

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18761

研究課題名（和文）ハフニウム超伝導体を用いた究極の感度を持つ超伝導検出器への挑戦

研究課題名（英文）Challenge to the superconducting detector with ultimate sensitivity using hafnium superconductor

研究代表者

飯田 崇史（Iida, Takashi）

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号：40722905

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的はハフニウム超伝導体(Hf)を用いて世界最高感度の超伝導トンネル接合素子(STJ)を開発し、宇宙・素粒子物理実験における実用化の第一歩を踏み出すことである。200ミクロン角のHf-STJを作成し、韓国・基礎科学研究所（IBS）に設置された断熱消磁冷凍機を用いてHf-STJを30mKに冷やした実験を行った。X線源からの事象を世界で初めてHf-STJの信号として観測することに成功した。得られたデータに対して、信号の基準波形をフィットして入射粒子のエネルギーを決定する解析手法を確立した。その結果、Fe-55のX線（5.9 keV）ピークを用いて6.7%のエネルギー分解能を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導検出器は最先端の一つであり、X線天文、暗黒物質探索等の基礎物理実験や、X線分析、質量分析、量子暗号などといった幅広い分野で応用されている。本研究では、超伝導体にハフニウム（Hf）を用いて、現行で最高感度のアルミニウム（Al）超伝導検出器より感度が高いHf-STJ検出器を世界で初めて開発し、その性能を評価することを目的としている。作成した200μm角のHf-STJを断熱消磁冷凍機で30mKまで冷却し、その性能を評価した。5.9KeVのX線を照射することにより、Hf-STJによる世界初のX線検出を実現し、エネルギー分解能6.7%@5.9keVを達成した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop the world's most sensitive superconducting tunnel junction device (STJ) using hafnium superconductor (Hf), and to take the first step toward its practical application in space and particle physics experiments. 200 micron square Hf-STJ was fabricated and cooled down to 30 mK using an adiabatic demagnetization refrigerator installed at the Institute for Basic Science (IBS), Korea. We succeeded in observing the events from the X-ray source as signals from the Hf-STJ for the first time in the world. For the obtained data, we established an analysis method to determine the incident particle energy by fitting the reference waveform of the signal. As a result, an energy resolution of 6.7% was achieved using the X-ray (5.9 keV) peak of Fe-55.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：超伝導トンネル接合素子 ハフニウム

1. 研究開始当初の背景

実験物理学の世界において、検出器は正に日進月歩で進化している。その中でも超伝導検出器は最先端の一つである。超伝導検出器にも様々なものがあり、本研究で開発する超伝導トンネル接合素子(STJ)以外にも超伝導転移端(TES)、力学的インダクタンス検出器(KID)など様々な種類があり、宇宙背景ニュートリノ探索実験や暗黒物質探索、宇宙背景輻射、X線天文学など物理実験の分野でも広く応用されている。

STJは超伝導検出器の一種で図1に示すように2つの超伝導体で薄い絶縁体を挟み込んだ構造をしている。縦横10~200 μ m程度、厚み500nm程度の大きさの検出器で、薄膜を積層・加工して作成する。光子が入射すると、クーパー対を破壊し、光子エネルギーに対応した数の準粒子が作られ、トンネル効果でもう一方の超伝導体へ移動して信号として観測される。このときの信号電荷を一つ励起するのに必要なエネルギー(Δ)が半導体検出器と比べて3~5桁小さいため、信号電荷量が大きくなり分解能が良く低いエネルギーにも感度を持つ検出器が可能となる。

