

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01927

研究課題名(和文) 超伝導体素子による極低閾値検出器開発とsub-GeV領域暗黒物質探索への展開

研究課題名(英文) Development of an ultra-low energy threshold detector based on superconducting devices and expansion towards dark matter search in the sub-GeV region

研究代表者

武内 勇司 (Takeuchi, Yuji)

筑波大学・数理解析系・准教授

研究者番号：00375403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、超伝導体素子STJとSOI回路による極低温信号読み出しを組み合わせることで、エネルギー感度100meVの閾値検出器の開発・実用化、および暗黒物質探索におけるsub-GeV領域の新規開拓を目指した。成果として可視光～近赤外域の単一光子応答に対応するSOI極低温増幅回路を試作し、室温および極低温(3K)で評価を行い、増幅器としての性能を極低温で確かめた。STJと組み合わせた最終的な応答信号増幅試験は、極低温冷凍機の不調により行えていないが、冷凍機を調整し、中赤外域単一光子応答試験を予定している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体に比べ、超伝導体素子は桁違いエネルギー分解能を実現し得る潜在性を持つが、極低温冷凍機内での微弱信号読み出しの難しさ、大面積・大容量化の不利な点から、物理計測への応用は限定的であるのが現状であるが、それに対し、超伝導体素子と極低温増幅器を組み合わせることで、冷凍機内での微弱信号の増幅読み出しにより、超伝導体素子の利便性向上、及び潜在能力を最大限に引き出し、極低エネルギー感度をもつ検出器の可能性を広げることができた。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop and make practical use of an ultra-low threshold detector with an energy sensitivity of 100 meV by combining superconducting tunnel junction (STJ) devices and SOI circuits for signal readout at cryogenic temperatures, and to pioneer new sub-GeV regions in dark matter search. As a result of the research, an SOI cryogenic amplifier circuit capable of responding to single photons in the visible to near-infrared range was prototyped and evaluated at room temperature and cryogenic temperatures (3K), confirming its performance as an amplifier under cryogenic conditions. The final evaluation test for signal amplification response combined with the STJ has not been conducted due to a malfunction of the cryogenic refrigerator, but adjustments are being made to the refrigerator, and single-photon response tests in the mid-infrared range are planned.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：SOI極低温増幅器 超伝導トンネル接合素子 Sub-GeV暗黒物質探索

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超伝導体を利用した素子は、半導体検出器に比べて文字通り桁違いに良いエネルギー分解能の潜在性を持つ。超伝導体素子には、超伝導遷移端センサー(TES)、超伝導トンネル接合素子(STJ)、力学的インダクタンス検出器(KID)などがあり、ミリ～サブミリ波天文観測・宇宙背景放射・X線天文観測・暗黒物質探索・ニュートリノ質量測定といった観測・実験に実際に使用された例がある。しかしながら超伝導体素子には転移温度以下の環境、つまり極低温冷凍機内部での動作が必須となる。また超伝導体素子から得られる信号は極めて微弱であり増幅を必要とし、ここで分解能が制限される。つまり実状の超伝導体素子は、その潜在能力を十分に発揮させる読み出し系構築が困難である、あるいは構築に多大な労力を必要とする。これが優れた潜在性を持ちながらも超伝導体素子が半導体検出器ほど普及していない要因の一つと言える。Sub-eV の極低エネルギー閾値を持つ検出器は、例えば Sub-GeV 領域の質量を持つ暗黒物質探索などへの応用が期待できる。

2. 研究の目的

本課題の目的は、要約すると、

- 超伝導体素子 STJ + SOI 極低温増幅読み出し回路の組み合わせによる 100meV 領域の極低エネルギー閾値を持つ検出器の実用化
 - この検出器の実証としての質量 $0.1\text{GeV}/c^2$ 領域の暗黒物質直接探索
- である。本課題は未測定領域での暗黒物質探索であり独自性は高い。そしてその先には、種々の物理測定における手付かずの広大な低閾値フロンティアがあり創造性も高い。超伝導体素子 + 極低温増幅器の一体化されたシステムとしての利便性は、超伝導体素子の計測器としての普及を牽引する。また SOI による極低温回路技術は、室温での半導体回路設計技術の膨大な資産をほぼそのまま極低温技術として活用できる莫大な波及効果を秘めている。

