

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22686012

研究課題名（和文） テラヘルツ帯・薄膜マッチング型超伝導検出器アレイの開発

研究課題名（英文） Development of a Terahertz detector Array based on superconducting tunnel junctions coupled to a thin superconductor film

研究代表者

有吉 誠一郎 (ARIYOSHI SEIICHIRO)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：20391849

研究成果の概要（和文）：

本研究では、超伝導薄膜で吸収したテラヘルツ波を超伝導トンネル接合素子（STJ）で検出するという「薄膜マッチング型 STJ 検出器」の研究開発を推進した。またその発展形として、伝送線路に見做した長方形形状の STJ 素子でテラヘルツ波を検出するという「伝送線路型 STJ 検出器」の研究開発も推進した。例えば、後者の検出器はニオブ超伝導体の平面アンテナと2個の長方形 STJ 素子を 1/4 波長インピーダンス変換線路で接続した膜構造をとる。テラヘルツ波は STJ 素子の長軸方向に伝搬しながら吸収され、最終的に準粒子トンネル電流として読み出す。作製にはニオブ系5層膜【Nb/Al/AlO_x/Al/Nb】を採用し、フーリエ変換分光器を用いて光学特性を評価した結果、Nb/Al系 STJ 素子のギャップ周波数（0.35 THz）を境にして不連続な検出感度上昇を確認し、超伝導体の近接効果を考慮したクーパー対解離（CPB）に起因する直接検出を実証した。また、ギャップ周波数以下（0.25 THz）に急峻な共振ピークを同時検出し、これが光子誘起トンネル現象（PAT）に基づく STJ 素子長軸方向での 3/4 波長共振であることを明らかにした。本研究で推進した STJ 検出器は CPB と PAT 両方の検出プロセスが利用可能であり、この高い周波数選択性は将来のテラヘルツイメージング応用における多様性に繋がると期待される。

研究成果の概要（英文）：

A terahertz detector using a superconducting tunnel junction (STJ) coupled to a large terahertz-absorbing superconductor film was investigated. We also proposed a design of a new terahertz detector with transmission-line STJs. The latter detector has two long junctions integrated on both wings of a log-periodic antenna. In this type, the long junction is a high-loss transmission-line working based on the Cooper-pair breaking process, in which the junction length and width determine the absorption efficiency and frequency bandwidth, respectively. A detector using Nb/Al/AlO_x/Al/Nb junctions was fabricated, and the principle of the detector was verified. We have detected terahertz radiation based on the Cooper-pair breaking (CPB), and confirmed that the sensitivity has a gradual increase from 0.35 THz, a value that corresponds to the effective gap frequency of the Nb/Al bilayer. We have also identified the third quarter-wavelength resonance and its harmonic signals working on the photon-assisted tunneling (PAT) process. The STJ detector has the new functionality that both detection processes are available. This functionality will allow the detector to be applied in future THz imaging with wide frequency selectivity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	12,700,000	3,810,000	16,510,000
2011年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	20,100,000	6,030,000	26,130,000

研究分野： 工学
 科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎、応用物理学一般
 キーワード： センサー、テラヘルツ波検出器

1. 研究開始当初の背景

電波と光波の境界領域に位置するテラヘルツ波は、物質に対する透過性と吸収スペクトルを利用した物質同定性を併せもつなど、他の波長帯には見られない特長を有し、産業分野における各種非破壊検査、医療応用や天文観測研究など、様々な分野での利用が期待されている。しかし、このバンドで大規模なイメージング計測を行うために必要な検出技術は未開拓であり、超高感度・広帯域・大規模アレイ性能を兼ね備えた先進的な検出デバイスが強く望まれている。

これまで我々は、超伝導トンネル接合素子 (STJ) を用いた 2 種のテラヘルツ波検出器の研究開発に取り組んできた。一つは、光子誘起トンネル現象 (PAT) という原理を利用した検出器 (PAT 型 STJ 検出器) で、地上天文観測に向けた検討を進めている。もう一つは、テラヘルツ波の吸収体である Li 系基板で発生したフォノンを利用した検出器 (基板吸収型 STJ 検出器) で、主に産業応用を目的として基本性能評価を進めている。これに対し、本研究で提案するテラヘルツ波 STJ 検出器は、これまでの PAT 型 STJ 検出器で培った低リークかつ微小素子作製技術と、基板吸収型 STJ 検出器で培った基板評価技術を融合することによって初めて現実味を帯びてきた。

