

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760313

研究課題名(和文)高温超伝導ジョセフソン接合を用いた汎用高性能テラヘルツ波検出器

研究課題名(英文)General-purpose and high-performance terahertz wave detectors using high-temperature superconductor Josephson junction

研究代表者

山田 博信(Yamada, Hironobu)

山形大学・理工学研究科・助教

研究者番号：50400411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：スロットダイポールアンテナと高温超伝導ジョセフソン接合を集積したテラヘルツ波検出器を作製し、高周波応答を測定した。220 GHz用検出器では、180～240 GHz に対する結合効率の周波数特性が比較的平坦となり、最大で630 V/Wの総合感度が得られた。また、750 GHz用検出器では700～830 GHz に対して、900 GHz用検出器でも735 GHzに対する応答が得られた。以上のことからこの検出器の広帯域性および高感度性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：I fabricated terahertz wave detectors using Josephson junctions with slot dipole antennas and measured radio frequency responses of them. For the detector for 220 GHz, frequency characteristic of coupling efficiency from 180 to 240 GHz was relatively flat and the highest system sensitivity was 630 V/W. The detectors for 750 and 900 GHz were responded to the radio frequency from 700 to 830 GHz and 735 GHz, respectively. These results show that the detectors are broadband and high sensitivity.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：テラヘルツ波 検出器 ジョセフソン接合 スロットダイポールアンテナ 高温超伝導体

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波は、周波数帯域が 300 GHz ~ 3 THz 程度で、電波の物質透過性と光波の直進性の両方の性質を兼ね備えていることから、高速大容量通信、セキュリティイメージング、生体・有機物質の分析などへの応用が期待されている。しかし、そのための要請の 1 つとして、高性能かつ汎用的な検出器が求められている。

現在実用化されているテラヘルツ波検出器には、半導体を用いられている。シリコンポロメータは高帯域だが、熱雑音抑制のために数ケルビン程度へ冷却が必要であるため、冷却が困難である。また、ショットキーダイオードは常温で動作するが、検出できるテラヘルツ波周波数の帯域が制限される。このように、広帯域・高感度・高速度で、なおかつ冷却が容易（あるいは不要）というすべての性質を兼ね備えた汎用・高性能なテラヘルツ波検出器は、今のところ存在していない。他方で、超伝導トンネル接合、熱電子ポロメータ、超伝導転移端検出器などの、超伝導体検出器の研究開発も進められている。これらは半導体検出器よりも高感度・高速度であるが、ほとんどは、超伝導転移温度が数ケルビン程度の金属超伝導体を用いているため、冷却が困難である。しかしながら、超伝導ジョセフソン接合は、高周波に対して高感度・高速度な応答を有しており、材料として $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ を用いた場合、液体窒素温度 (77 K) 程度の冷却でも動作し、その上、理論上は検出周波数をテラヘルツ波帯域全域へ広帯域化することが可能であることなどから、汎用・高性能なテラヘルツ波検出器が実現できる。

そこで、超伝導ジョセフソン接合に着目し、高温超伝導体を用いたテラヘルツ波検出器の開発を行ってきた。ジョセフソン接合では、高周波が照射されると、電流-電圧特性に周波数に応じたステップ状の変化が生じるので、局部発振器なしに周波数スペクトルの測定が可能である。これまで、同一平面にジョセフソン接合 (JJ) と 2 つのスロットダイポールアンテナ (SDA) がコプレーナ導波路 (CPW) によって結合されている SDA/CPW/JJ 型検出器を作製している。この検出器では良好な周波数応答が得られているものの、コプレーナ導波路を用いることで検出器としての帯域が制限されてしまうことやインピーダンス不整合が生じるなどの課題があった。このことから、コプレーナ導波路を使用せずジョセフソン接合とスロットダイポールアンテナをマイクロストリップ (MS) 的に結合させる SDA/MS/JJ 型検出器を着想した。

2. 研究の目的

本研究では、スロットダイポールアンテナとジョセフソン接合をマイクロストリッ

プ的に結合した SDA/MS/JJ 型高温超伝導体テラヘルツ波検出器について、以下の課題を設定する。1 つ目はスロットダイポールアンテナの広帯域化および低インピーダンス化で、アンテナのインピーダンスを小さくすることでジョセフソン接合のインピーダンス (常伝導抵抗) に近づけ、インピーダンス不整合損を低減させる。また、同時に広帯域化も検討する。2 つ目はジョセフソン接合の高常伝導抵抗化で、常伝導抵抗をアンテナのインピーダンスに近づけ、インピーダンス不整合損を低減させる。3 つ目は SDA/MS/JJ 型高温超伝導体テラヘルツ波検出器の作製および評価で、実際に集積することによる影響を検討する。