3. 研究の方法

超伝導体素子としては、ニオブを用いた超伝導トンネル接合素子(Nb/Al-STJ)を用いる。これは産総研の超伝導デバイス開発施設である CRAVITY での十分な品質の素子製造が確立しており、すでに 100meV 閾値を達成可能な潜在性を有している。STJ 素子に関しての研究項目としては、形状や厚みの最適化となる。ただし、100meV 閾値を達成するには冷凍機外の室温増幅器による信号読み出しに起因するノイズが大きな課題である。したがって本課題において、中心となる研究項目は SOI 回路技術による極低温増幅器の開発となる。

目標となる 100meV のエネルギーに対する Nb/Al-STJ からの出力電荷は、 0.15fC と期待される。また、波長 $10\mu\text{m}$ の単一光子エネルギーがこれに相当する。したがって SOI 極低温増幅器開発には、波長 $10\mu\text{m}$ の中赤外域レーザーを STJ へ入射し、単一光子信号を用い、増幅器の設計・試作・評価を行う。

4. 研究成果

本課題では、ニオブ(超伝導ギャップエネルギー $=1.55\text{meV}$, $T_c=9.23\text{K}$)を超伝導体、アルミニウム($\Delta=0.172\text{meV}$, $T_c=1.20\text{K}$)を準粒子トラップ層として用いた超伝導トンネル接合素子 Nb/Al-STJ(Superconducting Tunnel Junction)をセンサー、かつ暗黒物質粒子の標的として用いる。そのため、上部電極に最大 1000nm のニオブ層を持つ STJ サンプルを試作する。1000 nm 程度の膜厚を形成する際、準粒子トラップ層・絶縁層(Al/AlO_x/Al)や下部 Nb 層へのサイドエッチングにより上部・下部電極間の短絡が懸念されたが、SEM による断面観察により、1000nm のニオブ層を持つ STJ の製作成功が確認された(図 1)。この素子は、70nm 厚の Al 準粒子トラップ層を持ち、実効的な Δ は 0.6meV となった。

Nb/Al-STJ の運転には、 400mK 以下の温度が必要であり、He3 ソープション冷凍機が使用される。また STJ の運転には、100 ガウス程度の磁場を STJ の絶縁層に平行な磁場を印加して、ジョセフソン電流を抑制する必要がある。超伝導ソレノイドコイルを製作し、冷凍機内部への設置を行った。また、STJ のエネルギー校正用として、可視～近赤外域の単一光子を使用するため、冷凍機内部へレーザーパルス光を入射するための石英ファイバーの導入も行っている。

STJ の信号読み出しには、上部・下部電極間へ Δ/e 程度の定電圧を印加する必要がある。すなわち、冷凍機内の極低温ステージ上の STJ からの信号の読み出しは(a) 0.6mV 程度という微小で正確な定バイアス電圧が、長い冷凍機配線の先に接続された素子を動作させるために必要、(b)検出目標となる 100meV に対する期待される出力電荷は、約 $1000e(0.15\text{fC})$ 、(c)STJ からの信号の時定数は数 μ 秒と比較的速く、対して STJ 自身の静電容量は、数十 pF～数 nF(素子バイアス用

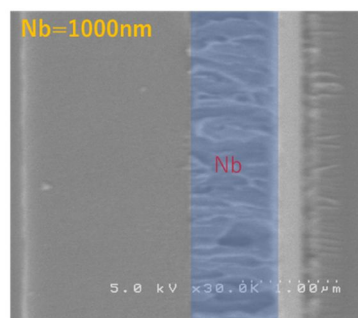


図 1. 1000nm 厚上部電極 STJ の断面 SEM 像

配線の寄生容量も 1nF 程度)と半導体素子と比べ大きい、という理由により、単純ではなく、むしろチャレンジングと言える。そこで、本研究では STJ 素子のすぐ近くで信号を増幅可能な読出系として FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスによる極低温増幅器の開発を行った。研究代表者らのこれまで

