

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360116

研究課題名(和文)固有ジョセフソン接合の非線形光応答によるテラヘルツ波放射機能性の発現

研究課題名(英文) Terahertz emission of Intrinsic Josephson junction according to a non linear optical response

研究代表者

中島 健介 (Nakajima, Kensuke)

山形大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70198084

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：周波数が0.1～10THzのテラヘルツ波は、高速大容量通信だけでなく化学物質の分析や低侵襲性透過イメージングなど新しい応用が期待されている未開拓の周波数資源であるが十分な出力を持つ固体発振素子の開発が遅れている。本研究では、電圧状態のBi-2212 固有ジョセフソン接合(IJJ)からテラヘルツ波が放射される現象を新しい固体テラヘルツ波発振素子に応用することを目的に放熱性に優れた薄膜型IJJデバイスを開発してデバイス温度77Kでテラヘルツ波発振を実現し、75Kで最大5 $\mu$ W以上の発振出力を得た。また、大強度極短パルスレーザー照射への非線形光応答によるテラヘルツ波発振の可能性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Since "Terahertz Wave" of which frequency between 0.1 to 10THz have been known as attractive electromagnetic wave spectra for innovative applications, there is a strong demand of solid state sources to generate intense terahertz waves. Terahertz emission phenomena from intrinsic Josephson junctions made of Bi-2212 high Tc superconductor arouse our interests from application viewpoint. This research has been devoted to understand the mechanism of terahertz emission based on a combination of the ac Josephson effect and plasma resonances in junction to increase terahertz output power. We also develop an industrially applicable device structure made of monolithic Bi-221 thin film having an advantage in heat dissipation. The monolithic IJJ exhibits excellent heat dissipation and the maximum emission is observed at 75K near below 77K. The maximum emission power is estimated to be more than 5 $\mu$ W. It is also examined to generate terahertz emission due to non-linear optical response.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：テラヘルツ波 ジョセフソン接合 交流ジョセフソン効果 高温超伝導体

### 1. 研究開始当初の背景

周波数が 0.1~10THz (波長 3mm~30 $\mu$ m) のテラヘルツ波は、ワイヤレス高速大容量通信応用はもちろんの、化学物質の分析や低侵襲透過イメージングなど新しい応用分野への活用も期待されている未開拓の周波数資源であるが十分な出力を持つ固体発振素子の開発が遅れていた。1992年に発見された 10 THz を超える高いエネルギーギャップ周波数を持つ高温超伝導体の固有ジョセフソン効果は、新しい固体テラヘルツ波発振素子への応用が期待され代表者も含めて世界的に様々なデバイスが提案され研究が進められてきた結果、2007年には米国アルゴンヌ国立研究所と筑波大学の研究グループがそれまでとは異なる構造のデバイスを用いてテラヘルツ波の連続発振を報告し注目されていた。その発振メカニズムは、テラヘルツ波のキャビティとして機能するような大きなサイズの Bi-2212 高温超伝導体固有ジョセフソン接合 (IJJ) を適切な電圧状態に保つと交流ジョセフソン効果によって接合内にテラヘルツプラズマ共鳴モードが励起されその結果テラヘルツ波が接合から放射されると説明されていた。しかし、共鳴モードと動作温度の関係や共鳴モードとテラヘルツ波出力の関係が明らかでなく、共鳴励起に必要な条件や放射強度を左右する放射損を含む接合の Q 値と接合形状の最適化など克服すべき課題が数多く残されていた。

### 2. 研究の目的

本研究は、Bi-2212 固有ジョセフソン接合を固体テラヘルツ波発振素子へ応用するために不可欠な薄膜型固有ジョセフソン接合デバイスを開発するとともに、幅広い温度範囲でテラヘルツ波放射現象を網羅的に検証し、プラズマ共鳴モードとテラヘルツ波放射周波数並びに照射強度との関係を解明すること、また、交流ジョセフソン効果に代わって、極短パルスレーザーによる超高速電流スイッチングによってテラヘルツジョセフソンプラズマ励起の可能性を調査することを目的に遂行された。

