

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

SATテクノロジー・ショーケース2022

■ はじめに

ニュートリノの振動実験によりニュートリノは質量差を持ち、その質量の二乗差は求まっているが、その絶対質量を決定するには至っていない。最も重いニュートリノの寿命については、 10^{12} 年のオーダーの下限が与えられているだけである。しかし、ニュートリノは重い固有状態から軽い固有状態のニュートリノに光子を伴って崩壊することが可能である。この崩壊光子エネルギーを精密に測定することができればニュートリノの質量を決定することができる。

COBAND実験は、宇宙背景ニュートリノの崩壊を実験的に探索する実験である。宇宙背景ニュートリノは宇宙初期に生成されたニュートリノであると予測されている。この宇宙背景ニュートリノの崩壊に伴う光子を十分な精度で測定することを目的としている。宇宙背景ニュートリノ崩壊からの光子は、最も重いニュートリノの質量に応じて、波長 $50\mu\text{m}$ 付近に鋭いエッジを持つスペクトルを形成すると予測されている。 $50\mu\text{m}$ 付近の赤外光スペクトルを測定するために、遠赤外域単一光子を検出可能な感度を持つ検出器が必要である。

現在、COBAND実験ではNb / Al-STJ (超伝導トンネル接合) 検出器と、信号読み出し用の極低温アンプを組み合わせて、遠赤外光での単一光子検出を目標に研究開発を行っている。

■ 活動内容

1. Nb / Al-STJ検出器の研究

本実験では、宇宙背景ニュートリノ崩壊の光子を観測するためにNb / Al-STJ検出器を使用する。STJはSIS (超伝導体-絶縁体-超伝導体) 接合の1種で接合部にバイアス電圧を印加すると、超伝導層に入射した光子のエネルギーによってクーパー対が切断され、そのエネルギーに比例し準粒子によるトンネル電流が形成されるが、エネルギーギャップが非常に小さいため、従来の半導体デバイスよりもはるかに優れたエネルギー分解能を持つ。

現在使用しているNb / Al-STJ検出器は、波長 $50\mu\text{m}$ 付近の光子に対する十分な精度の分解能には足りないが、回折格子を組み合わせることで光子スペクトルを得ることができ、 $50\mu\text{m}$ の単一光子を検出できると期待されている。

しかし、現在遠赤外光1光子検出は、配線などの測定系由来のノイズに信号が埋もれてしまうため、STJ付近でSTJ信号を増幅する必要がある。

2. SOIを用いた極低温増幅器の研究開発

STJ信号は微弱であるため信号増幅を行う必要がある。STJ検出器は熱によるリーク電流の影響を低減させるため、極低温下での動作が想定されており、この直後に増幅器を設置するため、増幅器も極低温環境下で動作することが求められる。極低温増幅器の開発には、FD-SOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) 技術を採用しており、4Kで機能することが確認されている。

Nb / Al-STJは 0.4mV の一定のバイアス電圧で動作し、STJ自身の静電容量 20pF 程度に対して、STJからの信号を数 μs の時定数で読み出す必要がある。これまでの実証実験では、FD-SOIプロセスを用いていくつかのアンプを試作し、そのうちの1つを図1(左)に示す。

^3He 吸着冷凍機の中で、矩形波によるテストチャージインジェクションを用いて 350mK までのテストを行った。入力インピーダンスを $1\text{M}\Omega$ と 0.5nF に設定し、アンプからの出力をオシロスコープで読み取った。室温と 3K でのテスト電荷注入の結果を図1(右)に示す。この結果、このアンプは室温だけでなく極低温下でも機能することが確認できた。

出典[1]を改変

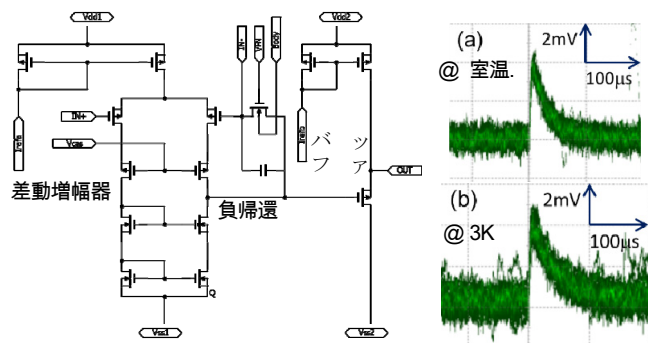


図1(左) 実証実験用に試作されたSOI低温増幅器。(右) 室温(a)と 3K (b)で 0.5fC の電荷入力に対する応答

■ 関連情報等(特許関係、施設)

この研究は、以下の機関の協力の元行われている。
高エネルギー加速器研究機構、理化学研究所、宇宙航空研究開発機構 / 宇宙科学研究所、Fermi National Accelerator Laboratory

参考文献

[1] Y. Takeuchi *et al.*, DOI: 10.1109/VLSI-TSA51926.2021.

代表発表者 守屋 佑希久(もりや ゆきひさ)

所属 筑波大学

数理解物科学研究科

問合せ先 〒305-0006 つくば市天王台 2-1-1

TEL: 090-5203-1127

moriya@hep.px.tsukuba.ac.jp

■ キーワード: (1) ニュートリノ

(2) 遠赤外光

(3) 超伝導

(4) 極低温

(5) 金属薄膜