2. 研究の目的

本研究課題では、究極の検出感度が要求される宇宙空間での天文観測応用を主ターゲットとして、新たに 2 種のテラヘルツ帯 STJ 検出器を提案し、研究開発を行った。一つは超伝導薄膜で吸収したテラヘルツ波を STJ 素子で検出するという「薄膜マッチング型 STJ 検出器」、もう一つは伝送線路に見做した長方形形状の STJ 素子でテラヘルツ波を検出するという「伝送線路型 STJ 検出器」である。

以下に、2 種に分けてその概要と研究成果を述べる。

3. 研究の方法

【3-1 薄膜マッチング型 STJ 検出器の構成】

検出器 1 画素は、テラヘルツ波長程度の吸収薄膜と微小な STJ 素子 1 個からなる (図 1)。(ここで、ダーク電流に起因するショット雑音を抑えるために STJ 素子サイズは微小にする)。基板の裏面から照射したテラヘルツ波は、おもて面に成膜した Nb または Ta 吸収薄膜でインピーダンス・マッチングを取る。テラヘルツ波の吸収効率を高めるために、自由

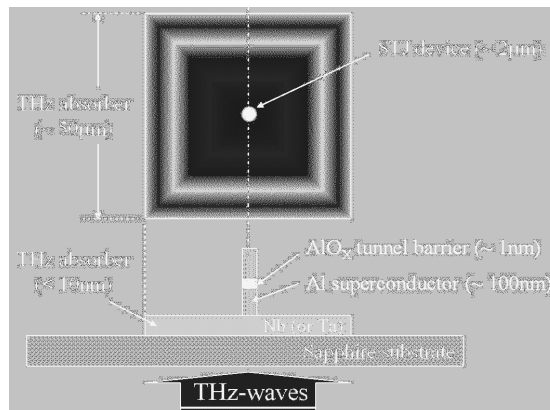


図 1. 薄膜マッチング型 STJ 検出器の概念図

空間の電波インピーダンス ($\sim 377\Omega$) と同程度になるまで薄膜を薄くする (薄膜の表面抵抗を大きくする)。そうして発生した励起電子を微小 STJ 素子で効率的に捕獲するために、従来の多結晶膜に比べて準粒子寿命が長い単結晶 Nb (or Ta) 膜を成膜する。

【3-2 伝送線路型 STJ 検出器の構成】

検出器 1 画素は、ニオブ超伝導体の平面アンテナと 2 個の長方形 STJ 素子を 1/4 波長インピーダンス変換線路で接続した膜構造をとる (図 2)。この検出器はクーパー対解離を主動作原理としており、ギャップ周波数以上のテラヘルツ波は STJ 素子の長軸方向に伝

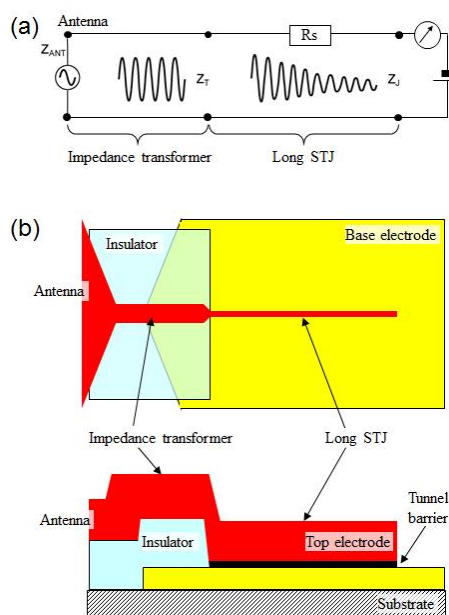


図 2. 伝送線路型 STJ 検出器の概念図

搬しながら吸収され、最終的に準粒子トンネル電流として読み出す。

上記2種の方式によるテラヘルツ波検出器の感度はいずれも、例えば、サファイア基板上に素子作製した場合、NEPにして 10^{-18} W/√Hz 以下という優れた検出感度が期待できる。さらに、超伝導ギャップエネルギー以上の光子に対して感度をもつため、その有感周波数帯はNb系デバイスで0.7THz～数10THz、Ta系デバイスで0.3THz～数10THz、という広帯域特性が予想される。

