

平成21年 5月29日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18688009

研究課題名（和文）：大面積・高効率な電磁パルス波検出器

研究課題名（英文）：Large area and high efficiency electromagnetic pulse wave detector

研究代表者

田井野 徹（TAINO TOHRU）

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40359592

研究成果の概要：本研究では、赤外光とミリ波の中間領域の電磁波であるテラヘルツ波用の検出器の大面積化と高感度化を目的とした開発を行った。検出器には、超伝導トンネル接合素子をベースとした、基板吸収方式を採用した。本方式では、基板に照射したテラヘルツ波により、基板内で発生するフォノンを超伝導素子で検出するため、超伝導電極材料と電極サイズを最適化することで本研究の目的が達成できる。申請者は、各種電極材料の検討やそれに応じた最適な電極サイズなどを見だし、開発の指針を得ることに成功した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	17,700,000	5,310,000	23,010,000
2007年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
総計	23,500,000	7,050,000	30,550,000

研究分野：超伝導エレクトロニクス、低温工学

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：超伝導トンネル接合素子、テラヘルツ波検出器、ニオブ、アルミ

1. 研究開始当初の背景

赤外光とミリ波の中間領域の電磁波であるテラヘルツ（THz）波は、発生・検出ともに困難であったため、これまで未開拓電磁波領域と呼ばれてきた。しかし近年、THz波光源を中心とした技術開発が進むにつれ、様々な産業応用の可能性が検討されている。電波的な物質透過性・実用的な空間分解能／物質固有の吸収スペクトルによる物質同定能力等を活かした、透視イメージング診断・非破壊検査等様々な産業用途への提案がその例である。他方、光源の発達に比べその検出器開発は遅れをとっており、現状では、単素子

の半導体ボロメータ検出器が主流の検出器として留まっている。しかし、様々なイメージング応用が提案されるにつれ、検出器性能に対する要求が高まっており、特に、計測時間の短縮、分厚いサンプルへの対応、スペクトル情報とイメージ情報の融合と言った要求に耐えうる検出器の開発が強く求められている。

2. 研究の目的

本研究では、THz波の吸収体である基板で発生したフォノンを超伝導トンネル接合素

子 (STJ) で検出する、THz 波用基板吸収型 STJ 検出器を活用して、大面積・高感度 THz 波検出器の実現を目的とした。

3. 研究の方法

図 1 は、申請者が提案する検出器を示している。基板側から照射された THz 波は、基板内でフォノンに変換される。そのフォノンによって、基板に集積された STJ 素子の下部電極内のクーバー対が解離することで THz 波を信号として検出することが可能となる。

ここで、STJ 素子は高速、高エネルギー分

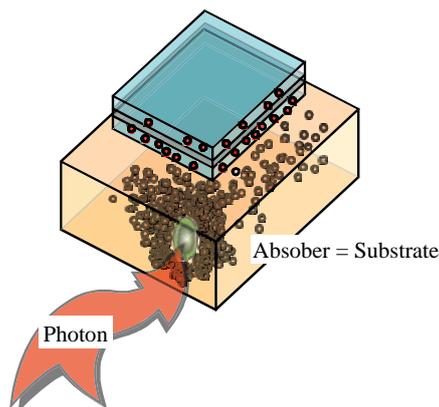


図 1 提案する THz 波用検出器

解能、広帯域を特徴とするフォトン検出器として国内外において盛んに研究開発が行われている。通常の STJ フォトン検出器は、STJ 上部側からフォトン照射する。一方、提案する検出器は基板側から照射するため、STJ 下部電極が有感領域として利用される。従って、基板に吸収された THz 波を効率よく検出することが、検出器の高効率化につながる。なお基板には、THz 波帯で吸収率の大きい材料、LiNbO₃を用いている。また、STJ 検出器を用いた THz 波高効率検出には、電極材料の最適化や検出器面積の拡大も挙げられる。本研究では、THz 波の高効率検出器実現のアプローチとして、

- (1) 単素子 STJ 検出器の電極面積最適化
- (2) STJ 検出器電極材料の最適化
- (3) STJ 検出器のアレイ化

の 3 つを挙げた (ここで単素子とは、1 つの検出器を意味する)。

4. 研究成果

前述の研究方法に基づいた成果は以下の通りである。

- (1) 単素子 STJ 検出器の電極面積最適化
提案する STJ 検出器の構造は、図 2 に示す

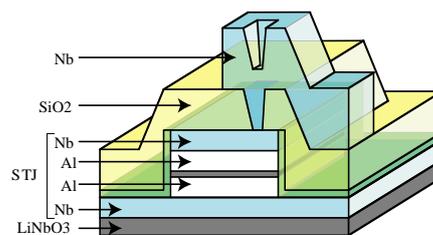


図 2 作製する検出器の断面図

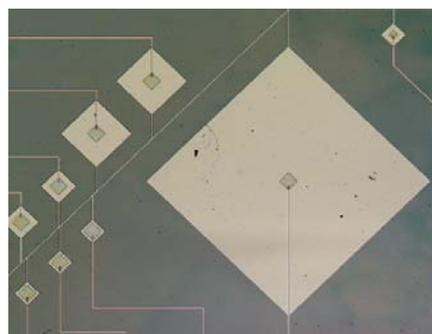


図 3 作製した検出器の顕微鏡写真

通り、STJ 検出器の下部電極 (Nb) が基板 (LiNbO₃) と接触している。そのため、基板で発生したフォノンを効率よく検出できる、STJ 検出器の最適な電極面積が存在する。

申請者は、まず単素子の最適電極面積を見いだすため、STJ 検出器の上部電極サイズが 50 μm 角一定で、下部電極サイズが 100、200、400、800 μm 角の 4 種類の検出器を設計した。その後、設計したフォトマスクを用いて検出器を作製し、評価を行った。作製した検出器の顕微鏡写真は図 3 の通りである。THz 波照射測定の結果、下部電極の大きさを変化させても、検出器の出力信号はほぼ一定で、出力信号は下部電極サイズには依存しないことがわかった。

次に下部電極サイズが 70 μm 角一定で、上部電極サイズが 25、40、50 μm の 3 種類の検出器について設計、作製、評価を行った。THz 波照射測定の結果、出力信号は、上部電極面積の増大とともに大きくなっていることがわかった。しかしながら単純な比例増加ではなく、データ解析より、準粒子拡散長を取り入れることで説明できることを見いだした。詳細は以下の通りである。

提案する検出器は、THz 波を基板で受け、基板内で発生したフォノンは STJ 検出器の下部電極に到達する。そこで、下部電極内で生成された準粒子のうち、STJ 検出器のトンネル障壁まで到達できた準粒子が出力信号に寄与できるのが検出原理である。実験結果を加味すると、出力信号は接合面積 (上部電極面積) と準粒子拡散長の和の二乗に一致することがわかった。つまり、準粒子拡散長を考慮した下部電極サイズに設計することで、

THz 波を効率よく収集することができる。※実際の拡散長数値については、(2)に示す。

(2) STJ 検出器電極材料の最適化

提案する STJ 検出器を構成する電極材料は、図 2 に示す通り Nb である。STJ 検出器の電極材料として、Al や Ta などの超伝導金属も用いられている。これらの超伝導金属にはそれぞれ特徴があり、ギャップエネルギー、臨界温度、準粒子寿命など一長一短である。表 1 に、Nb、Ta、Al の特徴を示す。

表 1 超伝導電極材料の特性

	臨界温度 [K]	ギャップエネルギー [meV]	準粒子寿命 [nsec]
Nb	9.2	1.5	0.15
Ta	4.4	0.68	1.8
Al	1.2	0.17	440

表 1 において、臨界温度は超伝導に転移する温度、ギャップエネルギーはクーパー対を解離するために必要な最小のエネルギー、準粒子寿命は準粒子が生存している時間を意味する。臨界温度が高ければ、検出器としての動作温度も高くなる。ギャップエネルギーは小さければ小さいほど、同じ入射エネルギーで生成される準粒子が増え、出力信号の増大につながる。準粒子寿命が長ければ長いほど、トンネリングに寄与できる準粒子数が増える。

