

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420291

研究課題名(和文) 安定バイアスされた固有ジョセフソン接合を用いた高出力テラヘルツ波発振素子の開発

研究課題名(英文) Development of high-power Terahertz-wave oscillators using stably-biased 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・電気情報学群・准教授)

研究者番号：60531796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：銅酸化物超伝導体に内在する固有ジョセフソン接合に対するバイアス安定化により、高出力なテラヘルツ波発振素子を実現することを目指し、以下の結果を得た。エネルギー保存則を考慮して計算された放射電力のバイアス依存性と時間依存性により、発振と非発振のバイアス境界を見出す際、素子近傍の見かけの放射電力が重要な役割を果たしていることを示唆した。また、素子のバイアス法を従来の単方向スイープから双方向スイープに変更することにより、放射電力が2倍に向上することを実験とシミュレーションにより示した。これらの結果は同素子のバイアス安定化とそれによる高出力化に有用である。

研究成果の概要(英文)：To realize high-power terahertz-wave oscillators using stably biased intrinsic Josephson junctions in cuprate superconductors, key technologies were developed as follows: Bias voltage dependence and time dependence of terahertz radiation power is obtained from numerical simulations in which conservation of energy in the junctions is confirmed. From these results, it is found that apparent radiation power of a near-field emitted from the oscillator plays an important role in finding a bias boundary between radiative and nonradiative states. Moreover, experimental and simulation results show that the terahertz radiation power obtained by a bidirectional sweep of a bias point is two times higher than that obtained by a conventional unidirectional sweep. These results are useful for stable bias of the oscillators and their high power generation.

研究分野：工学

キーワード：銅酸化物超伝導体 テラヘルツ波 発振素子

### 1. 研究開始当初の背景

近年、化学分析や非破壊検査等に適用可能なテラヘルツ技術が注目を集めている。この技術において1テラヘルツ前後の固体の発振素子は、多様な利用価値があるにもかかわらず、量子カスケードレーザーや共鳴トンネルダイオード(RTD)および本研究の対象である固有ジョセフソン接合等に限定されている。研究開始当初、銅酸化物超伝導体に内在する固有ジョセフソン接合の中で最も研究されているピスマス系(Bi-2212)単結晶のメサにおいてバイアス電圧に比例して発振周波数が可変できる利点を実証されていた。しかしながら、単体メサの発振出力は数十  $\mu\text{W}$  と低く、RTD のような室温発振可能な素子に対して、その優位性を示せない状況にあった。そのため、固有ジョセフソン接合を用いた発振素子では、高出力化が急務であり、土台結晶を除去した単独メサや超放射を念頭にメサアレー等が高出力化のために検討されていた。本研究では発振時の固有ジョセフソン接合に加えるバイアスを安定して供給することが高出力化の第一歩になると考え、そのための理論的、実験的検討を行うこととした。

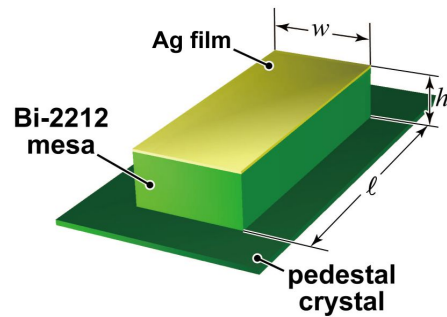
### 2. 研究の目的

固有ジョセフソン接合へ印加するバイアスの安定化により、高出力なテラヘルツ波発振素子を実現することを目指し、以下の要素技術を確立することを目的とした。

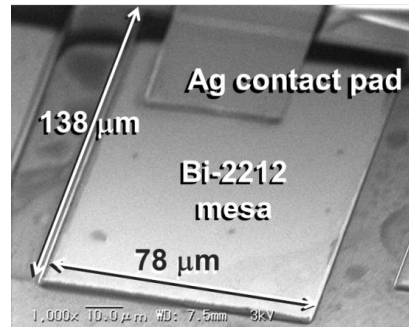
- (1) 発振持続条件の解明と素子構造の改善  
発振持続条件の検討  
素子設計・製作
- (2) 発振スペクトルの狭帯域化の検証  
バイアス安定化システム的设计・製作  
発振線幅の評価
- (3) 発振素子の高出力化の実証