3. 研究の方法

検出器は次のようにして作製した。まず厚さ 0.5 mm の MgO 双結晶基板の上に成膜した Au (50 nm) / $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (100 nm) の粒界部分に接合となる幅 5 μm のマイクロブリッジを作製し、その上に誘電体層としてベンゾシクロブテン層 (2.5 μm) とアンテナ層となる Au 薄膜 (200 nm) を成膜してからスロットダイポールアンテナを作製した。スロットダイポールアンテナは、シミュレーションによる給電点インピーダンスの周波数特性の検討結果を踏まえて 1 波長共振するように設定し、幅は 20 μm とした。このときの給電点インピーダンスは $3+j20 \Omega$ であった。そして作製した検出器は、必要に応じてレーザーエッチングによりマイクロブリッジの幅を 2 μm 程度まで段階的にトリミング加工して接合特性を調整した。

作製した検出器はパルス管冷凍機により 30 K まで冷却し、その後ガンダイオード発振器 (180-240 GHz) または後進波管発振器 (700-830 GHz) により高周波を照射して電流-電圧特性を測定した。

4. 研究成果

図 1 に設計周波数 220 GHz で作製した検出器の光学顕微鏡写真を示す。アンテナの長さは 700 μm であり、マイクロブリッジは 5 μm 幅から 2 μm 幅にトリミング加工されている。加工前のジョセフソン接合の臨界電流、常伝導抵抗はそれぞれ 1.30 mA、0.62 Ω であったが、加工後はそれぞれ 0.62 mA、1.40 Ω となった。トリミング加工によって常伝導抵抗が大きくなり、アンテナの給電点インピーダンスに近づけることができた。

図 2 に、ブリッジ幅が 5 μm および 2 μm のときの 220 GHz 用検出器について 30 K において 193 GHz の高周波を照射して測定した電流-電圧特性を示す。このとき、高周波の電力は 0 μW から 400 μW 程度まで変化させており、図ではそれぞれの特性が 0.4 mV ずつずらして表示されている。高周波を照射

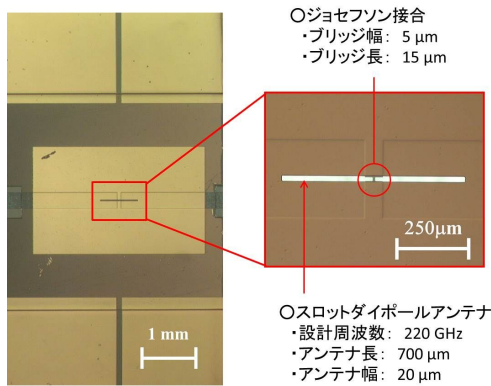
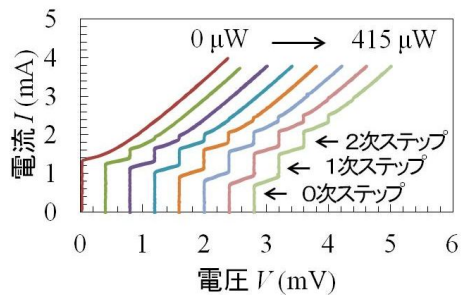
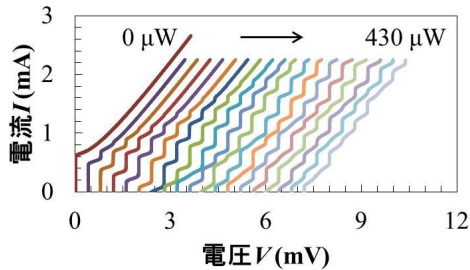


図1 220 GHz 用 SDA/MS/JJ 型検出器



(a) ブリッジ幅 5 μm



(b) ブリッジ幅 2 μm

図2 220 GHz 用検出器の高周波応答 (193 GHz, 30 K)

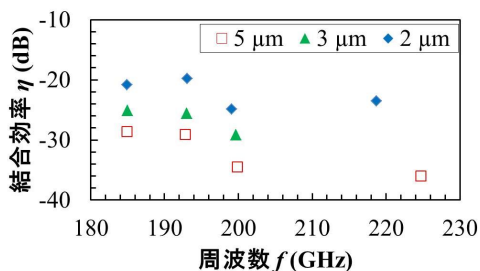


図3 220 GHz 用検出器の結合効率 周波数特性 (30 K)