### 3. 研究の方法

テラヘルツジョセフソンプラズマの共鳴キャビティとして機能することが求められ

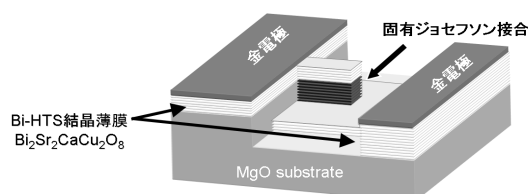


図 1 薄膜型固有ジョセフソン接合の基本構造

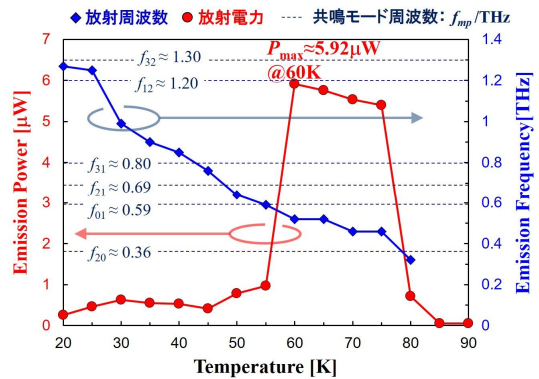


図 2 薄膜型固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波放射電力と周波数の温度依存性

る固有ジョセフソン接合には高品質で大型の高温超伝導体結晶が必要であるため、その材料は溶媒移動浮遊帯域法などで育成した高品質バルク単結晶に限られていたが、放熱性に低さや素子構造上避けられない電極との接触抵抗とそれによるジュール損や準粒子注入の影響が避けられなかった。そこで本研究では放熱性に優れ、標準的なリソグラフィ技術で製作可能な薄膜型固有ジョセフソン接合を開発しテラヘルツ波放射の実現を目指した。図 1 にデバイスの基本構造を示す。

開発した薄膜型固有ジョセフソン接合を用いて幅広い温度範囲においてテラヘルツ波放射を測定することで放射されるテラヘルツ波の周波数、強度と接合のジョセフソンプラズマ共鳴モードを網羅的に調査した。また、薄膜接合にフェムト秒レーザーを照射したときに発生するテラヘルツ波パルスを経時間領域分光することで固有ジョセフソン接合の非線形光応答を活用したテラヘルツ波放射に必要な知見を収集した。

### 4. 研究成果

図 1 の構造を持つ薄膜型 Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いて世界で初めて Bi-2212 薄膜でもテラヘルツ波放射が可能であることを実証した。微小な結晶をハンドリングする必要がなく標準的なリソグラフィ技術により製造できることから実用化に向けた大きな成果として高く評価されている。また、薄膜型固有ジョセフソン接合の良好な放熱性によって広い温度範囲でテラヘルツ波放射が可能となった。図 2 はテラヘルツ波放射に成功した接合共振幅 60 $\mu$ m、基本共鳴モード周波数約 0.6THz の薄膜型固有ジョセフソン接合を用いて 20K~85K の広い温度範囲にわたってテラヘルツ波放射周波数/強度、放射時の固有ジョセフソン接合の動作条件を包括的に調査した結果をまとめたグラフである。テラヘル

ツ波の観測された最高温度は液体窒素温度 (77K) を越える 80K に到達した。これらは Bi2212 薄膜の高品質性と薄膜型固有ジョセフソン接合の良好な放熱性に由来しており、本課題で実施している大強度パルス光照射による熱衝撃耐性を実証する結果と言える。この実験結果から

- (1) 温度の変化とともに放射周波数は 0.3 ~ 1.4THz の広い範囲で変化する。
- (2) テラヘルツ波の周波数は、接合の横プラズマ共鳴モードのいずれかに一致する。
- (3) 最大放射強度 6 $\mu$ W は比較的高温の範囲 60K ~ 75K で接合の幅を半波長とする横プラズマ共鳴モードに対応する周波数で起こる。

ということを明らかにした。また、電極とジョセフソン接合間の接触抵抗に左右されない 4 端子法によって接合電圧を精密に測定することで、接触抵抗を考慮しそれ減ずるといった数値処理をすることなく

- (4) 放射周波数と接合電圧の間には厳密に交流ジョセフソン関係が成り立つ。

ということを初めて実証した。これらは薄膜デバイスの開発と合わせ Bi-2212 テラヘルツ波放射デバイスの実用化に向けて極めて有用な成果である。さらに、大阪大学・レーザーエネルギー研究センターにおいて同じ構造の薄膜型 Bi-2212 IJJ に極短パルスレーザーを照射して電圧状態への遷移と損傷閾値試験を実施した。損傷閾値以下のレーザーパワーで超電流スイッチングによるテラヘルツ波放射は観測できなかったが、図 1 のデバイス構造をさらに改良し、より高いレーザー損傷閾値を持つと期待される埋込薄膜型固有ジョセフソン接合を開発し電圧バイアス法によるテラヘルツ波放射に成功した。