### 3. 研究の方法

- (1) 発振持続条件の解明と素子構造の改善  
発振持続条件の検討  
固有ジョセフソン接合の電磁現象を記述する結合サイン・ゴードン方程式を用いた解析的手法と数値計算的手法により種々のバイアス条件における発振特性を定性的・定量的に評価する。この評価を基に発振持続性に関する知見を得る。  
素子設計・製作  
設計指針として発振を持続させるためには固有ジョセフソン接合に高い容量性負荷を持たせる必要があると考えた。それには接合に外部キャパシタを装荷する場合と Bi-2212 の酸素組成(キャリアドーパ量)を制御することで内部の接合容量を増加させる場合に大別できる。本研究では後者を選択した。具体的には素子製作前に Bi-2212 単結晶を窒素雰囲気中 600 で 10 時間、熱処理することによりアンダードーパ化を行う。その後、図 1 に示すような素子を微細加工技術により製作する。



(a) 素子の概略図



(b) 製作した素子

図1 固有ジョセフソン接合を用いた発振素子

### (2) 発振スペクトルの狭帯域化の検証

バイアス安定化システム的设计・製作  
素子に直流電源からバイアスを供給し、発振状態とした後、バイアス電圧の変動を読み取ってフィードバック制御によりバイアスを安定化させる。直流電源と電圧読み取りの制御はソフトウェアにより行う。

#### 発振線幅の評価

素子に対するバイアスの安定化により発振線幅の減少とピーク強度の増加が予想されるため、実験で発振素子の線幅を評価する。現有のテラヘルツ波分光強度計では、分解能(約 6 GHz)が低く、その評価は難しいため、分解能が高い超伝導ミキサーを製作し、それにより線幅評価を行う。

### (3) 発振素子の高出力化の実証

(1)と(2)の検討を経て発振素子の高出力化が行われているか否かを実験とシミュレーションにより検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) 発振持続条件の解明と素子構造の改善

##### 発振持続条件の検討

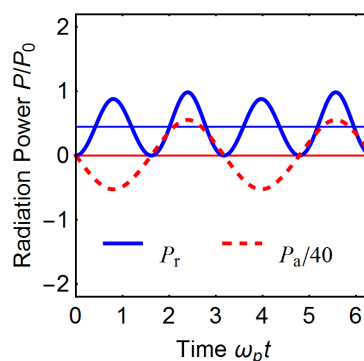
条件を探るにあたり放射電力のバイアス電圧依存性を評価した。図 2 に実験と理論解析で得られた結果を示す。これまでの解析は、発振時のメサ内の共振モードが基本モードである 111 モードで放射電力が最高となり、121, 112 モードの順でピーク強度が減少したため、同図(a)の実験結果と食い違いがあった。本研究では、放射指向性まで含めた解析により、両図に示すように各モードのピーク値の大小関係が実験と理論で一致した。この