すると電流 電圧特性にジョセフソン接合に特有のステップ状の変化(シャピロステップ)が確認され、さらにこのとき高周波電力を増加させていくと各ステップの電流値がベッセル関数的変化(電圧 0 V のステップの場合は減少 0 mA 増加の変化が繰り返される)が確認された。また、この変化はブリ

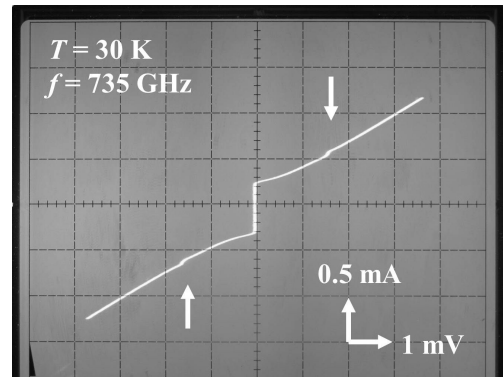


図4 750 GHz 用検出器の高周波応答 (735 GHz, 30 K)

ッジ幅を小さくするにつれて顕著になっていくのが確認できた。これらのことから、作製した検出器が動作していることが確認できた。

次に、測定で得られた各ステップの電流値と、接合の等価回路モデル(RSJ(resistively shunted junction)モデル)を用いた計算結果から得られた電流値を比較することで、ジョセフソン接合とアンテナの結合効率を検討した。図3は各ブリッジ幅についての結合効率の周波数特性である。180-240 GHz 程度の周波数帯域において結合率は比較的平坦な変化をしており、広帯域を示唆する結果が得られた。また、結合率はブリッジ幅を小さくするにつれて大きくなっていき、ブリッジ幅 2 μm, 周波数 193 GHz のときに最大値約-19 dBの結果が得られた。この値から検出器の総合感度を求めると 630 V/W となり、高感度を示唆する結果が得られた。

図4に、750 GHz 用検出器(アンテナ長 210 μm)について 30 Kにおいて 735 GHz の高周波を照射して測定した電流 電圧特性を示す。1次までではあるがシャピロステップが観察されており、作製した検出器が動作していることが確認できた。シャピロステップは 720-800 GHz の範囲にわたって観察されており、高周波の検出ができることを確認した。また、900 GHz 用として作製した検出器(アンテナ長 180 μm)に 735 GHz の高周波を照射した際にも同様のシャピロステップが得られており、周波数が高い領域についても広帯域を示唆する結果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

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," H Yamada et al 2014 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)

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, 28 MAY 2013. (doi: 10.1016/j.phpro.2013.05.006) (査読あり)

[学会発表](計6件)

山田博信, 早坂隆顕, 山本拓海, 齊藤敦, 大嶋重利, 中島健介, 「1波長スロットダイポールアンテナを集積した高温超伝導粒界ジョセフソン接合テラヘルツ波検出器の高周波応答」, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 18a-D5-7 (2014.3.17-20, 青山学院大学相模原キャンパス)

Yamada H., Hayasaka T., Toya G., Nakajima K, Saito A., Ohshima S., "YBCO grain boundary Josephson junction coupled with a slot dipole antenna for terahertz wave detectors," 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), 1P-EL3-11 (2013.9.15-19, Magazzini del Cotone conference center (イタリア))

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)

H. Yamada, T. Hayasaka, A. Saito, S. Ohshima, K. Nakajima, "Single-slot-dipole coupled YBCO Josephson junctions for terahertz wave detectors," 25th International Symposium on Superconductivity, FDP-26, p. 246 (2012.12.3-5, タワーホール船堀)

山田博信, 早坂隆顕, 齊藤敦, 大嶋重利, 中島健介, 「単一スロットダイポールアンテナを集積した高温超伝導ジョセフソン接合テラヘルツ波検出器」, 第73回応用物理学会学術講演会, 14a-A2-9, p. 11-140 (2012.9.11-14, 愛媛大学城北地区)

H. Yamada, T. Hayasaka, H. Murai, A. Saito, S. Ohshima, K. Nakajima, "Terahertz wave detector using single grain boundary step-edge type Josephson junction," 11th International Symposium on High Temperature Superconductors in High Frequency Fields (HTSHFF 2012), p.

77 (2012.5.29-6.1, ホテル松島大観荘)

[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/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし