

## COBAND 実験に向けた極低温増幅器の研究開発

若狭 玲那<sup>†</sup> 金 信弘<sup>‡</sup> 武内 勇司<sup>‡</sup> 飯田 崇史<sup>‡</sup>  
武政 健一<sup>‡</sup> 永田 和樹<sup>‡</sup> 浅野 千紗<sup>†</sup> 笠島 誠嘉<sup>\*</sup> 菅野 洋信<sup>\*</sup>  
他 COBAND 実験メンバー

<sup>†</sup> 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>‡</sup> 筑波大学 数理物質系 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>\*</sup> 筑波大学 理工学群 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: <sup>†</sup> wakasa@hep.px.tsukuba.ac.jp

**あらまし** 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索(COBAND)実験に用いる, ニオブとアルミニウムを使用した超伝導トンネル接合素子検出器(Nb/Al-STJ)は実験の要求値を満たしている. しかし冷凍機の配線由来のノイズにより, 未だ遠赤外光の単一光子測定には至っていない. この解決として極低温で動作する SOI 増幅器一体型 STJ 検出器(SOI-STJ)の開発を行っている. ここでは 4 号機(SOI-STJ4)による STJ 光応答信号増幅試験の結果と新たに導入した 5 号機(SOI-STJ5)の性能評価について報告する.

**キーワード** 極低温増幅器, ニュートリノ

## Development of Cold Amplifier for COBAND Experiment

Rena WAKASA<sup>†</sup> Shinhong KIM<sup>‡</sup> Yuji TAKEUCHI<sup>‡</sup> Takashi IIDA<sup>‡</sup>  
Kenichi TAKEMASA<sup>‡</sup> Kazuki NAGATA<sup>‡</sup> Chisa ASANO<sup>†</sup> Akihiro KASAJIMA<sup>\*</sup>  
and Hironobu KANNO<sup>\*</sup>  
for COBAND collaboration

<sup>†</sup> Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba 1-1-1 Ten'nodai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8571 Japan

<sup>‡</sup> Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba 1-1-1 Ten'nodai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8571 Japan

<sup>\*</sup> School of Science and Engineering, University of Tsukuba 1-1-1 Ten'nodai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8571 Japan

E-mail: <sup>†</sup> wakasa@hep.px.tsukuba.ac.jp

**Abstract** The Nb/Al-STJs fabricated for the COBAND experiment satisfy the requirements on the leak current and are expected to be able to detect a far-infrared single photon. However, we have not achieved the detection of a far-infrared single photon since noise from the readout line in the refrigerator overwhelms the signal from the STJ. To cope with this, we adopt an amplifier based on FD-SOI MOSFETs that can work at cryogenic temperature. We report the results of the signal from the STJ response to the laser pulse illuminations amplified by the SOI-STJ4 amplifier and performance evaluations of the SOI-STJ5 amplifier newly developed.

**Keywords** Cold Amplifier, Neutrino

## 1. 宇宙背景ニュートリノ探索(COBAND)実験

様々なニュートリノ振動実験からニュートリノの世代間の質量二乗差は $\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ ,  $|\Delta m_{32}^2| = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  (順階層) [1]とわかっているが、ニュートリノの質量自体については未だわかっていない。COBAND 実験では宇宙背景ニュートリノの崩壊探索を行い、ニュートリノの質量を決定する。

重いニュートリノの質量固有状態が軽いニュートリノの質量固有状態に崩壊する際、その崩壊に伴って放出される光子のエネルギーは以下のように表せる。

$$E_\gamma = \frac{|\Delta m_{32}^2|}{2m_3}$$

従って、 $E_\gamma$ を精度良く測定することでニュートリノの質量を決定することが出来る。ニュートリノの寿命は標準模型では $10^{43}$ 年、Left-Right Symmetric 模型では最小で $1.5 \times 10^{17}$ 年と長寿命であると予想されるため、ニュートリノの崩壊光を検出するための大量のニュートリノ源として全空間に密度 $\rho = 110 / \text{cm}^3$ 、温度1.9Kで一様分布しているとされる宇宙背景ニュートリノを用いる。この時 $E_\gamma$ は遠赤外領域にあると予想される。

