

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26600131

研究課題名(和文) 小型、超低ノイズ性を有するフォトン検出器の実現

研究課題名(英文) Development of compact and low noise photon detector

研究代表者

田井野 徹 (TAINO, Tohru)

埼玉大学・情報メディア基盤センター・准教授

研究者番号：40359592

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、次世代のフォトン検出器である超伝導トンネル接合素子(STJ)の実用化について、コイルの小型化とフォノンノイズ低減を着目した。コイルの小型化は、基板上にコイルを集積し、特にコイルは基板内に埋め込まれた構造を提案した。平坦化を含む埋め込みコイル作製方法の最適化により、そのコイルへの通電及びコイル上のSTJは良好な特性を示した。フォノンノイズについて、コイルとSTJとの間の層間絶縁膜の音響インピーダンスに着目し、Al₂O₃を用いてSTJの作製に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have proposed and demonstrated a low noise photon detector using a superconducting tunnel junction (STJ) with an embedded coil for applying a magnetic field. The STJ fabricated on the coil, which was embedded in a Si substrate. The insulator between the STJ and the coil employed Al₂O₃ film as phonon reflection layer. Our proposed STJ showed good electrical characteristics at the temperature range from 4.2 K to 1.7 K.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：放射線 高性能フォトンセンサー

1. 研究開始当初の背景

半導体ベースのフォトン検出器は様々な分野で広く用いられているが、その検出器性能は半導体物質の物理的制約(エネルギーギャップ)により、今以上の性能向上は見込めない。この半導体検出器の性能を遥かに凌駕する次世代フォトン検出器として、超伝導トンネル接合(Superconducting Tunnel Junction、以下 STJ)が注目されている。STJ は広帯域、高分解能、高速応答を特徴としている。

2. 研究の目的

STJ フォトン検出器は優れた特徴を有しながら、磁場印加用コイルの小型化と検出器の性能をフルに発揮するための STJ の低ノイズ化が問題点を有し、その問題点は以下の通りである。

(1)STJ フォトン検出器は、その検出動作時に磁場の印加が必要である。通常、この磁場印加には超伝導線で巻かれたコイル(以下、外部コイル)が用いられる。外部コイルは、冷凍機内に設置された検出器の外側に配置される。従って、STJ の実用化には外部コイルの寸法を含めて設計する必要があり小型化が困難であること、また外部コイルの大きさが障害となり、狭い空間での測定は制限される。

(2)STJ フォトン検出器はその特性上、非常に小さいエネルギーをも検出できる。これは検出器としての性能が優れていることを意味するが、その反面、入射したフォトン以外のエネルギーにも感度を有する。ここで、入射したフォトンのエネルギー以外は遮断しなければ検出器の分光能力が低下する。

そこで次世代超高感度フォトン検出器である STJ に必要な、1. STJ の外部からの磁場印加に代わる、チップ上での磁場印加可能な方法の検証と 2. 検出器の分光能力低下の主要因であるフォノンイベントの抑制、の 2 点を目的とした

3. 研究の方法

2 点の問題点を解決するため、以下の方法を採用した。

(1)磁場印加用コイル埋め込み型 STJ の実現
磁場印加用コイル埋め込み型 STJ は、検出面積の確保が可能、フォトン検出器としての正確性・再現性・安定性の向上ならびにコイル段差を軽減できる。その実現に、以下の 2 点を行った。

1 基板埋め込みコイル作製方法確立と評価

基板埋め込みコイルは Si 基板にコイル(Nb)を埋め込み、そのコイルに通電することでコイル上の絶縁層(SiO₂)を介して集積した STJ に正確な平行磁場を印加する。その構造実現にはメタルマスクを用いた作製方法を採用する。作製したコイルは、平坦化処理を行い、その平坦度及びコイルへの通電実験を行うことで評価する。