#### <参考文献>

L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, N. Gopalsami, Q. Li, M. Tachiki, K. Kadowaki, T. Yamamoto, H. Minami, H. Yamaguchi, T. Tachiki, K. E. Gray, W.-K. Kwok, U. Welp, *Science*, 318, 1291(2007)

#### 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

A. Saito, K. Nakajima, K. Hayashi, Y. Ogawa, Y. Okuyama, D. Oka, S. Ariyoshi, H. Yamada, T. Taino, C. Otani, J. Bae, S. Ohshima, "Relationship between loaded quality factor and responsivity for NbN-based MKIDs using dual-function spiral strip,

*IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, pp. 2401204 1-4, 6 Nov 2014. (doi: 10.1109/TASC.2014.2367459) (査読あり)

H. Yamada, T. Hayasaka, G. Toya, A. Saito, S. Ohshima, K. Nakajima, "YBCO grain boundary Josephson junction coupled with a slot dipole antenna for terahertz wave detectors," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 507, pp. 042048 1-4, 12 May 2014. (doi: 10.1088/1742-6596/507/4/042048) (査読あり)

K. Hayashi, A. Saito, Y. Ogawa, M. Murata, T. Sawada, K. Nakajima, H. Yamada, S. Ariyoshi, T. Taino, H. Tanoue, C. Otani, S. Ohshima, "Design and fabrication of microwave kinetic inductance detectors using NbN symmetric spiral resonator array," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 507, pp. 042015 1-4, 12 May 2014. (doi: 10.1088/1742-6596/507/4/042015) (査読あり)

S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, H. Tanoue, K. Koga, N. Furukawa, H. Yamada, S. Ohshima, C. Otani, J. Bae, "NbN-based microwave kinetic inductance detector with a rewound spiral resonator for broadband terahertz detection," *Applied Physics Express*, vol. 6, pp. 064103 1-3, May 2013. (doi: 10.7567/APEX.6.064103) (査読あり)

H. Yamada, T. Hayasaka, A. Saito, S. Ohshima, K. Nakajima, "Single-slot-dipole coupled YBCO Josephson junctions for terahertz wave detectors," *Physics Procedia*, vol. 45, pp. 217-220, May 2013. (doi: 10.1016/j.phpro.2013.05.006) (査読あり)

K. Hayashi, A. Saito, T. Sawada, Y. Ogawa, K. Nakajima, H. Yamada, S. Ariyoshi, S. Ohshima, "Microwave characteristics of microwave kinetic inductance detectors using rewound spiral resonators array," *Physics Procedia*, vol. 45, pp. 213-216, May 2013. (doi: 10.1016/j.phpro.2013.05.005) (査読あり)

[学会発表](計 18 件)

木村 涉, 竹野 智史, 山田 博信, 立木 隆, 内田 貴司, 中島 健介, 「固有ジョセフソン接合のテラヘルツ波放射に及ぼす電極構造の影響」, 2015 年 第 70 回応用物理

学会東北支部学術講演会, 3B08 (2015.12.3-4, ホテルアップルランド (青森県・平川市))

Ariyoshi S., Nakajima K., Saito A., Taino T., Yamada H., Ohshima S., Otani C., Bae J., Tanaka S., "Optical evaluation of microwave kinetic inductance detectors for Fourier transform terahertz spectroscopy," The 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2015), 3A-E-P-05.02 (2015.9.6-10, リヨン(フランス))

Saito A., Nakajima K., Ogawa Y, Oka D., Ariyoshi S., Yamada H., Taino T., Otani C., Ohshima S., "2D THz imaging system using spiral-MKID array," The 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2015), 3A-E-P-05.02 (2015.9.6-10, リヨン(フランス))

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+d</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」, 2015年 第62回応用物理学会春季学術講演会, 11p-A2-10 (2015.3.11-14, 東海大学(神奈川県・平塚市))

K. Nakajima, "Successful terahertz emission from monolithic Bi-2212 intrinsic Josephson junctions near 77K," The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (THz-Plasma 2014) (2014.11.30-12.3, 京都大学(京都府・京都市))

S. Takeno, W. Kimura, H. Yamada, K. Nakajima, "Terahertz wave emission from intrinsic Josephson junction made of thin Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+d</sub> films," Second Yonezawa Conference: Superconducting Electronics, Materials and Physics (YC-SEMP2014), P14(2014.10.14-17, 山形大学(山形県・米沢市))

