

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月17日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13797

研究課題名(和文)半導体SOI回路と超伝導検出器STJの融合による革新的高感度検出器の開発

研究課題名(英文) Development of an innovative sensor with high-sensitivity by coalescence of semi-conductor SOI circuit and superconductor STJ device

研究代表者

武内 勇司 (Takeuchi, Yuji)

筑波大学・数理工学系・准教授

研究者番号：00375403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導素子による検出器は半導体検出器の感度を遥かに超える可能性を持ちながらも極低温での動作が必要・出力信号が微弱という取り扱いの難しさのため、そのポテンシャルを活かすことができず、また一般に普及しているとは言い難い。本研究は超伝導トンネル接合素子STJをFD-SOIによる半導体技術を用いた極低温での動作が可能な信号増幅器と融合させ、冷凍機内部の超伝導素子の至近での微弱信号増幅による使い勝手の格段の向上・革新的な高感度の検出器の創成を目指し、可視～近赤外域単一光子に対するSTJ応答信号を十分な信号雑音比で読出し可能な極低温増幅器の実用化に目途をつけることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、超伝導トンネル接合素子からの微弱信号を冷凍機内部で増幅し冷凍機外部へ伝送することが可能な極低温増幅器の実証に成功した。これにより超伝導素子を用いた検出器の感度や超伝導素子検出器の利便性の劇的向上が期待される。これまでの物理実験や測定において半導体による検出器を用いられた場面で、より高感度な超伝導体検出器の利用が促進されることが期待される。更に本課題で開発された極低温増幅器は既存の半導体素子を用いた回路設計知識・技術がほぼそのまま極低温で利用可能であることを示しており、産業面での応用の可能性も高いと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The superconductor sensor devices are expected to have capability to achieve much higher sensitivity than semi-conductor devices. However, due to the difficulties in operation at cryogenic temperatures and getting rather faint signal outputs inside refrigerators, it is not likely that we derive the potential of the superconductor sensors to the maximum, nor they are widely used like semi-conductor sensors. Therefore, we aimed at establishment of an innovative sensor with high-sensitivity as well as excellent usability by coalescence of superconductive tunnel junction (STJ) sensor with semi-conductor FD-SOI amplifier which can deploy close the sensor inside the refrigerator, and we almost reached the stage of practical application of the cryogenic amplifier which can read the STJ signal response to a single photon in a range from visible to near-infrared wavelength with sufficiently large signal to noise ratio in this study.

研究分野：素粒子物理学(実験)

キーワード：極低温増幅器 超伝導トンネル接合素子 STJ SOI

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

半導体などの材質を用いた従来の検出器に比べて、信号キャリア生成のためのエネルギーが桁違いに小さい超伝導体素子を用いた検出器は非常に優れたエネルギー分解能を持つことが期待されている。超伝導体を利用したセンサーとしては、TES(Transition Edge Sensor, 超伝導遷移端センサー)、STJ(Superconducting Tunnel Junction, 超伝導トンネル接合素子)、KID(Kinetic Inductance Detector, 力学的インダクタンス検出器)などが研究されており、ミリ波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・実験に用いられた例がある。しかしながら超伝導体素子を使用する際の極低温冷凍機の必要性、冷凍機内部からの微弱信号読出しの難しさ、検出有効領域の大面积・大容量化の点で不利など、超伝導体素子の実際の物理計測への応用は、先に述べた天文分野におけるミリ波測定や物質の構造解析に用いる蛍光 XAFS 測定など限定された分野に留まっている。本研究では FD-SOI(Fully-Depleted Silicon-On-Insulator)プロセスという SOI ウェハ上で作られた MOSFET 及びその回路が 4 K の極低温で動作したという先行研究を受け、SOI 極低温増幅器を開発し、超伝導体素子の一種である超伝導トンネル接合素子 STJ と組み合わせ、STJ 素子からの微弱信号の冷凍機内部での増幅読出しに用いることにより、超伝導体素子の持つポテンシャルを最大限に引き出す革新的感度向上と利便性向上を同時に実現し、0.1eV ~ 数 eV のエネルギーに対する感度を有する検出器の実用化を考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、超伝導体素子 STJ と SOI 極低温増幅読出し回路の組み合わせによる 0.1eV 領域のエネルギーに対して感度を有する革新的な検出器の創成であり、このエネルギー領域で素粒子・原子核物理学実験へ超伝導体素子の実用的応用への道を拓くことである。本エネルギー領域は、単一光子ならば近赤外 ~ 中赤外領域に対応し、このエネルギー領域の単一光子分光を可能にする。また、例えば 0.1eV のエネルギーに対する信号分別閾値は、二オプを用いた超伝導体素子において 0.1GeV/c<sup>2</sup> の暗黒物質粒子による二オプ原子核の反跳エネルギーに対する感度に相当し、その探索を可能にする。この暗黒物質探索領域は今までに測定されたことが無い領域であり、このように様々な物理測定における手付かずの低エネルギー閾値フロンティア開拓の可能性を有する。更にシステムとして一体化した超伝導体素子 STJ + SOI 極低温増幅器は利便性に富んだものとなり、超伝導体素子の素粒子原子核実験分野への普及のトリガーとなることが期待される。SOI による極低温回路技術は、半導体の長い歴史のなかで膨大に蓄積された室温での回路設計ノウハウがほぼそのまま極低温でも有効であるという無尽蔵の可能性を秘めている。