2 埋め込みコイル上の STJ 作製と評価

埋め込みコイルが完成したのち、そのコイ

ル上部に絶縁層を堆積し、STJ を作製する。作製した STJ の電気的特性を評価する。

(2)低ノイズ化を可能にする STJ の実現

STJ へのフォトン照射の際、フォトンの一部は STJ 以外の部分、つまり STJ が集積された基板に照射される。基板に照射されたフォトンによって発生するフォノンは、基板を介して STJ へ伝わる。STJ はフォノン自身も検出するため、入射フォトン以外のスペクトルが形成される。これを防ぐために、STJ と基板との間の絶縁層に、フォノン遮蔽効果に優れる Al₂O₃を採用し、その作製を行う。

4. 研究成果

それぞれの研究課題に対する結果は以下の通りである。

(1)磁場印加用コイル埋め込み型 STJ の実現

1 基板埋め込みコイル作製方法確立と評価

図 1 に Al によるメタルマスクを用いた基板埋め込みコイルの作製方法を示す。まず最初にマグネトロンスパッタ法で Si 基板上に Al を 20 nm 成膜し(図 1(a))、その後フォトリソグラフィ技術を用いて基板埋め込みコイルのメタルマスクパターンを形成する(図 1(b))。次に、RIE で Si 基板をエッチングし、コイル用埋め込み溝の形成を行った後(図 1(c))、マグネトロンスパッタ法で Nb を堆積させる(図 1(e))。その後、Nb 下部にある Al を強アルカリ溶液により溶解し、Nb をリフトオフする(図 1(f))。最後に、CMP 処理することで平坦化を行って完成となる(図 1(g))。

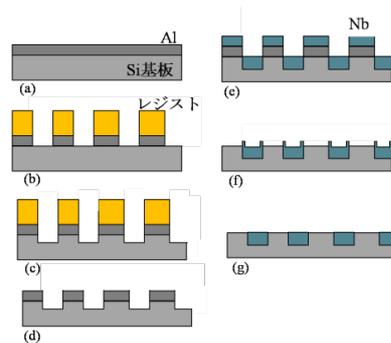


図 1 基板埋め込みコイルの作製方法

磁場印加用コイル埋め込み型 STJ は Si 基板内に埋め込んだ磁場印加用のマイクロストリップコイルに電流を流すことで STJ に対して磁場印加を行う。従って、コイルが基板に埋め込まれることで電流値が制限されることは、印加可能な磁場の大きさを制限することにつながる。そこで、基板上に作製したマイクロストリップコイルと基板内に埋め込んだマイクロストリップコイルの 4.2 K における最大電流値の比較を行うことで基板内にマイクロストリップコイルが設計通りに埋め込まれているかの検証を行った。

臨界電流値の測定を行なった結果、基板上コイル、基板埋め込みコイル共に最大電流値

は 28 mA であった。この結果より、Si 基板をエッチングしたコイル埋め込み溝に対して、Nb が設計値通りに埋め込まれていることが分かった。また、この電流により STJ に印加される磁場 11.76 mT は、外部コイルの印加磁場 10 mT 以上であり、十分にジョセフソン電流を抑制することが可能である。

2 埋め込みコイル上の STJ 作製と評価

磁場印加用コイル埋め込み型 STJ の作製を行った。作製方法を図 2 に示す。初めに、図 1 で示した方法により基板埋め込みコイルを作製し(図 2(a))、CMP で平坦化を行う(図 2(b))。次に、基板埋め込みコイルと STJ との電氣的絶縁を取るために SiO₂ を堆積させる(図 2(c))。その後、下部配線となるアンダーレイヤを形成し(図 2(d))、マルチレイヤ(Nb/Al-AI_{0.5}/Al/Nb)をリフトオフ法で成膜する(図 2(e))。その後、層間絶縁膜(図 2(f))、配線(図 2(g))を形成し、完成となる。なお、トンネルバリアの酸化条件は、酸素圧力 1500 Pa、酸化時間 70 min で行い、接合サイズは 10000 μm² である。