4. 研究成果

【4-1 薄膜マッチング型 STJ 検出器の作製と評価】

まず、異なる STJ 素子サイズをもつ検出器を1枚のフォトマスク上に並べて設計・配置し、多結晶 Nb 吸収膜と STJ 素子からなるプロトタイプ検出器を作製した。STJ 素子の構造は現在作製プロセスが最も確立しているニオブ系5層膜【Nb/Al/AlOx/Al/Nb】とし、成膜の容易性を重視して各膜厚はサファイア基板上から【200/60/1.5/60/150 nm】とした。次に電気特性を評価した結果、素子のノーマル抵抗は $0.9\ \Omega$ 、臨界電流密度は $50\ \text{A}/\text{cm}^2$ という比較的良好な SIS 特性が得られた(図3)。そして、光学特性を評価するために、シリコン超半球レンズの裏面に接着した検出器チップを ^3He クライオスタット内部に設置して温度0.3Kに冷却した。

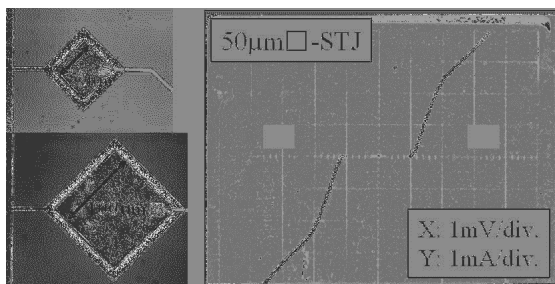


図3. 【左図】薄膜マッチング型 STJ 検出器の顕微鏡写真(接合サイズは $50\ \mu\text{m}$ と $100\ \mu\text{m}$ 角)。

【右図】温度 1.5K での典型的な電流電圧特性 ($50\ \mu\text{m}$ 角)。

図4にフーリエ変換分光器を用いて取得した周波数スペクトルを示す。図1のデザインに比べて大きい接合サイズ ($50\ \mu\text{m}$ と $100\ \mu\text{m}$ 角) の測定であるが、薄膜マッチング方式によるテラヘルツ光応答を初めて実証した。また、超伝導ニオブのギャップ周波数に対応して $0.7\ \text{THz}$ を境に急峻な感度上昇を実験的に示し、従来の PAT 型 STJ 検出器に比べても約1桁広い帯域特性を達成した。

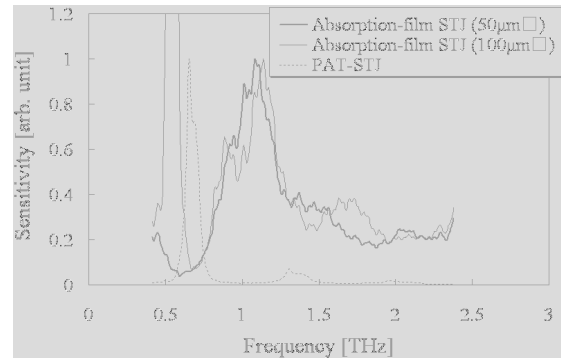


図4. 【実線2本】薄膜マッチング型 STJ 検出器の周波数スペクトル。【点線】従来の PAT 型 STJ 検出器の周波数スペクトル。これら3本線は異なった感度をもつため、主感度ピークで規格化している。また、 $2.4\ \text{THz}$ 以上での感度はクライオスタットの赤外線カットフィルターにより減衰されている。

【4-2 伝送線路型 STJ 検出器の作製と評価】

本検出器は異なる STJ 素子サイズ(長さや幅)をもつ $24 (=4 \times 6)$ 画素アレイを一枚のフォトマスク上に並べて設計・配置して作製した(図5)。作製にはニオブ系5層膜【Nb/Al/AlOx/Al/Nb】を採用し、成膜の容易性を重視して各膜厚はサファイア基板上から

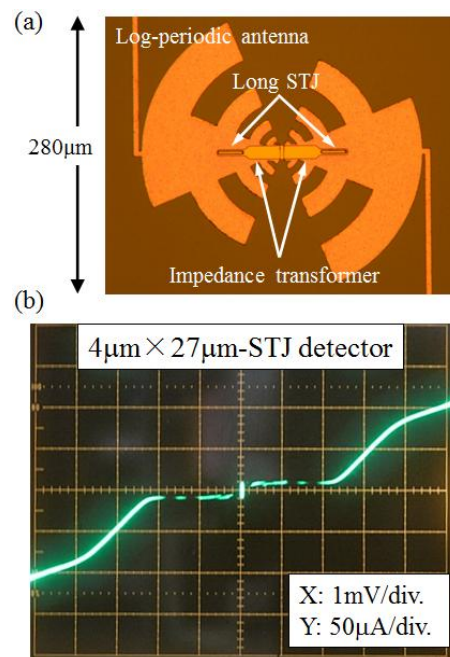


図5. 【上図】伝送線路型 STJ 検出器の顕微鏡写真。対数周期型平面アンテナ(直径 $280\ \mu\text{m}$)と2個の長方形 STJ 素子がインピーダンス変換線路で接続されている。【下図】温度 $4.2\ \text{K}$ での典型的な電流電圧特性

