

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14739

研究課題名（和文）SOI技術を応用した新型ニュートリノ検出器の開発

研究課題名（英文）Development of new neutrino detector using SOI technology

研究代表者

木河 達也（Kikawa, Tatsuya）

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：60823408

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的はSOI(Silicon-On-Insulator)技術を応用した革新的な高精度ニュートリノ検出器の研究開発を行い、ニュートリノ反応の精密測定、さらにはニュートリノのCP対称性の破れの発見に向けた礎を築き上げることである。ニュートリノ検出器からのシンチレーション光をSOI検出器でとらえるために、可視光検出に特化したSOI検出器の開発と製作を行い、その性能評価を行った。LED光を観測することには成功したが、シンチレーション光の検出はできず、実用のためにはセンサー部をアバランシェフォトダイオード(APD)として動作させ、増幅させることが不可欠であると結論付けた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのSOI検出器の用途はX線イメージングが主であり、可視光の検出能力は実証されているものの、シンチレーション光検出の用途で実用を試みるのはおそらく初めてである。シンチレーション光の検出能力の実証には至らなかったものの、SOI検出器の可視光検出への応用に向けた第一歩となる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop a new neutrino detector using SOI (Silicon-On-Insulator) technologies and establish a foundation to measure neutrino interactions precisely and discover the CP violation in neutrinos.

In order to detect the scintillation light from neutrino detectors, we developed a new SOI detector which is specialized in the visible light detection. We succeeded to observe the light from LED. However, it was hard to detect the scintillation light. As a result, we concluded that a signal multiplication by operating the sensor part as an avalanche photodiode (APD) is essential for the practical application.

研究分野：素粒子物理学(実験)

キーワード：SOI検出器 ニュートリノ検出器

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動は、ニュートリノが飛行中に別の型のニュートリノに変化する現象である。ニュートリノの基本性質は未だ不明な点が多いが、ニュートリノ振動の測定により、混合角、質量二乗差、CP 対称性などの測定が可能となる。CP 対称性は粒子と反粒子の間の対称性を表し、クォークセクターでは見つかっている。一方で、ニュートリノの属するレプトンセクターにおける CP 対称性の破れは未だ見つかっておらず、その検証は宇宙から反物質だけが消え去り、物質優勢宇宙ができあがった謎を解く鍵となると考えられている。

T2K 実験は J-PARC において生成されたニュートリノビームを生成点直後に設置された前置検出器 295km 離れたスーパーカミオカンデで観測する長基線ニュートリノ振動実験である(図 1)。T2K 実験においてはニュートリノと反ニュートリノの振動確率を比較することによりニュートリノにおける CP 対称性を検証する。これまでの T2K 実験の測定から、ニュートリノにおける CP 対称性の破れが  $2\sigma(95\%)$  の信頼度で示唆されている。

しかし、この信頼度は不十分であり、CP 対称性の破れを  $5\sigma(99.9999\%)$  の信頼度で発見するためには、統計誤差と系統誤差の両方を大幅に削減しなければならない。統計誤差の削減のためには J-PARC のビーム強度を現在の 2.5 倍の 1.3MW まで増強し、スーパーカミオカンデの 8.4 倍の有効体積を持つハイパーカミオカンデが建設中である。

一方で系統誤差はニュートリノ反応の不定性に起因する誤差が支配的である。これは過去のニュートリノ反応の測定精度が不十分であることが原因であり、特に過去の測定ではニュートリノ反応からの低運動量の粒子(特に陽子)が十分に検出できていないことが問題となっている。そのため低運動量の粒子も検出可能な新型ニュートリノ検出器の開発が CP 対称性の破れの発見に向けた急務となっている。

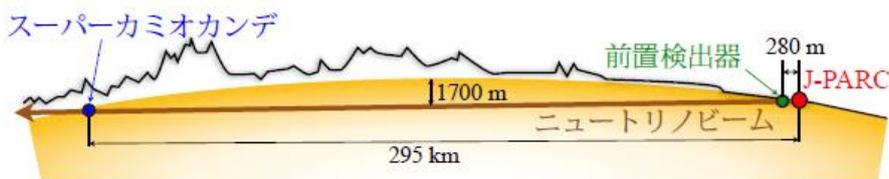


図 1 : T2K 実験の概観図

2. 研究の目的

本研究の目的は SOI(Silicon-On-Insulator)技術を応用した革新的な高精度ニュートリノ検出器の研究開発を行い、ニュートリノ反応の精密測定、さらにはニュートリノの CP 対称性の破れの発見に向けた礎を築き上げることである。

断面が  $1\text{mm}\times 1\text{mm}$  レベルのシンチレーションファイバーを大量に並べて飛跡検出器をつくれば、図 2 のように低運動量の粒子まで高効率で検出できるようになる。しかし、ファイバーのチャンネル数が莫大かつ高密度となるため、MPPC などの既存の光検出器とエレクトロニクスではシンチレーション光の検出と信号読み出しが極めて困難である。