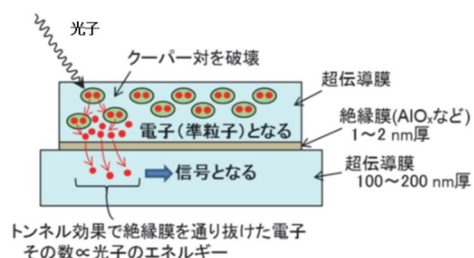


図1：STJ 検出器の動作原理

2. 研究の目的

本研究では、超伝導体にハフニウム(Hf)を用いて、現行で最高感度のアルミニウム(Al)超伝導検出器より感度が高いHf-STJ 検出器を世界で初めて開発し、その性能を評価することを目的とする。Hfの Δ はAlに比べて1/8と小さいため、現状の最高感度よりさらに8倍の高感度化が可能である。またSTJは他の超伝導検出器に比べ応答が速く、高計数率が可能で、かつ低周波ノイズに強い特性を持つ。Hf-STJの高感度・高速応答特性を活かして宇宙背景ニュートリノや暗黒物質探索などの将来の物理学実験への応用を目指す。

表：各種超伝導体の Δ と超電導転移温度 T_c の値まとめ。

超伝導体	Δ [meV]	T_c [K]
ニオブ (Nb)	1.55	9.2
タンタル (Ta)	0.7	4.48
アルミニウム (Al)	0.172	1.14
ハフニウム (Hf)	0.021	0.165

3. 研究の方法

(1) Hf-STJ検出器作成

大学共同利用法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)の所有するクラス1万クリーンルームのプロセス装置群を用いて行った。同プロセス装置群は理化学研究所にてニオブ系STJの高度化に用いられたものが、KEKに移設された装置群である。DCマグネトロンスパッタ装置内にハフニウムの金属ターゲット板を設置し、スパッタリング法によって超伝導のHf層を作成し、ハフニウム薄膜の表面を熱酸化(圧力30 Torrの酸素雰囲気中で1時間酸化)することで厚み1~2 nmの酸化ハフニウム絶縁層を形成した(図2)。STJに用いる絶縁層には、十分薄かつ均一で欠陥がないことが求められる。成膜条件(プラズマ生成電力量、プラズマ化させるガス種、ガスの圧力および流量、基板とスパッタ材料との距離、スパッタ時の温度 etc.)を変えながらハフニウム薄膜を作成し、原子間力顕微鏡(AFM)を用いて表面状態の観察を行った。その結果、最も平坦なものはRMS=0.96 nmの平坦度を達成した。

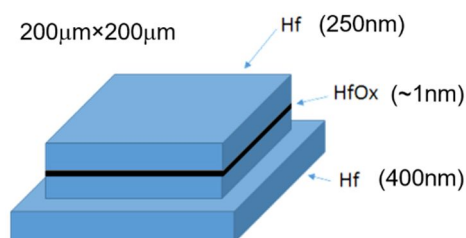


図2：作成したHf-STJ素子の概念図

(2) Hf-STJ検出器の評価

作成したサンプルを評価するためには温度100 mK程度の極低温環境が必要であるが、韓国太田のIBS-CUPの断熱消磁冷凍機(ADR)を利用して数十 mKの極低温下での特性評価を行った。作成したHf-STJのチップは本研究予算で作成した銅製の治具に取り付けられ、⁵⁵Feの放射線源をチップ直上に配置し、コリメータを用いて試験したいHf-STJに冷凍機内で照射を行った(図3)。また、後述の超伝導コイルによって磁場を印加し、ジョセフソン電流を抑制した。

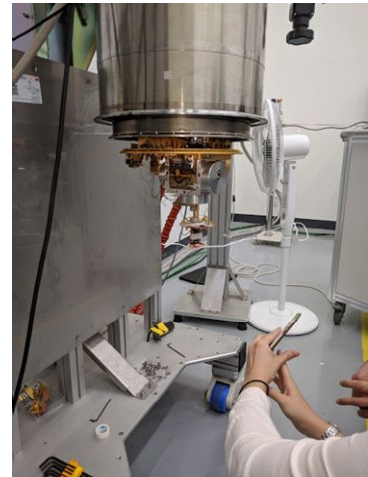
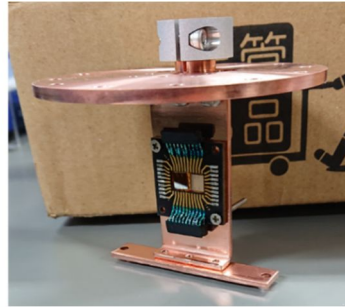
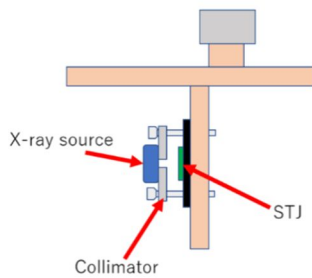


図3: (左)Hf-STJによるX線検出実験の冷凍機内セットアップ概念図。(中央)その実際の写真(線源とコリメータは無し)(右)冷凍機内への取り付けの様子。

Hf-STJからの信号読みだしの回路概念図を図4に示す。Hf-STJに外部から電流源を接続し、電流-電圧特性評価実験ではサイン波の電流を入力、X線検出実験では定電流モードで駆動した。電圧の値は信号線を冷凍機外へ引き出した後、作動増幅回路を通して読み出した。測定したデータから、電流-電圧特性およびX線に対するエネルギー分解能の評価を行った。

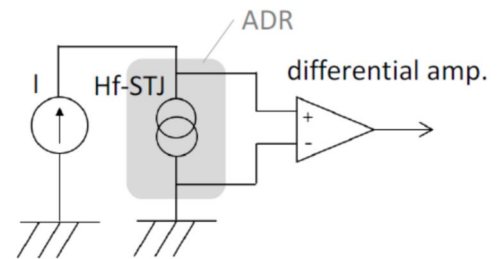


図4: Hf-STJ読み出し回路

4. 研究成果

(1) 永久電流スイッチの開発

STJ素子を安定的に精度良く動作させるためには、ジョセフソン電流を抑制するための磁場を、接合面にたいして平行に印加してやる必要がある。これを冷凍機外部から印加しようとする、アライメントの精度や冷凍機振動による不定性が生まれる。我々は、冷凍機内部に超伝導線を用いた超伝導コイルを設置し、熱的永久電流スイッチを利用して長時間安定な磁場を供給するシステムを導入した。本研究予算によって、超伝導体であるNi/Tiのワイヤー(100 μm φ)を40 mm φ×50 mm Lの無酸素銅製ボビンに1000巻きした超伝導コイルを作成した。ボビン-ワイヤー間はカプトンテープ等で絶縁しており、その抵抗値は2Mオーム以上であった。このコイルは100 mA通電時に、15 Gauss以上の磁場が中心部で発生することをシミュレーションで確認した。

作成した永久電流コイルを含むシステムを韓国でのHf-STJ評価試験の際に使用し、コイルが期待通りに動作することを確認、これを用いて後述の電流電圧特性評価や、X線信号検出の実験を行った。

(2) 電流-電圧特性の評価

断熱消磁冷凍機で約 30mK の極低温に冷却、外部電源から電流をサイン波で入力し、Hf-STJ の電流-電圧(I-V)特性を評価した。図 5 にその結果得られた I-V カーブを示す。左が超電導コイルを Off にした磁場なしでの測定、右が超電導コイルを On にした磁場ありのときの I-V カーブである。左の図で $V=0$ 付近にある構造はジョセフソン電流が見えているものと思われる。これはクーパー対のトンネル効果によるもので、接合面に平行に磁場をかけることで抑制できることが知られている。実際にコイルを On にして磁場をかけて取った右のデータでは、ジョセフソン電流と思しき構造が消えていることが確認できる。このことから、我々が作成した Hf-STJ 素子が SIS 構造を持った超電導トンネル接合素子としての特徴を備えていることが確認できた。