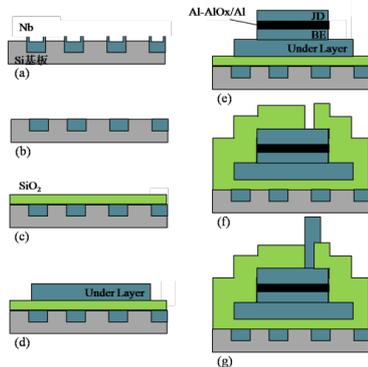
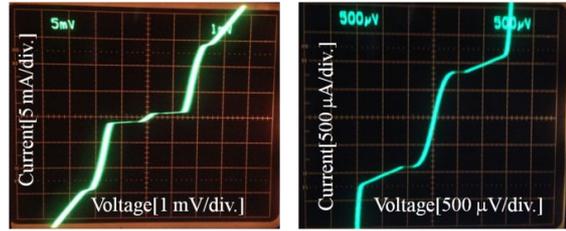


図 2 作製方法の概念図

基板埋め込みコイルによる磁場印加でジョセフソン電流を抑制して得た I - V 特性を図 3 に、外部コイルの磁場印加によりジョセフソン電流を抑制して得た I - V 特性を図 4 に示す。図 3 と図 4 の I - V 特性を比較すると、同等の特性を得ることができたことがわかる。この結果より、基板埋め込みコイルによるジョセフソン電流の抑制は可能であり、また基板埋め込みコイルによる磁場印加に起因する特性への影響がないことを確認した。ここで、ジョセフソン電流を抑制する際の電流値を比較すると、基板埋め込みコイル: 10 mA、外部コイル: 120 mA であり、約 1/10 の電流を基板埋め込みコイルに流すことで、外部コイルによる印加磁場と同等の磁場印加が可能であることがわかった。

次に液体ヘリウムを減圧することにより、作製した素子のサブギャップ電流の 4.2 K ~ 1.6 K における温度依存特性の測定を行った。その結果を図 5 に示す。同図より、サブギャップ電流は温度の低下とともに指数関数的に減少していき、理論曲線通りのサブギャップ電流が得られなかった原

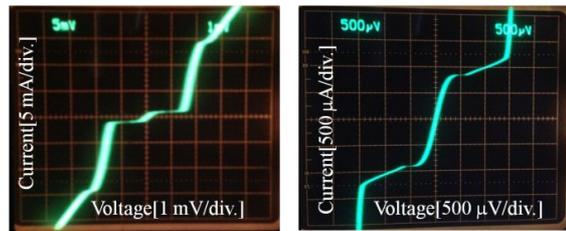
因として、STJ 作製下面の平坦性が不十分であったことが考えられる。



全体図

拡大図

図 3 基板埋め込みコイルによる磁場印加を用いた磁場印加用コイル埋め込み型 STJ の I - V 特性



全体図

拡大図

図 4 外部コイルによる磁場印加を用いた磁場印加用コイル埋め込み型 STJ の I - V 特性

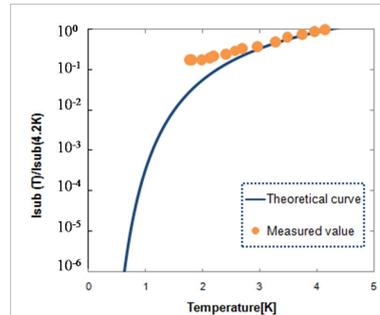
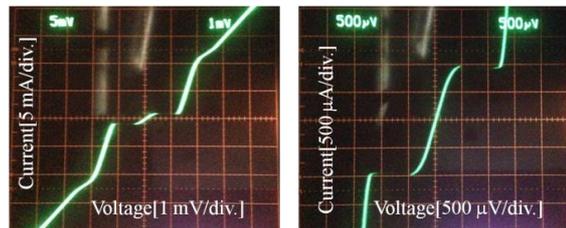


図 5 作製した STJ の温度依存特性

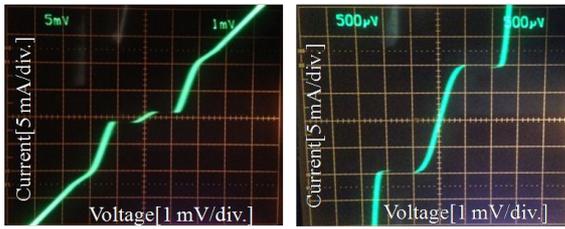
これらの結果を踏まえ、作製方法に改善を加え、前述と同様、4.2 K における I - V 特性を行った。その結果を、図 6 と図 7 に示す。図 6 と図 7 から、図 3 と図 4 の特性と比較すると、サブギャップ領域における電流値が小さく、負性抵抗が観測されていることがわかる。したがって 4.2 K においてリーク電流の小さい STJ が作製できたと言える。また、図 6 と図 7 より、コイルの有無によらず同等の特性が得られていることがわかる。



全体図

拡大図

図 6 磁場印加用コイル埋め込み型 STJ の I - V 特性



全体図 拡大図
 図7 従来のSTJ(埋め込みコイルなし)のI-V特性

次に、作製したSTJの減圧測定を行なった。そのサブギャップ電流の温度依存特性を図8に示す。4.2 K~1.6 Kにおいて、理論曲線に従うサブギャップ電流の温度依存特性を得ることができたことから、磁場印加用コイル埋め込み型STJの作製方法を確立したと言える。

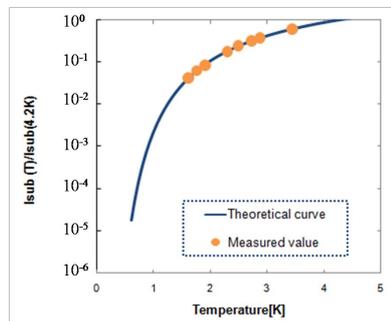


図8 作製したSTJの温度依存特性

(2)低ノイズ化を可能にするSTJの実現

低ノイズ化を可能とするSTJでは、基板埋め込みコイルとSTJの間の層間絶縁層に、フォノン遮蔽効果に優れる Al_2O_3 を採用した。 Al_2O_3 を用いた磁場印加用コイルの作製方法は図1と同様である。そこで、基板上に作製したマイクロストリップコイルと基板内に埋め込んだマイクロストリップコイルの2種類のサンプルを用意し、4.2 Kにおける最大電流値の比較を行った。

臨界電流値の測定を行なった結果、基板上コイル、基板埋め込みコイル共に最大電流値は SiO_2 の時と同様、28 mAでこの電流によりSTJに印加される磁場11.76 mTであることがわかった。

その後、 Al_2O_3 を層間絶縁層として採用した埋め込みコイル上にSTJを作製した。これまでの結果を踏まえると、このSTJはジョセフソン電流の抑制と低ノイズ化が可能であることを示している。

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2件)

(1) K. Yamaguchi, H. Nakagawa, M. Aoyagi,

M. Naruse, H. Myoren, T. Taino, "Fabrication of Superconducting Tunnel Junctions with Embedded Coil for Applying Magnetic Field," Physica C, 査読有, 530, 2016, pp.90-92.

DOI: 10.1016/j.physc.2016.03.010

(2) T. Nakayama, M. Naruse, H. Myoren, T. Taino, "Fabrication of TiN/AlN/TiN Tunnel Junction," Physica C, 査読有, 530, 2016, pp.87-89.

DOI: 10.1016/j.physc.2016.04.005

〔学会発表〕(計14件)

(1) 田井野徹, 遠藤壮, 藤井剛, 浮辺雅宏, 高木秀樹, 大久保雅隆, 成瀬雅人, 明連広昭, 大谷知行, "Si-LBOハイブリッド基板を用いた中性子イメージング用STJ検出器開発," 第64回応用物理学学術講演会, 2017.3.15, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

(2) M. Sone, N. Igarashi, M. Naruse, H. Myoren, Y. Sasaki, C. Otani, and T. Taino, "THz detection using substrate absorption type STJ with position resolution," 29th International Symposium on Superconductivity (ISS2016), 2016.12.14, 東京国際フォーラム(東京都・千代田区)

(3) K. Morita, S. Hatakeyama, M. Naruse, H. Myoren, M. Aoyagi, and T. Taino, "Fabrication method of superconducting TSV for STJ detector using 3D integration technique," 29th International Symposium on Superconductivity (ISS2016), 2016.12.14, 東京国際フォーラム(東京都・千代田区)

(4) S. Endo, G. Fujii, M. Ukibe, H. Takagi, M. Ohkubo, M. Naruse, H. Myoren, C. Otani, and T. Taino, "Development of STJ for neutron detector on Si-LBO hybrid substrate by surface-activated room-temperature bonding," 29th International Symposium on Superconductivity (ISS2016), 2016.12.14, 東京国際フォーラム(東京都・千代田区)

(5) T. Taino, M. Sone, S. Endo, N. Igarashi, M. Naruse, H. Myoren, C. Otani, "Development of Superconducting Tunnel Junction Pixel Detector By Utilizing Substrate Absorption," 3rd International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD2016), 2016.11.15, 産総研(茨城県・つくば市)

(6) 畠山聡起, 森田浩平, 根本俊介, 菊地克弥, 仲川博, 青柳昌宏, 成瀬雅人, 明連広昭, 田井野徹, "3次元実装構造を有するSTJのフリップチップ接続に関する研究," 第77回応用物理学学術講演会, 2016.9.14, 新潟トキメッセ(新潟県・新潟市)

(7) 森田浩平, 畠山聡起, 成瀬雅人, 明連

広昭, 青柳昌宏, 田井野徹, "3次元実装構造を有する STJ のための超伝導 TSV 作製方法," 第 77 回応用物理学学術講演会, 2016.9.14, 新潟トキメッセ(新潟県・新潟市)

(8) 曾根雅彦, 成瀬雅人, 明連広昭, 佐々木芳彰, 大谷知行, 田井野徹, "位置分解能を有する基板吸収型 STJ 検出器を用いた THz 波検出," 第 77 回応用物理学学術講演会, 2016.9.14, 新潟トキメッセ(新潟県・新潟市)

(9) 遠藤壮, 藤井剛, 浮辺雅宏, 高木秀樹, 大久保雅隆, 成瀬雅人, 明連広昭, 大谷知行, 田井野徹, "表面活性化常温接合による Si-LBO ハイブリッド基板構造を有する中性子検出器用 STJ の作製," 第 77 回応用物理学学術講演会, 2016.9.14, 新潟トキメッセ(新潟県・新潟市)

(10) 酒井功樹, 山口兼司, 仲川博, 青柳昌宏, 成瀬雅人, 明連広昭, 田井野徹, "磁場印加用コイル埋め込み型 STJ の作製と評価," 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会, 2016.8.8, 大宮ソニックシティ(埼玉県・さいたま市)

(11) 曾根雅彦, 五十嵐直樹, 成瀬雅人, 明連広昭, 佐々木芳彰, 大谷知行, 田井野徹, "位置分解能を有する基板吸収型 STJ による THz 波検出," 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会, 2016.8.8, 大宮ソニックシティ(埼玉県・さいたま市)

(12) K. Yamaguchi, H. Nakagawa, M. Aoyagi, M. Naruse, H. Myoren, T. Taino, "Fabrication of Superconducting Tunnel Junctions with Embedded Coil for Applying Magnetic Field," 28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015), 2015.11.18, タワーホール船堀(東京都・江戸川区)

(13) 山口兼司, 成瀬雅人, 明連広昭, 仲川博, 青柳昌宏, 田井野徹, "磁場印加用コイル埋め込み型 STJ の作製に関する研究," 第 76 回応用物理学学術講演会, 2015.9.14, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

(14) K. Yamaguchi, H. Nakagawa, M. Aoyagi, M. Naruse, H. Myoren, T. Taino, "Fabrication of Superconducting Tunnel Junctions with Embedded Coil for Applying Magnetic Field," 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2015), 2015.7.9, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田井野 徹 (TAINO, Tohru)

埼玉大学・情報メディア基盤センター・
准教授

研究者番号：40359592