$m_3 = 50 \text{ meV}$ ,  $\tau_3 = 10^{14}$ 年と仮定した場合、エネルギー分布は放出される崩壊光のエネルギー $E_\gamma = 25 \text{ meV}$ で鋭く立ち上がった後、赤方偏移の影響で低エネルギー側に長い尾を引く形となる(図 1)。この立ち上がりを観測するためには単一光子のエネルギーを分解能 2%以下で連続測定する必要がある[2]。

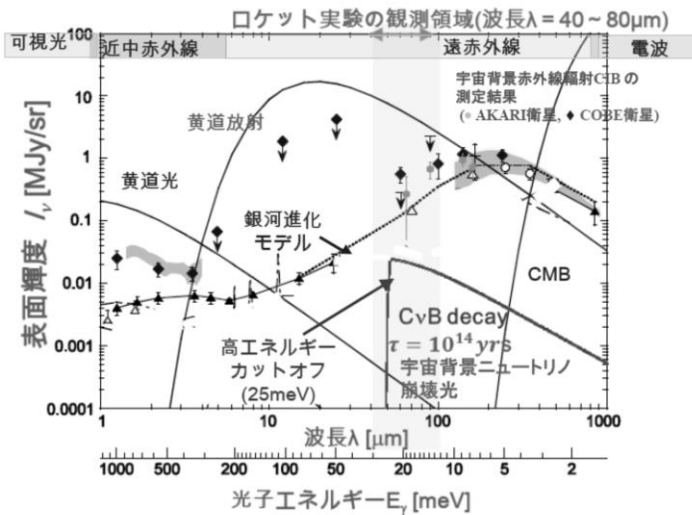


図 1. 宇宙赤外線エネルギー分布

宇宙背景ニュートリノ崩壊光は $m_3 = 50 \text{ meV}$ と仮定。

COBAND 実験では、まずニュートリノの寿命 $10^{14}$ 年まで感度を持つ 5 分間のロケット実験を行い、その後 $10^{17}$ 年まで感度を持つ 100 日間の衛星実験を行う。それぞれの実験で超伝導トンネル接合素子(STJ)検出器を用いる。ロケット実験では $40\mu\text{m} \sim 80\mu\text{m}$ にある遠赤外

光を分光し、ニオブとアルミニウムの二種類の超伝導体を使用した Nb/Al-STJ を  $50 \times 8$  のピクセル状に並べてそれぞれの波長で単一光子のエネルギーを観測する[3]。

## 2. 超伝導トンネル接合素子(STJ)検出器

超伝導トンネル接合素子(STJ)は超伝導体-絶縁膜-超伝導体のサンドイッチ構造を持つ(図 2)。STJ に入射した光子はクーパー対を解離させ準粒子を生成する。ニオブとアルミニウムを使用した Nb/Al-STJ 内で励起される準粒子の個数は

$$N_{q.p.} = G_{Al} \frac{E_\gamma}{1.7\Delta}$$

となる。ここで $G_{Al}$ は異なるバンドギャップエネルギーを持つ二種類の超伝導体(Nb:1.550meV, Al:0.172meV)を使用したことによるトラッピングゲインで、 $E_\gamma$ は入射光子のエネルギー、 $\Delta$ は超伝導体のバンドギャップエネルギーである。Nb:100nm, Al:70nm の Nb/Al-STJ において $G_{Al} \sim 10$ ,  $\Delta = 0.6 \text{ meV}$ である。

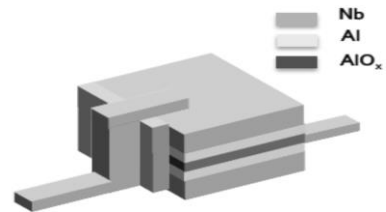


図 2. Nb/Al-STJ の概略図

また、準粒子数の揺らぎは

$$\sigma_N = G_{Al} \sqrt{\frac{FE}{1.7\Delta}}$$

と書け、ここで $F$ はファノ因子で Nb/Al-STJ において $F \sim 0.2$ である。

25meV の光子が入射した際に励起される準粒子の個数は $N_{q.p.} \sim 245$ 、準粒子数の揺らぎは $\sigma_N \sim 22$ である。

