

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索に向けた 極低温増幅器の研究・開発

SATテクノロジー・ショーケース2025

■ はじめに

宇宙背景ニュートリノ(Cosmic Background Neutrino)は、ビッグバンの数秒後にニュートリノが自由になった事象であり、ニュートリノが重い質量固有状態から軽い質量固有状態に崩壊する際に放たれる光子の直接観測を主目的として、COBAND(COsmic Background Neutrino Decay)実験を推進している。重いニュートリノの質量を50meVと仮定すると、予測される崩壊光子のエネルギーは25meV(波長50 μ m)の遠赤外領域の光である。そのため、この波長帯に対して単一光子検出が可能な装置が必要である。そこで、検出素子としてNb/Al製の超伝導トンネル接合素子(STJ : Superconducting Tunnel Junction)を用いる。STJの潜在能力を引き出すためには、極低温増幅器が必須であるため、現在、我々は極低温増幅器の研究・開発を行っている。最終的には、STJと極低温増幅器を組み合わせ、遠赤外領域の単一光子の検出を目指している。

■ 活動内容

1. Nb/Al製の超伝導検出器の開発

本実験では、STJ素子を検出器として用いる。STJ素子とは、SIS(超伝導体-絶縁体-超伝導体)構造をとり、極低温においては、物質の量子力学的効果が顕著に現れるため、超伝導体にクーパー対が出現する。そのクーパー対の束縛エネルギー以上の光子が入射すると、クーパー対の束縛が解けて、準粒子が生じる。それが、トンネル効果によって絶縁体を通過し、そのトンネル電流を信号として読み出す。即ち、STJの分解能は、クーパー対の束縛エネルギー(Nbでは1.5eV, 半導体Siでは1.1eV)に起因するため、従来の半導体素子の分解能に比べて、桁違いに優れている。

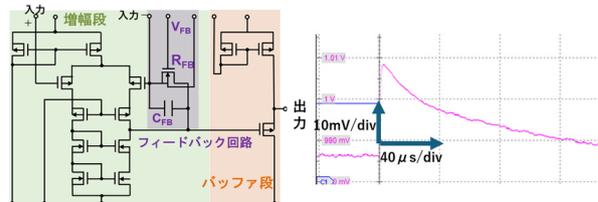
COBAND実験では、超伝導体にNbとAlの2層構造をもつSTJを用いる予定であり、産業技術総合研究所のQufabで作製したSTJの実機評価を行った結果、遠赤外領域の単一光子検出可能な性能をもつことが判った。

2. SOIプロセスによる極低温増幅器の開発

STJの信号は、冷凍機配線に起因する1nF程の負荷容量に逃げてしまうため、STJの直後で信号増幅を行う増幅器が必要である。そこで、我々は既にJAXA/ISASによって4Kでの動作が確認されている、FD-SOI(Fully Depleted Silicon On Insulator)プロセスによって、極低温増幅器を開発している。

3. 電荷積分型極低温増幅器の研究

我々が研究・開発を行っている増幅器の1つに、電荷積分型の極低温増幅器がある(左図)。この増幅器は、増幅器の負帰還抵抗に使用されているMOFETのゲート電圧を変えることで、負帰還抵抗の値を調節し、積分時定数を変えることが可能である。以前、この増幅器は15 μ sのCR積分時定数を用いていたが、それでは、STJ応答信号(数 μ s)の高周波成分が負荷容量に逃げてしまうという問題点が判った。そこで、積分時定数を100 μ s程取ることで、信号の高周波成分に対しても増幅が取れて、可視光単一光子検出が可能な性能をもつことが実証されたため、今回は、その結果について報告する。



左図. 電荷積分型増幅器の回路図
右図. 3.9Kで20fCの電荷入力に対する応答信号

■ 関連情報等(特許関係、施設)

この研究は、以下の機関の協力によって、行われている。高エネルギー加速器研究機構、産業技術総合研究所、静岡大学、宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所、Fermi National Accelerator Laboratory、

SOI アンプの設計は VLSI Design and Education Center(VDEC)のサポートを受けて行われており、製造は LAPIS Semiconductor によって行われている。

* VDEC, the U. Tokyo in collaboration with Synopsys, Inc., Cadence Design Systems, Inc., and Mentor Graphics, Inc

代表発表者 王生 尚志(いくるみ なおゆき)
所属 筑波大学大学院 理工情報生命学術院
数理物質科学研究群
物理学学位プログラム
素粒子実験研究室
問合せ先 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1
TEL: 029-853-4270 FAX: 029-853-4491
MAIL: ikurumi@hep.px.tsukuba.ac.jp

■キーワード: (1)宇宙背景ニュートリノ
(2)遠赤外線
(3)超伝導検出器
(4)極低温増幅器