解析手法は放射電力のバイアス依存性を従来法よりも正しく再現するため、安定発振のためのバイアス条件を検討する上で有用であると考えられる。

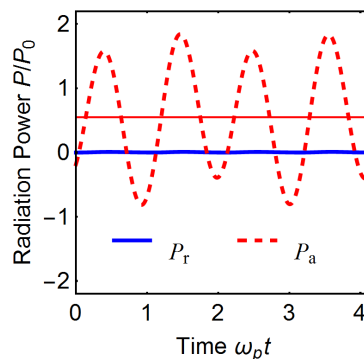
さらに発振の持続性を議論する上で重要となる発振時と非発振時の電力の収支（エネルギー保存性）を計算した。図3に(a)発振時と(b)それからバイアス電流を約1.6%ずらして発振を停止した直後の放射電力の時間波形の数値シミュレーション結果を示す。青の実線でテラヘルツ波の放射電力、赤の破線で素子の近傍領域の電力（ここでは見かけの放射電力と呼ぶ）の波形、また同じ色の水平線はそれぞれの直流分を表している。この結果により(a)から(b)の状態への移行時、テラヘルツ波放射電力の直流分が、見かけの放射電力の直流分に変換されていることが分かる。よって、テラヘルツ波放射の有無を分けるバイアスの境界を決める際、見かけの放射電力が重要であることを示唆した。

#### 素子設計・製作

Bi-2212 単結晶をアンダードープに制御し、接合中の並列コンダクタンス成分を減少させることにより実効的に並列容量成分を増加させ、その試料から発振素子を製作した。同素子は、予想に反して発振が時間的に不安定で、放射のバイアス範囲が狭いことが放射

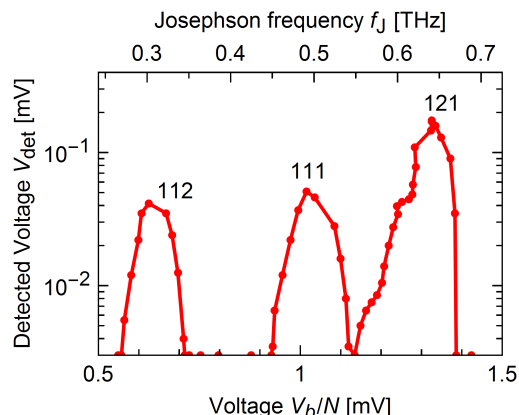


(a) 発振時

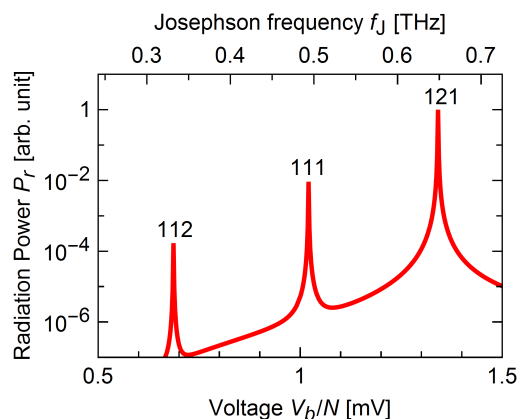


(b) 発振停止時

図3 発振時と発振停止時の放射電力の時間波形（シミュレーション結果） $P_r$ はテラヘルツ波放射電力、 $P_a$ は見かけの放射電力である。



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図2 放射電力のバイアス電圧依存性

電力測定により分かった。この原因を究明するため、キャリアドープ量の異なる素子に対する数値シミュレーションを行った。この結果より、ドープ量を減少させるにつれて発振部の共振系のQ値が上昇し、その高いQ値を維持した発振を交流ジョセフソン効果で起こすことができるか否かでバイアス範囲が制限されることが分かった。これとは反対にドープ量を2倍程度増加させるとバイアス範囲が20%程度増加することを示した。

#### (2) 発振スペクトルの狭帯域化の検証

##### バイアス安定化システム的设计・製作

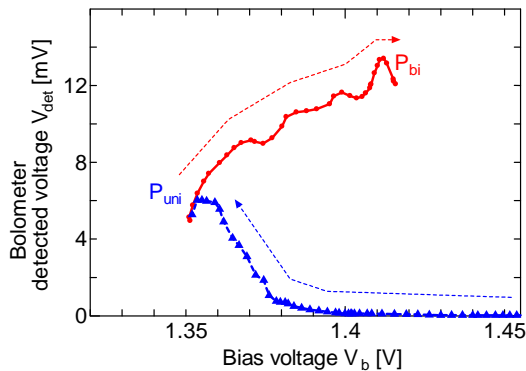
バイアスの安定化を図るには前提としてバイアス用電源が安定していなければならない。これまではファンクションジェネレータ（FG）を用いて掃引し、発振時の動作点で定バイアス駆動していた。本研究ではFGを高安定化電源に変更してコンピュータ制御することにより、発振線幅を評価する上で十分な時間（約600秒）においてバイアス電圧の変動幅を従来の100分の1以下となる約11 mVに低減することができた。