## 3. 極低温増幅器

Nb/Al-STJ はロケット実験におけるリーク電流値に対する要求を満たしている[4]が、未だに単一光子の測定には至っていない。これは測定系由来の雑音が原因であると考えられる。その内、長い冷凍機配線による雑音の影響を除くために STJ 検出器の直近で信号を増幅する極低温増幅器の開発を行っている。

極低温増幅器への要求は以下である。

- ✓ 極低温で動作可能であること
- ✓ 冷凍機の冷却能力を上回らない消費電力
- ✓ STJ の数 $\mu\text{s}$ の信号を増幅出来る応答速度

JAXA/ISAS グループにより Fully Depleted Silicon On Insulator(FD-SOI)プロセスで作製された MOSFET(図 3. 左)が 4K で動作したとの報告があった[5]. 部分空乏化 SOI(PD-SOI)プロセスで作製された MOSFET(図 3. 右)は MOSFET 間の寄生容量が小さいため、省消費電力と早い応答速度を持つ。しかし浮遊帯効果によって極低温では動作しない.FD-SOI プロセスでは MOSFET を薄く形成することで浮遊帯効果を抑制し、極低温での動作を可能としている。

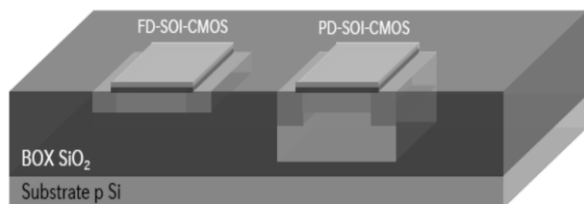


図 3. MOSFET の概略図

左: FD-SOI プロセス 右: PD-SOI プロセス

我々はこの FD-SOI プロセスで作製された MOSFET を用いて極低温増幅器の開発を行っている。

## 4. SOI-STJ の開発

SOI 増幅器一体型 STJ 検出器(SOI-STJ)は FD-SOI プロセスで作製された増幅回路に STJ 検出器を直接形成した一体型の光検出器である。STJ 検出器の信号を配線を介さずに増幅出来るため SN 比の改善が見込まれる。ただし現在は SOI 増幅器の発熱や動作方法等の理由により、STJ と SOI 増幅器は一体型として動作はさせず同環境下の別チップ上で各々動作させている。

現在、回路デザインとして改良を加えながら 5 つの設計が行われてきた。今回はその内、4 号機(SOI-STJ4)による STJ 検出器の光応答信号増幅試験の結果と 5 号機(SOI-STJ5)の性能評価について報告する。

### 4.1. SOI-STJ4 増幅器

SOI-STJ4 増幅器は帰還付きソース接地増幅回路を使用した増幅段とソースフォロワを使用したバッファ段からなる。これ以前のソース接地増幅回路では入力抵抗が大きいと STJ 検出器からの信号電荷は STJ 自身の容量(数十~数百 pF)を通して GND に散逸してしまい SOI 増幅器側に伝達されていなかった。そこで SOI-STJ4 増幅器では次の二点を変更した。