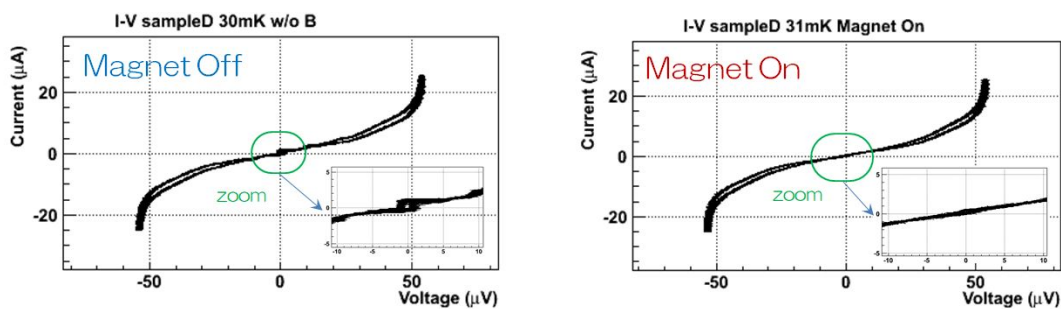


図 5： 作成した 200mm 角 Hf-STJ の I-V カーブ。左が磁場なし、右が磁場ありの測定結果。

(3) X線信号の検出と素子の評価

実験のセットアップは実験方法の章で示した通りで、Hf-STJ に対し $1\mu\text{A}$ の定電流を印加、トリガーは $-1.1\mu\text{V}$ としてオシロスコプの AC 結合で波形を取得した。得られたデータは 2 時間の測定で 1390 事象であった。Hf-STJ に ^{55}Fe の X 線を照射して得られた波形を図 6 に示す (右と左は、同じデータサンプル内の異なる事象)。黒い線がデータの波形、青い線は全体の平均波形を各事象に対してカイ二乗検定を用いてフィットしたものである。

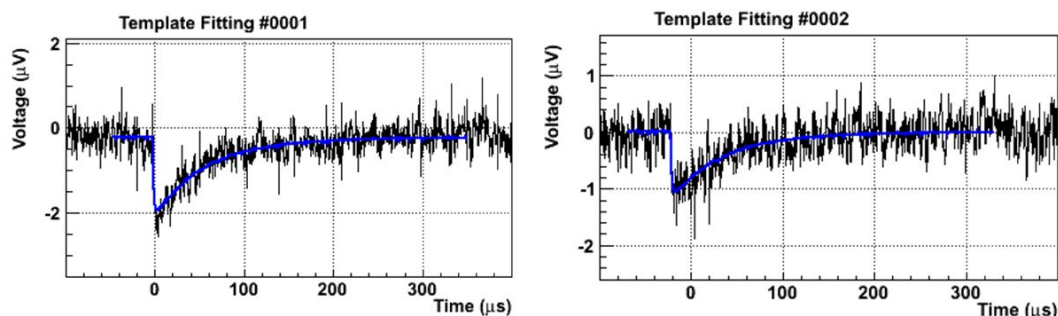


図 6： Hf-STJ の X 線照射データの波形。左と右は同じデータセット内の異なる事象。黒い線がデータの波形で、青い線はそこに平均波形をフィットしたものである。

各事象のフィット結果から各事象の振幅を求めた。これは Hf-STJ 内で X 線が落としたエネルギーの総量に比例する。この 1 次元分布を図 7 に示す。横軸は ^{55}Fe の X 線を用いて校正したエネルギーへと変換している。 ^{55}Fe は半減期 2.7 年で、K 殻の軌道電子

が、原子核に捕獲され ^{55}Mn へと遷移する。抜けた K 軌道に上位の電子軌道から電子が落ち込み、特性 X 線が放出される。落ちてくる元の軌道によって異なるエネルギーの K_{α} (5.9keV), K_{β} (6.5keV) と呼ばれる X 線が放出される。それぞれのエネルギーと放出割合は既知であるため、それを固定値として二つのガウス関数で振幅の分布をフィットした結果が図 7 の黒線 (青は K_{α} 、赤が K_{β}) である。このフィット結果から、分布の幅、すなわちエネルギー分解能は、6.7% @ 5.9 keV であることが分かった。これは信号を照射していないペDESTALの分布幅とほぼ同レベルとなっており、ノイズが支配的であることが分かる。今後、信号読み出し系を改良することにより、分解能は改善する可能性がある。