### 3. 研究の方法

使用する超伝導トンネル接合素子 STJ は産業技術総合研究所の超伝導アナログ・デジタルデバイス開発施設 (CRAVITY) において製造された二オプとアルミニウムを用いた Nb/Al-STJ が 100 μm 角サイズで漏れ電流 1nA 以下を達成することが分かった。これは漏れ電流が作るショットノイズを勘案すると目標とする 0.1eV のエネルギー感度を実現するのに十分な性能である。したがって本研究課題の主テーマは、極低温増幅器の開発となる。研究の流れとしては次のようになる。まず、SOI プロセスで作製された MOS-FET の極低温での特性を測定する。ソース接地方式の簡単な構造を持つ増幅の作製し、極低温での動作を評価、及び極低温冷凍機内部での STJ 光応答信号増幅の実証テストを行う。次に STJ 素子の静電容量等を考慮し、STJ 信号増幅に最適化した低インプットインピーダンスの電荷積分型増幅器を設計・製作し、極低温での試験、及び STJ 素子からの信号読出しによる性能評価を行う。

### 4. 研究成果

(1) Fully-depleted Silicon-On-Insulator (FD-SOI) 技術による MOSFET は、超伝導体を用いた検出器である超伝導トンネル接合素子(STJ)が動作する極低温においても動作することが確認されている。チャンネル長、幅が様々な FD-SOI-MOSFET の極低温でのゲート電圧-ドレイン電流特性、ドレイン電圧-ドレイン電流特性を測定し、極低温環境下では閾値電圧の移動、飽和電流の上昇がみられるが、極低温においても電圧制御の電流源デバイスとして動作することが分かった。この FD-SOI-MOSFET を使ったソース接地増幅回路と後段にソースフォロワーによるバッファ回路を備えた構成の実証試験用試作増幅器を作製し、ソープシオンポンプ式 3He 冷凍機によって 300mK 温度下においてテストを行った。室温環境下では、電圧

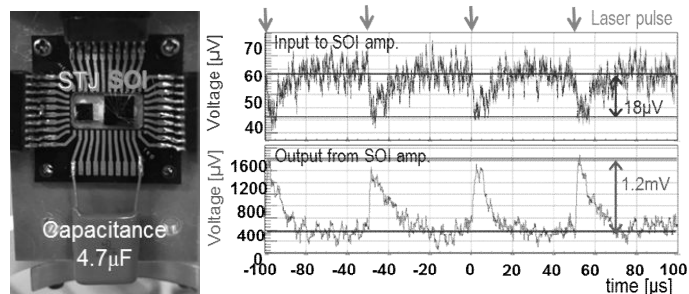


図1 極低温ステージ上の同一チップキャリア上に装着した STJ チップと SOI 増幅器チップ(左)。STJ の光パルス応答信号(SOI 増幅器入力) (右上) および SOI 増幅器出力(右下) 波形。