K. Nakajima, "Terahertz emission from monolithic thin film Bi-2212 intrinsic Josephson junctions," Science & Applications of Thin Films Conference & Exhibition (SATF2014), IS10 (2014.9.15-19, イズミール(トルコ))

竹野 智史, 渡辺 祥吾, 木村 涉, 山田 博信, 中島 健介, 「Bi2212 薄膜固有ジョセフソン接合のテラヘルツ波放射強度の電圧依存性及び温度依存性の評価」, 第68回応用物理学会東北支部学術講演会,

6pB04(2013.12.5-6, 山形大学(山形県・米沢市))

K. Nakajima, S. Watanabe, S. Takeno, H. Yamada, "Possible HTS terahertz wave emitter operating at 77K using step-edge Bi-2212 intrinsic Josephson junction stacks," The 7th East Asia Symposium on Superconductive Electronics (EASSE 2013) (2013.10.23-26, 台北(台湾))

Nakajima K., Watanabe S., Yamada H., "Terahertz wave emission from step-edge type Bi-2212 thin film intrinsic Josephson junctions," 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), 3P-EL2-07(2013.9.15-19, ジェノバ(イタリア))

K. Nakajima, "Terahertz wave emission from Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> thin film intrinsic Josephson junction stack," Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CC3DMR2013) (2013.6.24-28, 済州(韓国))

渡辺 祥吾, 竹野 智史, 袁 潔, 李 軍, 王 華兵, 山田 博信, 中島 健介, 羽田野 毅, 「Bi-2212 薄膜固有ジョセフソン接合の作製とTHz波放射特性」, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 28a-PB1-6 (2013.3.27-30, 神奈川工科大学(神奈川県・厚木市))

山田 博信, 早坂 隆顕, 外谷 弦太, 中島 健介, 齊藤 敦, 大嶋 重利, 「単一 SDA 集積 HTS ジョセフソン接合テラヘルツ波検出器の電力特性および周波数特性」, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 27p-G7-7 (2013.3.27-30, 神奈川工科大学(神奈川県・厚木市))

K. Nakajima, "Terahertz emission from the step-edge intrinsic Josephson junctions fabricated of optimum-doped Bi-2212 thin films," Workshop on THz radiation from intrinsic Josephson junctions (2013.3.13, 京都大学(京都府・京都市))

S. Watanabe, J. Yuan, R. Koshiya, J. Li, H. B. Wang, H. Yamada, T. Hatano, K. Nakajima, "THz wave emission from thin Bi-2212 film intrinsic Josephson junctions," Applied Superconductivity Conference 2012, 3EPD-03 (2012.10.7-12, ポートランド(アメリカ))

S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, H. Tanoue, K. Koga, N. Furukawa, H. Yamada, S. Ohshima, C. Otani, J. Bae, "Design and fabrication of a microwave kinetic inductance

detector for an imaging Fourier transform terahertz spectrometer,” The 37th International Conference on Infrared, Milimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) , Tue-A-5-2 (2012.9.23-28, ウーロンゴン (オーストラリア))

渡辺 祥吾, 越谷 涼, 潔 袁, 李 軍, 王 華兵, 中島 健介, 山田 博信, 羽田野 毅, 「Bi-2212 段差型固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波放射の検証」, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 13a-A1-2 (2012.9.11-14, 愛媛大学・松山大学(愛媛県・松山市))

K. Nakajima, J. Yuan, R. Koshiya, J. Li, H. B. Wang, H. Yamada, A. Hatano, ”Terahertz wave emission from Bi-2212 thin films intrinsic Josephson junctions with mesa/step edge hybrid structure,” the 8th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High-T<sub>c</sub> Superconductors (PLASMA 2012) , invited 4(2012.6.10-13, イズミール(トルコ))

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://nakajima\\_lab.yz.yamagata-u.ac.jp/](http://nakajima_lab.yz.yamagata-u.ac.jp/)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中島 健介 (NAKAJIMA, Kensuke)  
山形大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：70198084

### (2)研究分担者

斗ノ内 政吉 (TONOUCHI, Masayoshi)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
研究者番号：40207593

山田 博信 (YAMADA, Hironobu)  
山形大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：50400411

齊藤 敦 (SAITO, Atsushi)  
山形大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：70313567

(3)連携研究者  
なし