【150/50/1.5/50/150 nm】とした。24 画素アレイの電気特性を評価した結果、作製歩留りは約 70%、臨界電流密度 40 A/cm^2 、リーク電流密度は数 $100 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$ (4.2K で規格化した 0.3K 残留電流が 4 桁落ち) という比較的良好な SIS 特性が得られた。

次に、フーリエ変換分光器を用いて光学特性を評価した (図 6)。その結果、テラヘルツ波の初応答とともに、Nb/Al 系 STJ 素子のギャップ周波数 (0.35 THz) を境にして不連続な検出感度上昇を確認し、超伝導体の近接効果を考慮したクーバー対解離 (CPB) に起因する直接検出を実証した。また、ギャップ周波数以下 (0.25 THz) に急峻な共振ピークを同時検出し、これが光子誘起トンネル現象 (PAT) に基づく STJ 素子長軸方向での 3/4 波長共振であることを明らかにした。

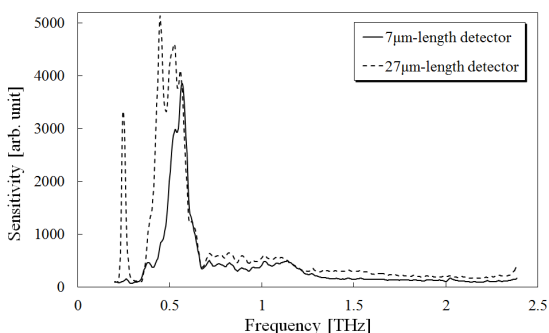


図 6. 異なる伝送線路長をもつ $4\mu\text{m}$ 幅 STJ 検出器 ($7\mu\text{m}$ 長、 $27\mu\text{m}$ 長) の周波数スペクトル。

本研究で開発した STJ 検出器は CPB と PAT 両方の検出プロセスが利用可能であり、この高い周波数選択性は将来のテラヘルツイメージング応用における多様性に繋がると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- 1) S. Ariyoshi, T. Taino, A. Dobroiu, H. Sato, H. Matsuo, C. Otani, “Evaluation of a Terahertz Detector based on a Superconducting Tunnel Junction Coupled to a Thin Superconductor Film”, Proc. 35th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), Mo-P.18, (2010).
- 2) 有吉 誠一郎, “テラヘルツ帯・超伝導検出器の開発とイメージング応用”, 2010 年度 低温工学・超電導学会 冷凍部会年間講演集, pp.96-99 (2010).
- 3) S. Ariyoshi, T. Hamao, T. Tohru, K. Koga, K. Takahashi, T. Noguchi, M. Kurakado, N. Furukawa, C. Otani, “Two Topics on

Superconducting Tunnel Junctions: Terahertz Detector and Single-crystal Fabrication”, Proc. 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE2011), 29-DI2-3, (2011).

- 4) S. Ariyoshi, K. Takahashi, T. Noguchi, M. Kurakado, K. Koga, N. Furukawa, and C. Otani, “Terahertz Detector with Transmission-line Type Superconducting Tunnel Junctions”, Superconductor Science and Technology, Vol.25, pp.075011_1-5 (2012).
- 5) K. Takahashi, S. Ariyoshi, T. Noguchi, M. Kurakado, K. Koga, N. Furukawa, C. Otani, “Research of Micro-stripline STJ Detector for Terahertz Band”, Extended Abstract of HTSHFF2012, pp.44-45 (2012).
- 6) K. Takahashi, S. Ariyoshi, T. Noguchi, M. Kurakado, K. Koga, N. Furukawa, C. Otani, “Development of micro-stripline superconducting tunnel junction detectors for terahertz waves”, Proc. 23rd International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT2012), P-46_1-3, (2012).

[学会発表] (計 16 件)