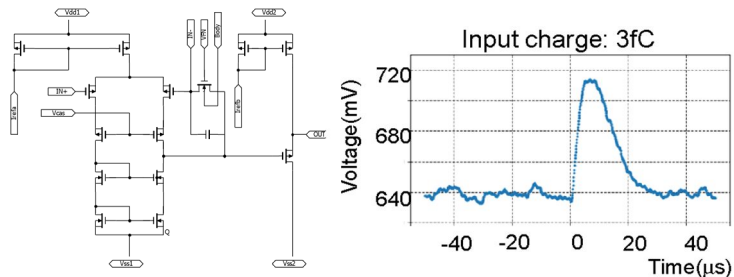


図 2. 60 fF の容量性負帰還の SOI 電荷積分型増幅器と 3 fC のテスト電荷入力に対する出力 (@3K)

での研究成果として、FD-SOI プロセスによる MOSFET を用いたソース接地増幅回路の比較的簡単な増幅器の試作、及び極低温で動作させた STJ のパルス光応答信号を同じ極低温ステージ上での増幅読出や、容量性負帰還をもつ差動増幅回路によって実現された低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器を試作し、極低温での動作及び STJ 信号の電荷読出し試験等の実績がある。これらによって得られた知見のもと、可視光～近赤外域の単一光子を十分に検出可能な性能をもつ増幅回路を設計し、SOI ウェハの MPW ランに参加して製作した。本課題において、この電荷積分型増幅器の負帰還容量を既存の 300fF から 60fF に変更した高利得増幅回路の動作を確認した(図 2)。しかし、差動増幅部の利得帯域幅積 (GBW 積) が十分ではなく、入力インピーダンスが想定よりも一桁大きいということが実測から判明し、STJ からの電荷信号が増幅器にほとんど伝達されていないことが明らかになった。この問題に対して可変抵抗の代わりに帰還回路に導入している MOSFET により、積分回路の CR 時定数を元々の設計の 15 μs から 100 μs に変更することで対応可能であり、ノイズに対して 0.3fC 程度までの STJ からの信号は検出可能であることが実証された。

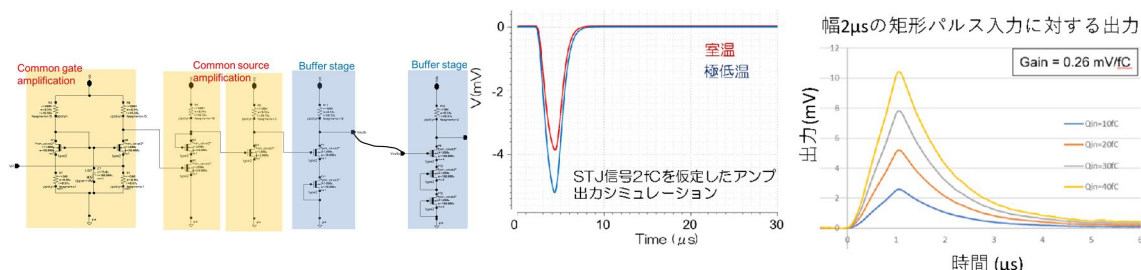


図 3. STJ 信号の読み出しに用いる電流電圧変換増幅器 (左)。SOI-MOSFET の極低温での特性変動を考慮した回路シミュレーション結果(中)。室温で実測された 2μs の矩形パルス入力に対する出力(右)。

