モード動作時の放射パターン

バイアスマージンが広げられる手がかりを得たため、この改善により製作した素子の 121 モード動作が期待される。

今後の研究計画として、本研究で得られた理論的知見に基づいて同発振素子のアレーを製作する。とりわけ数値シミュレーションにより、121 モード動作であれば素子数の 2 乗に比例する出力は、素子間距離が変わってもあまり影響を受けないことが示されたため、アレーの設計に自由度があることは特質すべきである。

また、本研究で構築した低温発振素子用放射パターン測定系の改善も計画している。現状では検出器を発振素子用冷凍機の外部に設置しているため、測定系の問題点として大気中の水分による減衰および素子回転に伴う背景雑音の変化の影響が挙げられる。我々は、室温においても高い抵抗温度係数を有する酸化バナジウムポロメータの開発を行っており、それを発振素子と同じ真空チャンバーに導入すれば、これらの問題点を解決できると考えている。

以上により Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いた発振素子のアレーを設計・製作し、アレー化による放射パターンの先鋭化と出力向上を確認したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hai Van Nhu, Kawahara Masami, Samura Tsuyoshi, Tachiki Takashi, Uchida Takashi	4. 巻 58
2. 論文標題 Fabrication of V1-x Ti x O2 thin films by metal-organic decomposition using carbon thermal reduction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 075506 ~ 075506
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab28ac	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 Maeda Kohei, Hai Van Nhu, Nishioka Kunio, Matsutani Akihiro, Tachiki Takashi, Uchida Takashi	4. 巻 138
2. 論文標題 Evaluation of Characteristics in VOx Microbolometer Fabricated by MOD on Si3N4/SiO2 Membrane	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 471 ~ 477
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejfms.138.471	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 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 2件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 T. Uchida, T. Tachiki
2. 発表標題 Fabrication of VO2 Thin Films by MOD and Their Applications to Bolometer Detectors
3. 学会等名 2019 Collaborative Conference on Material Research（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tachiki, T. Uchida
2. 発表標題 Investigation of radiation properties of THz-wave oscillators using Bi-2212 intrinsic Josephson junctions for oscillator-array design
3. 学会等名 The 10th East Asia Symposium on Superconductor Electronics（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江口 哲平、立木 隆、内田 貴司
2. 発表標題 Bi-2212固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子の放射パターン測定系の構築
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 T. Tachiki, T. Uchida
2. 発表標題 Investigation of Radiation Properties of Terahertz-Wave Oscillators using Intrinsic Josephson Junctions for High Power Generation
3. 学会等名 The 14th International Symposium on High Temperature Superconductors in High Frequency Field (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tachiki, T. Uchida
2. 発表標題 Cavity Mode Evaluation of Terahertz-Wave Oscillators using Bi-2212 Intrinsic Josephson Junctions for High Power Generation
3. 学会等名 The 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立木 隆, 内田 貴司
2. 発表標題 固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ波発振素子のアレー化に向けた検討
3. 学会等名 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2018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	内田 貴司 (Uchida Takashi) (50531802)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、 電気情報学群及びシステム工学群)・電気情報学群・教授 (82723)	