申請者は、Nb、Ta、Al の 3 種類の接合を作製し、THz 波照射実験を行うことで(1)の拡散長の算出を行った。Nb の場合の拡散長は 11 μm 、Nb/Al の場合は 52 μm 、Nb/Ta の場合は 7 μm であった (※Ta 系検出器の作製には失敗しているため現在のところデータはない。また、Al 系検出器の作製には成功しており、評価は現在行っている)。以上の結果から、下部電極を Nb/Al のバイレイヤにした場合、拡散長が飛躍的に向上していることがわかる。これらの数値から、単素子 STJ 検出器の最適面積設計の指針を得ることができた。

(3) STJ 検出器のアレイ化

(1)、(2)の結果を踏まえてアレイ検出器の作製を行うべきではあるが、まずはアレイ検出器としての効果を検証するため、準粒子拡散長を考慮していないアレイ検出器の設計と作製を行った。検出器には Nb 系 STJ を採用した。図 4 に、作製したアレイ検出器の顕微鏡写真を示す。同図に示すアレイ検出器は、1 つの下部電極上に複数の素子を配置している。各上部電極からの信号は、上部電極のコンタクトを通じて並列接続することで、出力信号の増大を図っている。作製した検出器の THz 波照射測定では、単素子 STJ 検出器と、

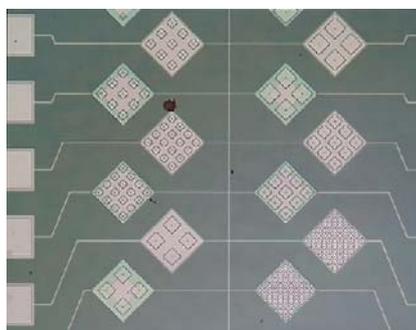


図 4 作製したアレイ検出器の顕微鏡写

アレイ化した検出器の比較を行った。具体的には、単素子として 60 μm 角の検出器を、アレイ化素子として上部電極面積 20 μm 角の単素子が 3 \times 3=9 個の並列接続された検出器(総面積 60 μm 角)を用いた。THz 波照射測定の結果、アレイ化素子の出力信号は、単素子の 2 倍であることがわかった。本来なら約 3 倍の出力信号が得られると考えていたが、設計したアレイ化素子は準粒子拡散長を考慮していないため、準粒子のロスが発生していると考えている。しかしながら、アレイ化素子の有効性を確認することができた。なお、準粒子を考慮したアレイ化検出器の結果については、現在その作製を行っている。

(4) その他

1. 単素子 STJ 検出器を用いた THz 波分光

前述の 4. (2)の単素子 STJ 検出器を用いて、異なる 2 種類の糖の THz 波分光測定を行った。その結果、異なるスペクトルを得て、STJ 検出器を用いた初の分光測定に成功した。

2. Al 系検出器の作製方法の確立

STJ フォトン検出器において、電極材料の選択は重要である。中でも一定入射エネルギーに対して準粒子生成数が最も多い Al については、これまで細かなパターンを有する検出器の作製は困難であった。申請者は、検出器の電極に正規分布関数形状を採用した Al 系検出器の作製に成功した。