##### 発振線幅の評価

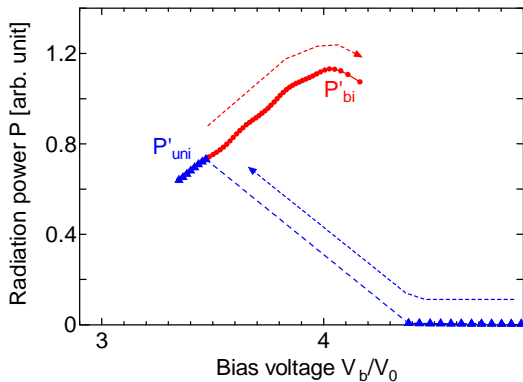
高精度な線幅測定を行うためにNb/AlO<sub>x</sub>/Nbトンネル接合を製作した。このトンネル接合を用いたミキサーの評価までには至らなかったが、ミキサーに利用可能なリーク電流が少ない良好な電流-電圧特性が得られた。

### (3) 発振素子の高出力化の実証

研究期間中の理論的検討の結果から、現状では発振が完全停止する“ゼロ抵抗状態への戻り”を抑制する条件を見出すことは難しいことが分かってきた。その代りに発振状態のバイアス範囲においてバイアスの走査を工夫することにより放射電力を増加できることを見出した。従来はバイアス電流を単調に減少させながら発振状態を探る単方向スイープを行っていたが、メサの共振点付近のバイアス条件で走査を増加に転じた双方向スイープを行うことにより高出力化が行われる。図4(a)は、放射電力のバイアス電圧依存性の実験結果である。青の矢印で表された単方向スイープの特性に比べて、赤の矢印で表された双方向スイープにより最高放射電力が約2倍になることが示された。同様の結果が、同図(b)に示す数値シミュレーションによっても示された。



(a) 実験結果



(b) シミュレーション結果

図4 双方向スイープ時の放射電力のバイアス依存性

以上のように本研究で得られた固有ジョセフソン接合に対するバイアスの安定化に関するシミュレーションや実験結果は、これらの接合を用いたテラヘルツ波発振素子の放射電力の向上を実現する上で有益であるといえる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

内田 貴司、笠井 博幸、立木 隆、MOD法プリカーサ薄膜の減圧焼成で得た  $VO_x$  薄膜の特性評価、電気学会論文誌 A、査読有、Vol.135、2015、pp.481-487、DOI:10.1541/ieejfms.135.481

〔学会発表〕(計19件)

立木 隆、内田 貴司、低バイアス領域における固有ジョセフソン接合のテラヘルツ発振状態の数値的検討、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2017年04月21日、機械振興会館(東京都港区)

立木 隆、内田 貴司、テラヘルツ波発振状態の固有ジョセフソン接合のバイアス範囲の検討、第64回応用物理学学会春季学術講演会、2017年03月16日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

前田 幸平、西岡 國生、ヴァン・ニュー・ハイ、松谷 晃宏、立木 隆、内田 貴司、Deep-RIEと $XeF_2$ 気相エッチングによる $VO_x/Si_3N_4/SiO_2$ メンブレンの製作、第64回応用物理学学会春季学術講演会、2017年03月14日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

T. Tachiki, T. Uchida, Numerical investigation of bias voltage dependence of radiation power in THz-wave oscillators using intrinsic Josephson junctions, 10th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High- $T_c$  Superconductors, 2016年10月12日, Nanjing (China)