- 1) S. Ariyoshi, T. Taino, A. Dobroiu, H. Sato, H. Matsuo, C. Otani, “Evaluation of a Terahertz Detector based on a Superconducting Tunnel Junction Coupled to a Thin Superconductor Film”, 35th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), Rome, Italy, (Sep. 5-10, 2010).
- 2) 有吉 誠一郎, 高橋研太, 田井野 徹, 大谷 知行, “テラヘルツ帯・薄膜マッチング型超伝導検出器の性能評価”, H22 エクストリームフォトニクスシンポジウム、埼玉、10月12-13日(2010).
- 3) 【招待講演】有吉 誠一郎, “テラヘルツ帯・超伝導検出器の開発とイメージング応用”, 低温工学協会 第7回冷凍部会例会、東京、3月11日(2011).
- 4) 有吉 誠一郎, 濱尾 俊幸, 田井野 徹, 古賀 健祐, 古川 昇, 大谷 知行, “単結晶・超伝導トンネル接合の創製とテラヘルツ光デバイス応用”, 理研・分子研合同シンポジウム (第12回エクストリームフォトニクス研究シンポジウム)、埼玉、6月30日(2011).
- 5) 有吉 誠一郎, 濱尾 俊幸, 田井野 徹, 古賀 健祐, 古川 昇, 大谷 知行, “単結晶・超伝導トンネル接合の創製とテラヘルツ光デバイス応用”, 「背景放射で拓く宇宙創成の物理～インフレーションからダークエイジまで～」, 2011 年度新学術領域シンポジウム、相模原、7月11-12日(2011)

- 6) 有吉 誠一郎、高橋 研太、野口 卓、倉門 雅彦、古賀 健祐、古川 昇、大谷 知行、“テラヘルツ帯・伝送線路型 STJ 検出器の原理検証”、2011 年秋季 第 72 回応用物理学学会学術講演会、山形、8 月 30 日(2011).
- 7) S. Ariyoshi, K. Takahashi, T. Noguchi, M. Kurakado, K. Koga, N. Furukawa, C. Otani, “Development of a Terahertz Detector with Transmission-line Type Superconducting Tunnel Junctions”, 14th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-14), Heidelberg, Germany, (August 1-5, 2011).
- 8) S. Ariyoshi, K. Takahashi, T. Noguchi, M. Kurakado, K. Koga, N. Furukawa, C. Otani, “A Terahertz Detector Utilizing Transmission-line Type Superconducting Tunnel Junctions”, Superconductivity Centennial Conference (EUCAS-ISEC-ICMC 2011), Hague, Netherlands, (September 18-23, 2011).
- 9) S. Ariyoshi, T. Hamao, T. Tohru, K. Koga, N. Furukawa, C. Otani, “Fabrication of Single-crystal Films by Molecular Beam Epitaxy for Superconducting Tunnel Junctions”, 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011), Tokyo, Japan, (October 24-26, 2011).
- 10) **【招待講演】** S. Ariyoshi, T. Hamao, T. Tohru, K. Koga, K. Takahashi, T. Noguchi, M. Kurakado, N. Furukawa, C. Otani, “Two Topics on Superconducting Tunnel Junctions: Terahertz Detector and Single-crystal Fabrication”, 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE2011), Yonezawa, Japan, (October 27-29, 2011).
- 11) K. Takahashi, S. Ariyoshi, T. Noguchi, M. Kurakado, K. Koga, N. Furukawa, C. Otani, “Micro-stripline Superconducting Tunnel Junction Detectors for Terahertz Waves”, EASSE2011, Yonezawa, Japan, (October 27-29, 2011).
- 12) **【招待講演】** 有吉 誠一郎、“テラヘルツ帯・超伝導検出器の現状と今後”、日本学術振興会 超伝導エレクトロニクス第 146 委員会 センシングシステム分科会第 4 回研究会、東京、1 月 26 日(2012).
- 13) **【依頼講演】** 有吉 誠一郎、“STJ に関する 2 つの話題：テラヘルツ波検出器と単結晶デバイス”、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会 「High-Q マイクロ波超伝導共振器を用いた大規模量子検出アレイに関する研究」、仙台、2 月 13 日(2012).
- 14) **【招待講演】** 有吉 誠一郎、濱尾 俊幸、田井野 徹、古川 昇、野口 卓、大谷 知行、“分子線エピタキシー法による超伝導トンネル接合素子の作製”、2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会、東京、3 月 16 日(2012).
- 15) K. Takahashi, S. Ariyoshi, T. Noguchi, M. Kurakado, K. Koga, N. Furukawa, C. Otani, “Research of Micro-stripline STJ Detector for Terahertz Band”, 11th International Symposium on High Temperature Superconductors in High Frequency Fields (HTSHFF2012), Matsushima, Miyagi, Japan, (May 29 - June 1, 2012).
- 16) K. Takahashi, S. Ariyoshi, T. Noguchi, M. Kurakado, K. Koga, N. Furukawa, C. Otani, “Development of micro-stripline superconducting tunnel junction detectors for terahertz waves”, 23rd International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT2012), Tokyo, Japan, (April 2-4, 2012).

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有吉 誠一郎 (ARIYOSHI SEIICHIRO)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：20391849