増幅率約 100 倍，出力周波数帯域は，1M の終端抵抗と約 0.5nF の容量負荷に対して約 0.5MHz という性能であった．極低温環境下においても，極低温下での FET の特性の変化に対しバイアス電圧を調節することによって，室温環境下と同等の性能を再現させることが可能であることが分かった．この増幅器を冷凍機内部の超伝導トンネル接合素子 STJ が設置された最低温ステージ上に設置し，STJ の光パルス照射に対する応答信号を極低温環境で増幅する試験を行い，SOI 極低温増幅器が超伝導素子の信号を増幅可能であることを実証した（図 1）．

(2) 超伝導トンネル接合素子 STJ は，比較的大きな静電容量を持つため，その信号増幅には低入力インピーダンスの電荷積分型増幅器が適している．そこで，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増幅器を FD-SOI プロセスにより設計・製作した．帰還容量により電荷-出力電圧利得を調整可能であるが 0.1eV エネルギー領域に合わせた増幅器において極低温冷凍機の 3 K 環境での動作試験を実施し，室温で期待された増幅率約 4mV/fC に対し極低温でもほぼ変わらない増幅率を確認した（図 2）．また増幅器自体がもつ出力の入力換算雑音電荷の実測値は冷凍機内部での使用環境下において約 0.1fC であり，これは近赤外光の単一光子( $h\nu \sim 1\text{eV}$ )に対する STJ の応答電荷 1fC に対し十分小さく，この近赤外の単一光子に対する STJ の応答信号の増幅器として実用に足ることが確認された．実際の STJ 単一光子応答の増幅試験を現在準備中である．また利得の向上・入力換算雑音の改善にはまだ十分な余地があり，性能向上は十分可能である．

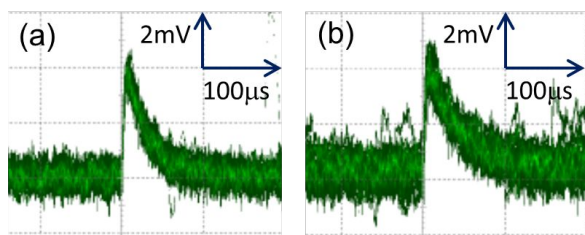


図 2 冷凍機内室温(a)，及び 3K 環境(b)における SOI 電荷積分型増幅器の 0.49fC 電荷入力に対する出力信号波形．

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 2 件)

S. H. Kim, Y. Takeuchi, 他 35 名, "Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors with Cryogenic Preamplifier for COBAND experiment", Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2017), SPPHY 213, 242 - 248 (2018), DOI: 10.1007/978-981-13-1316-5\_45 (査読あり)

R. Wakasa, S. Kim, Y. Takeuchi, T. Iida, K. Takemasa, K. Nagata, C. Asano, A. Kasajima, H. Kanno. 他 COBAND コラボレーション, "COBAND 実験に向けた極低温増幅器の研究開発", 電子情報通信学会技術研究報告. SCE2017-21, 117(223), pp.5-8 (2017), ISSN 0913-5685 (Print edition), 2432-6380 (Online edition) (査読なし)

### 〔学会発表〕(計 30 件)

Y. Takeuchi, 他 34 名, "Development of FD-SOI cryogenic amplifier for application to STJ readout in COBAND experiment", the 13th Workshop on Low Temperature Electronics (WOLTE13) (招待講演), 2018 年

Y. Takeuchi, "COBAND, Cosmic Background Neutrino Decay Search", International Symposium on Neutrino Frontiers (ISoNF2018) (招待講演), 2018 年

Y. Takeuchi, "Superconducting Tunnel Junction Detectors", The 18th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN17) (招待講演), 2017 年

Y. Takeuchi, 他 34 名, "Development of STJ with FD-SOI cryogenic amplifier as a far-infrared single photon detector for COBAND experiment", 17th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-17), 2017 年

武内勇司, "宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験 COBAND にむけた SOI-STJ 開発", 超伝導エレクトロニクス研究会(SCE) (招待講演), 2016 年

### 〔図書〕(計 0 件)

### 〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<https://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/twiki/bin/view/STJ/StjTalksPub>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。