T. Uchida, W. Kimura, S. Takeno, T. Tachiki, T. Uchida, K. Nakajima, Effect of electrode structure on THz emission from Bi2212 intrinsic Josephson junctions, 10th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High- $T_c$  Superconductors, 2016年10月12日, Nanjing (China)

T. Uchida, A. Matsushita, T. Tachiki, Detection Properties of  $VO_x$  Microbolometer on  $Si_3N_4/SiO_2$  Membrane Fabricated by MOD at 200 GHz, The 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2016年09月28日, Copenhagen (Denmark)

内田 貴司、松下 亮人、立木 隆、

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> メンブレン上へ製作したアンテナ結合マイクロボロメータ検出素子の特性評価、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、2015 年 09 月 16 日、名古屋国際会議場（愛知県・名古屋市）

立木 隆、内田 貴司、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バイアス電圧依存性、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、2015 年 09 月 13 日、名古屋国際会議場（愛知県・名古屋市）

H. Kasai, T. Uchida, T. Tachiki Fabrication and Evaluation of VO<sub>x</sub> Thin Films by Metal-Organic-Decomposition for Solid-State devices, The 2nd International Symposium on Frontiers in THz Technology, 2015 年 09 月 01 日、アクトシティ（静岡県・浜松市）

T. Uchida, A. Matsushita, T. Tachiki, Detection Properties of Spiral-Antenna-Coupled Microbolometer Fabricated on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> Membrane at 200 GHz Band, The 40th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2015 年 08 月 24 日, Hong Kong (China)

T. Tachiki, H. Katada, T. Uchida, Investigation of Bias-Voltage Dependence of Radiation Power in Bi-2212 Intrinsic Josephson Junction THz-Wave Oscillators, The 15th International Superconductive Electronics Conference, 2015 年 07 月 06 日、名古屋大学（愛知県・名古屋市）

立木 隆、内田 貴司、固有ジョセフソン接合テラヘルツ波発振素子の放射特性の数値的検討、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2015 年 04 月 22 日、機械振興会館（東京都港区）

立木 隆、内田 貴司、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特性の解析(II)、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 03 月 12 日、東海大学（神奈川県・平塚市）

竹野 智史、渡辺 祥吾、木村 涉、山田 博信、立木 隆、内田 貴司、中島 健介、Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+</sub> 薄膜固有ジョセフソン接合テラヘルツ波発振デバイスの液体窒素温度動作、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 03 月 11 日、東海大学（神奈川県・平塚市）

内田 貴司、立木 隆、MOD 法により製作

した VO<sub>x</sub> マイクロボロメータ素子の検出特性、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 03 月 11 日、東海大学（神奈川県・平塚市）

T. Tachiki, H. Katada, T. Uchida, Evaluation of cavity modes and radiation power of THz-wave oscillators using intrinsic Josephson junctions, The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-T<sub>c</sub> Superconductors, 2014 年 12 月 01 日、京都大学（京都府・京都市）

T. Tachiki, H. Katada, T. Uchida, Evaluation of radiation properties in terahertz-wave oscillators using Bi-2212 intrinsic Josephson junctions, 2nd Yonezawa Conference: Superconducting Electronics, Materials and Physics, 2014 年 10 月 14 日、山形大学（山形県・米沢市）

立木 隆、内田 貴司、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特性の解析、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 09 月 18 日、北海道大学（北海道・札幌市）

内田 貴司、松下 亮仁、立木 隆、MOD 法により異なる基板上に作製した VO<sub>x</sub> 薄膜の特性比較(II)、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 09 月 17 日、北海道大学（北海道・札幌市）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

立木 隆 (TACHIKI, Takashi)  
防衛大学校・電気情報学群・准教授  
研究者番号：60531796

### (2) 研究分担者

内田 貴司 (UCHIDA, Takashi)  
防衛大学校・電気情報学群・教授  
研究者番号：50531802