- ✓ 帰還部分に容量を入れることによる回路自身の入力抵抗の低下
- ✓ STJ 検出器と SOI 増幅器間のカップリング容量を外付けとして大きい容量に変更

極低温における SOI-STJ4 増幅器の周波数特性は図 4 のようになり、1MHz の信号に対して 30 程度の利得を得ることがわかる。

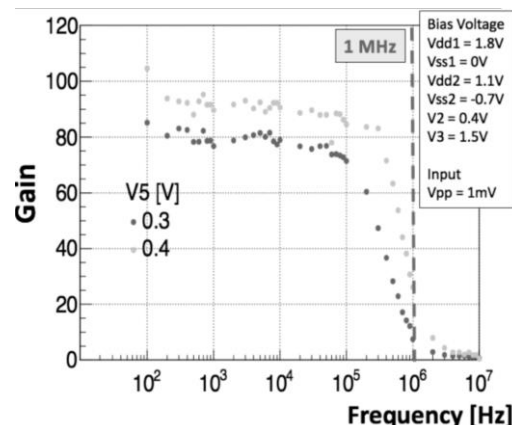


図 4. 極低温における SOI-STJ4 の周波数特性

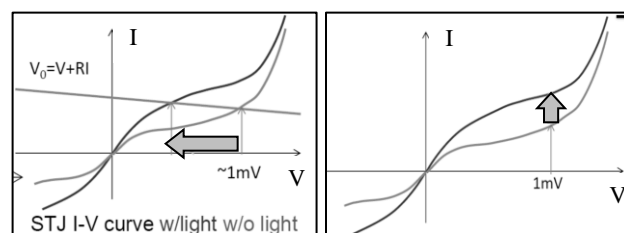


図 5. STJ の IV 特性と光応答信号の読み出し方  
矢印が光応答の際の信号変化に対応する  
左: 定電流モード 右: 定電圧モード

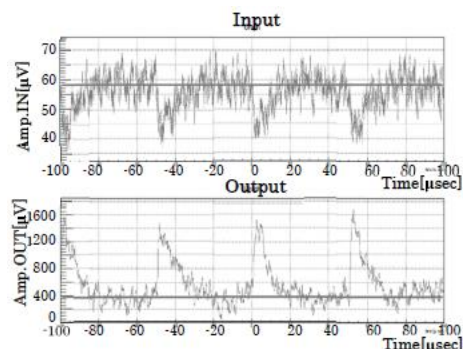


図 6. SOI-STJ4 増幅器による STJ 検出器の光応答信号増幅  
上: SOI-STJ4 増幅器に入力された

STJ 検出器からの光応答信号

下: SOI-STJ4 増幅器から出力された信号

STJ 検出器の光応答信号増幅を行う際は STJ の上部に定電流を与えて SOI 増幅器では電圧の変化(図 5.左)を増幅する。実際に周波数 20kHz 毎に入射する  $\lambda = 465 \text{ nm}$ , 幅 59ps の可視光に対する Nb/Al-STJ 検出器の光応答信号の増幅結果を図 6 に示す。SOI-STJ4 は入力信号波高  $V_{\text{inp}} = 35 \mu\text{V}$  に対して出力信号波高  $V_{\text{outp}} = 1.4 \text{ mV}$  の増幅を示し、初めて STJ の光応答信号を増幅することが出来た。この時の消費電力は  $230 \mu\text{W}$  で冷凍機の  $300 \text{ mK}$  での冷却能力  $100 \mu\text{W}$  を上回っており、ここは今後改善すべき課題である。

## 4.2. SOI-STJ5 増幅器

SOI-STJ5 増幅器は帰還付き差動増幅器による電荷積分型増幅回路を使用した増幅段とソースフォロワを使用したバッファ段、回路全体に流れる電流値を制御するバイアス回路からなる。SOI-STJ5 では SN 比の向上を主目的としているため消費電力の問題は依然、要解決問題として冷却能力が数百 mW ある 3K での動作を考えている。

帰還部分にはフィードバック容量として  $C_{FB} = 2\text{pF}$ 、フィードバック抵抗として  $R_{FB} = 5\text{M}\Omega$  を用いており、積分時間は  $10\mu\text{s}$  である。帰還付き電荷積分型増幅回路を用いることで入力抵抗が理想的には  $0\Omega$  となる。そのため STJ 検出器の光応答信号増幅を行う際には STJ の上部は定電圧に固定し(図 5.右)、信号電荷を  $10\mu\text{s}$  積分した後増幅する。実際に室温で  $100\text{pC}$  相当の信号電荷を入力した際の信号増幅結果を図 7 に示す。この時バイアス回路も期待通り電流値を制御しており、SOI-STJ5 は設計通り増幅器として機能することが確認出来た。