しかしながら暗電流ノイズを低減するためには 積分時定数は短い方が良い。このため (i) 0.5k のシャント抵抗を入力としゲート接地段を初段に持つ 3 段増幅の電流電圧変換増幅器、(ii) カスコード型ミラー回路の差動増幅器をカスケード接続し 1MHz 帯域までの高利得を確保したオペアンプの容量性負帰還による電荷積分型増幅器の二種類を新たに設計・試作した。これらの回路では、回路内の MOSFET のゲート端子が外部に接続する箇所全てに ESD 保護回路を搭載させ、静電気による故障の可能性が低減することを期待した。また出力部にこれまでより電流駆動能力の高いバッファ回路を導入し、0.5nF 程度ある冷凍機配線の寄生容量に対して 1MHz 帯域までドライブ可能とした。(i) の電流電圧変換増幅器の回路、及び回路シミュレーション結果を図 3(左・中)に示す。このシミュレーションにおいて、入力信号として 2fC (1eV 相当のエネルギーに対する応答)、増幅器入力側の寄生容量 1nF を仮定した。また出力側には 1M の抵抗と 0.5nF の出力負荷を仮定している。極低温下において、これまでの知見から MOSFET の閾値が 0.2V 上昇、飽和電流が 1.5 倍、ポリシリコン抵抗が 8% 上昇するというモデルを導入したシミュレーションを行い、極低温下でも動作するという結果を得た。(i) の回路の室温での実測による評価を図 3(右)に示す。入力信号として 2μs の矩形パルスを使用し、最終段のバッファ段は、使用していない条件でのテストであるが、オシロスコープ入力負荷 (1M, 50pF) に対し、良好な周波数帯域を示している。但し、信号利得はシミュレーションで期待されたものに対して、約 1/10 となっており、3 段目の増幅段の MOSFET 動作電圧に問題があり、設計・シミュレーションの見直しが必要であることが判明した。この問題を修正した回路を再び SOI MPW ランで製作した。

以上のように 0.3fC 程度までの STJ 信号からの電荷出力を検出可能な SOI 極低温増幅回路の準備はできているが、極低温冷凍機不調で調整中のため、実際に STJ と組み合わせた STJ 応答信号増幅試験、並びに Sub-GeV 暗黒物質粒子探索はまだ行っていない。極低温冷凍機の復調次第、これらの測定を行う予定である。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Yuji Takeuchi, 他31名(COBAND collaboration)	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of FD-SOI cryogenic amplifier for application to STJ readout in COBAND project	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications (VLSI-TSA)	6. 最初と最後の頁 115-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/VLSI-TSA51926.2021.9440090	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 武内勇司
2. 発表標題 Development of FD-SOI cryogenic amplifier for application to STJ readout in COBAND project
3. 学会等名 The 2021 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications (VLSI-TSA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武内勇司
2. 発表標題 COBAND実験のためのSTJ遠赤外単一光子検出器開発現状
3. 学会等名 筑波大学宇宙史研究センター2021年度第2回構成員会議・成果報告&交流会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 守屋佑希久
2. 発表標題 COBAND実験のためのSOI-STJの研究開発 X111
3. 学会等名 日本物理学会第77回 年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 守屋佑希久
2. 発表標題 COBAND実験のための極低温増幅器の研究開発
3. 学会等名 筑波大学宇宙研究センター2021年度ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武内勇司
2. 発表標題 COBANDプロジェクトにおけるSTJ信号読出のための極低温SOI増幅器の開発
3. 学会等名 筑波大学宇宙史研究センター2020年度第2回構成員会議・成果報告&交流会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中原瑛衣子
2. 発表標題 COBAND実験のためのSOI-STJの研究開発 XII
3. 学会等名 日本物理学会第76回 年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中原瑛衣子
2. 発表標題 COBAND実験に向けた極低温高利得電荷積分型前置増幅器の性能評価
3. 学会等名 筑波大学宇宙研究センター2020年度ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 守屋佑希久
2. 発表標題 ニュートリノ崩壊探索のための超伝導素子読み出し用極低温増幅器の開発
3. 学会等名 SATテクノロジー・ショーケース2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 守屋佑希久
2. 発表標題 ニュートリノ崩壊探索のための超伝導素子読み出し極低温増幅器の開発
3. 学会等名 SATテクノロジー・ショーケース2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守屋佑希久
2. 発表標題 COBAND実験に向けた高利得広帯域な極低温電荷・電流増幅器の性能評価
3. 学会等名 筑波大学宇宙研究センター2022年度ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守屋佑希久
2. 発表標題 COBAND実験のためのSOI-STJの研究開発XV
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 守屋佑希久
2. 発表標題 COBAND実験のための極低温増幅器の研究開発XIV
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王生尚志
2. 発表標題 COBAND実験に向けた高利得・広帯域な極低温電荷積分型増幅器の性能評価
3. 学会等名 筑波大学宇宙研究センター2023年度ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 王生尚志
2. 発表標題 COBAND実験のためのSOI-STJの研究開発XVI
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024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
研究分担者	藤井 剛 (Fujii Go) (30709598)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	

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
---------	---------