3. STJ 検出器の基板選択

基板吸収型 STJ 検出器では、原理上、THz 波帯での吸収率の大きい基板材料が有望である。申請者は、基板材料として LiNbO₃ と LiTaO₃ を用いた検出器を作製し、比較を行った。THz 波照射測定において、LiTaO₃ 基板を用いた検出器の方が大きな出力波高値を得ることができた。これは THz 波帯の吸収率の違いからも説明できる。しかしながら LiTaO₃ 基板を用いた検出器の作製の場合、LiNbO₃ 基板と比較して焦電効果が大きく、スパッタ時の基板温度上昇によって基板が破損しやすいことがわかった。そこで申請者は、基板材料として LiNbO₃ 基板を用いることとした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- (1) Taino T., Ishii H., Yoshimura S., Otani C., Ariyoshi S., Myoren H., Kawase K., Shibuya T., Sato H., Shimizu H. M., Takada S., Terahertz Electromagnetic-waves Detector Using Nb-based Superconducting Tunnel Junction on LiNbO3 Substrate Absorber, *Physica C*, Vol.463-465, pp.1119-1122, 2007, 査読有り
- (2) Taino T., Nishihara T., Hoshino K., Myoren H., Sato H., Shimizu H. M., Takada S., X-ray Detection Using Superconducting Tunnel Junction Shaped Normal-Distribution-Function, *IEICE Trans. Electron.*, Vol.E90-C, No.3, pp.566-569, 2007, 査読有り
- (3) Otani C., Nakano R., Taino T., Shibuya T., Ariyoshi S., Yoshimura S., Myoren H., Sato H., Shimizu H. M., Takada S., Kawase K., Direct and Indirect Detection of Terahertz Waves using a Nb-based Superconducting Tunnel Junction, *Institute of Physics Conference Series*, Vol.43, pp.1303-1306, 2006, 査読有り
- (4) Taino T., Yoshida M., Narisawa M., Myoren H., Kikuchi K., Nakagawa H., Aoyagi M., Sato H., Shimizu H. M., Takada S., Polyimide Buffer Layer for STJ Photon Detector, *Institute of Physics Conference Series*, Vol.43, pp.1319-1321, 2006, 査読有り
- (5) Taino T., Nakano R., Yoshimura S., Myoren H., Takada S., Otani C., Ariyoshi S., Shibuya T., Kawase K., Sato H., Shimizu H. M., A Broadband Terahertz Detector Using a Superconducting Tunnel Junction, *Nucl. Instr. and Meth. A559*, pp.751-753, 2006, 査読有り
- (6) 田井野徹, 石井宏和, 吉村正太, 明連広昭, 高田進, 大谷知行, 有吉誠一郎, 佐藤広海, 清水裕彦, 川瀬晃道, THz波検出用基板吸収型超伝導トンネル接合素子, 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 電子情報通信学会研究報告, ED2006-193, pp.53-58, 2006, 査読なし
- (2) 青木一隆, 山下直人, 渡邊穰, 石井宏和, 田井野徹, 大谷知行, 渋谷孝幸, 有吉誠一郎, 佐藤広海, 明連広昭, 基板吸収型並列アレイ STJ 検出器による THz 波の検出, 第 69 回応用物理学学術講演会, 2008.9.3, 中部大学
- (3) 山下直人, 青木一隆, 渡邊穰, 石井宏和, 田井野徹, 大谷知行, 渋谷孝幸, 有吉誠一郎, 佐藤広海, 明連広昭, 超伝導トンネル接合検出器を用いた THz 波分光測定, 第 69 回応用物理学学術会, 2008.9.3, 中部大学
- (4) 鎌田幸佑, 田井野徹, 明連広昭, 高田進, Al 系超伝導トンネル接合素子の作製と電気的特性, 第 68 回応用物理学学術講演会, 2007.9.5, 北海道工業大学
- (5) 石井宏和, 田井野徹, 大谷知行, 渋谷孝幸, 有吉誠一郎, 佐藤広海, 明連広昭, 高田進, 基板吸収型並列 STJ アレイ検出器による THz 検出器の高感度化, 第 68 回応用物理学学術講演会, 2007.9.5, 北海道工業大学
- (6) Otani C., Ariyoshi S., Taino T., Myoren H., Sato H., Shimizu M. H., Takada S., Kawase K., Terahertz Detectors using Superconducting Tunnel Junctions, 19th International Symposium on Superconductivity, 2006.10.30, Nagoya, Japan
- (7) Taino T., Ishii H., Yoshimura S., Otani C., Ariyoshi S., Myoren H., Kawase K., Shibuya T., Sato H., Shimizu M. H., Takada S., Terahertz Electromagnetic-waves Detector Using Nb-based Superconducting Tunnel Junction on LiNbO3 Substrate Absorber, 19th International Symposium on Superconductivity, 2006.10.30, Nagoya, Japan

[学会発表] (計 1 3 件)

- (1) Taino T., Ishii H., Watanabe Y., Aoki K., Yamashita N., Myoren H., Takada S., Ariyoshi S., Otani C., Sato H., THz Spectroscopy Using Superconducting Tunnel Junction Detectors, *Applied Superconductivity Conference 2008*, 2008.8.20, Chicago, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田井野 徹 (TAINO TOHRU)
埼玉大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：40359592

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者