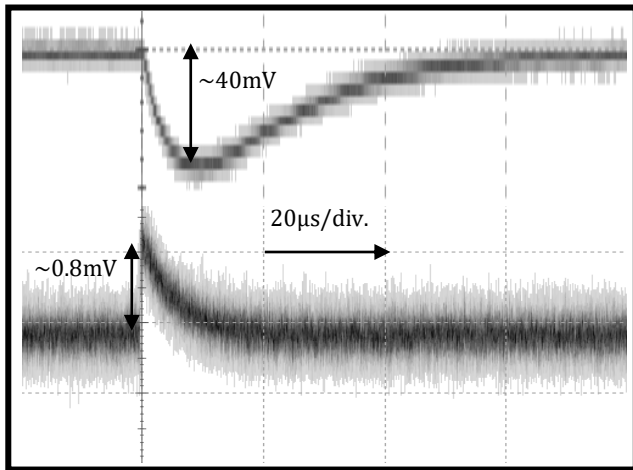


図 7. SOI-STJ5 増幅器による信号増幅試験

上: SOI-STJ5 増幅器から出力された信号

下: SOI-STJ5 増幅器に入力された 100C のテスト信号

しかし極低温で同様の試験を行ったところバイアス回路での電流制御が出来なかった。この原因として極低温において MOSFET の IV 特性に現れる kink によるドレイン電流値の異常上昇(図 8)が考えられる。kink は MOSFET のゲート-ソース電圧  $V_{gs}$  と比較してドレイン-ソース電圧  $V_{ds}$  が大きい領域で現れる傾向にある。この対策として、回路の途中にダイオード接続をした MOSFET を導入して kink の起こる MOSFET の  $V_{ds}$  にかかる電圧差を小さくすることを考えている。

## 5. まとめ

COBAND 実験に用いる極低温増幅器として SOI-STJ を開発している。

4 号機の SOI-STJ4 増幅器では初めて STJ の光応答信号を増幅することが出来た。今後はデータを収集し定量的な SN 比等の評価を行う。

5 号機の SOI-STJ5 増幅器では設計された回路が室温において設計通りに動作することを確認した。しかし、極低温環境下ではバイアス回路による電流制御が出来ていない。これは kink によるドレイン電流の異常上昇が原因だと考えられるので、次回設計ではそれぞれの MOSFET が適切な動作点になるような工夫を図る。

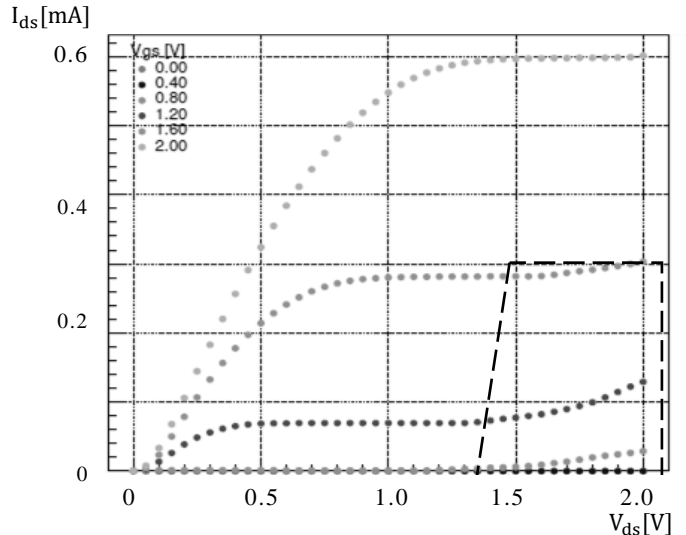


図 8. FD-SOI-MOSFET の極低温での IV 特性  
点線で囲まれた領域で kink によるドレイン電流  $I_{ds}$  の上昇が見られる。

## 6. 謝辞

本研究は、日本学術振興会の科学研究費助成事業(研究課題/領域番号 25105007, 16K13797)によってサポートされています。また、高エネルギー加速器研究機構の測定器開発室のサポートを受けています。SOI 回路の設計には東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、シノプシス株式会社、日本ケイデンス株式会社、メンター株式会社の協力で行われたものです。本研究に使用された STJ は、(独)産業技術総合研究所 (AIST) の超伝導クリーンルーム CAVITY において作製されました。

## 文 献

- [1] C. Patrignani et al., (Particle Data Group) Chin.Phys. C, 40 (2016) 100001
- [2] S. H. Kim, K. Takemasa, Y. Takeuchi, S. Matsuura, J. Phys. Soc. Jpn., 81 (2012) 024101
- [3] S. H. Kim et al., JPS Conf. Proc. 1, 013127 (2014)
- [4] Y. Takeuchi et al., "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), Kurume, Fukuoka, Japan, July 17-21, (2017)
- [5] T. Wada et al., J. Low. Temp. Phys. 167, (2012) 602