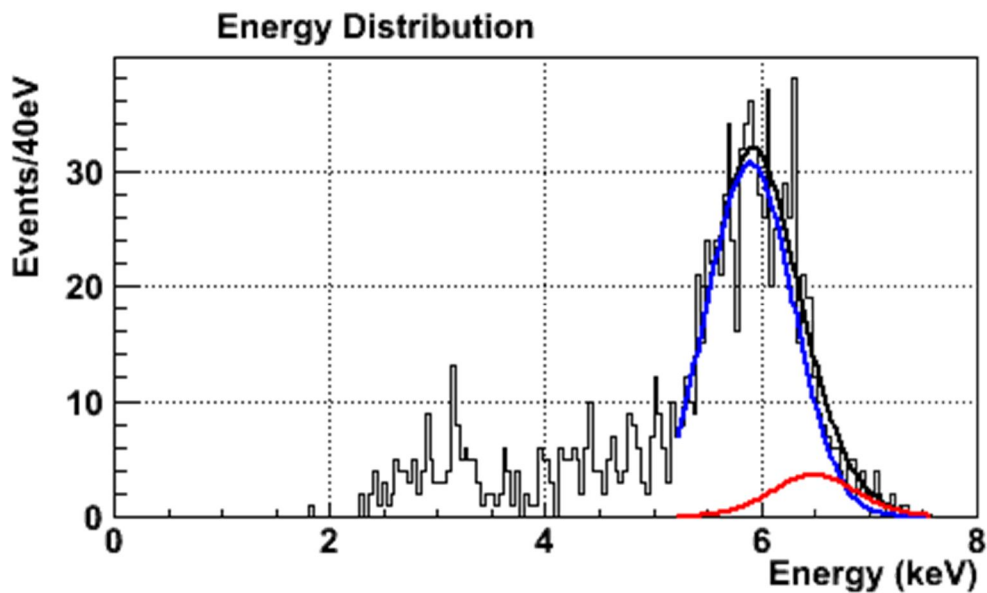


図 7： Hf-STJ の X 線照射データのエネルギースペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Kim, Y. Takeuchi, T. Iida et al.	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of Superconducting Tunnel Junction Far-Infrared Photon Detector for Cosmic Background Neutrino Decay Search - COBAND experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS(ICHEP2018)	6. 最初と最後の頁 427
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.340.0427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 C. Asano for the COBAND collaboration
2. 発表標題 R&D of Hf-STJ for COBAND experiment
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-18) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Iida, Ken'ichi Takemasa for the COBAND collaboration
2. 発表標題 Development of Hafnium STJ for cosmic neutrino background search
3. 学会等名 The 15th Vienna Conference on Instrumentation(VCI2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋光太郎, 笠島誠嘉, 辻悠汰, 寺田侑史
2. 発表標題 COBAND実験に向けたSTJ遠赤外領域単一光子分光検出器の開発
3. 学会等名 第4回TIA光・量子計測シンポジウム,
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武政 健一
2. 発表標題 遠赤外ー光子分光のためのHf-STJ開発
3. 学会等名 第1回TChOU ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武政健一
2. 発表標題 COBAND実験のためのHf-STJの研究開発IV
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅野千紗
2. 発表標題 COBAND実験のためのHf-STJの研究開発V
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	武政 健一 (Takemasa Ken'ichi)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	吉田 拓生 (Yoshida Takuo)		
研究協力者	石徹白 晃治 (Ishidoshiro Koji)		
研究協力者	木内 健司 (Kiuchi Kenji)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関