SOI とはシリコンウェハの上に薄い絶縁酸化膜を作り、さらにその上に形成したシリコンウェハ上に電気回路を形成する技術のことである。図 3 のように支持基板をセンサーとして、また絶縁層上に形成した電気回路をセンサーからの信号の読み出しに使用するように設計されたセンサー・回路一体型の半導体検出器(以下 SOI 検出器) が主に X 線イメージングに用いられている。このセンサーは放射線だけでなく、可視光にも感度があるため多数のシンチレーションファイバーを束ねて、その端を SOI 検出器に接続すれば、多数のファイバーからの蛍光を 1 つの SOI 検出器でまとめて検出し、信号を読み出すことができる。

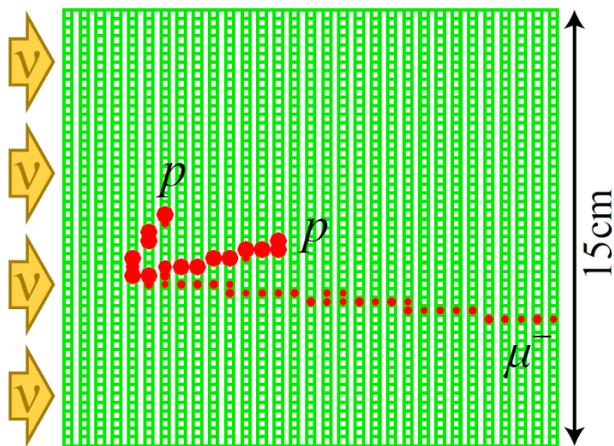


図 2 : シンチレーションファイバー検出器におけるニュートリノ反応事象のシミュレーション

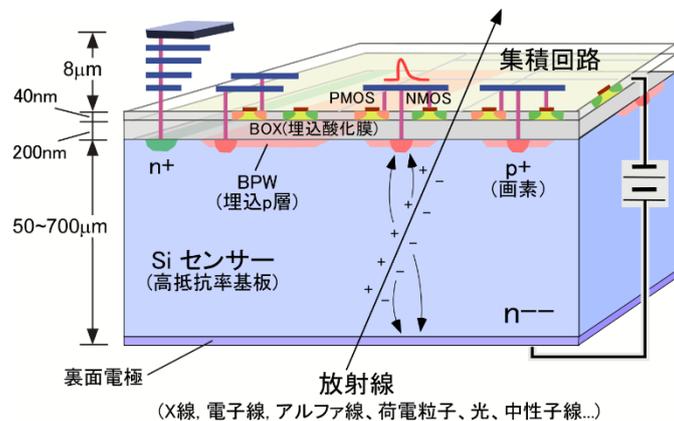


図 3 : SOI 検出器の概念図

### 3. 研究の方法

このような検出器を実現させるためには、光電子の収集が最大の課題となる。クラレ社製のシンチレーションファイバーからの光量は最小電離粒子に対して 300 光子程度である。SOI 検出器の典型的なノイズレベルが 10 電子程度のため、70%の量子効率を仮定すると、20 程度の S/N 比を得るためには、ほぼ 100%の光電子の収集効率が求められる。SOI 検出器はこれまで X 線イメージングなどの放射線検出を主目的として開発されてきたが、本研究では可視光の検出に特化した SOI 検出器の開発と、その性能評価を行い、シンチレーション光検出の用途での実用を試みる。

### 4. 研究成果

2020 年度に企業や高エネルギー加速器研究機構の SOI 検出器の専門家と議論を重ね、本研究におけるセンサー開発の方針を決定し、新センサーの概念設計を行った。電子顕微鏡向けに複数サンプリングできるように設計されたチップをベースとし、表面側の窓を大きくするなどし、光が入りやすいように改良した。2021 年度における SOI Pixel MPW ランにおいてセンサーを製作し、2022 年度と 2023 年度にこのセンサーの性能評価を行った(図 4)。

まず LED の光を直接、センサーに入射させ、可視光による応答を確認した。次にシンチレーションファイバーに接続し、シンチレーション光の検出を試みたものの、有意な信号は確認できなかった。既存の光センサーをリファレンスとして LED 光と比較して評価したところ、シンチレーション光の観測のためには 10 倍以上の S/N 比の改良が必要ということがわかった。SOI センサーの設定の最適化に加え、シンチレーション光自体の収集効率を改善することも試みたが、シンチレーション光は観測できなかった。よってセンサー内での増幅なしでは、SOI 検出器によるシンチレーション光の観測は困難であり、実用のためにはセンサー部分をアバランシェフォトダイオード(APD)として動作させ、増幅させることが不可欠であると結論付けた。

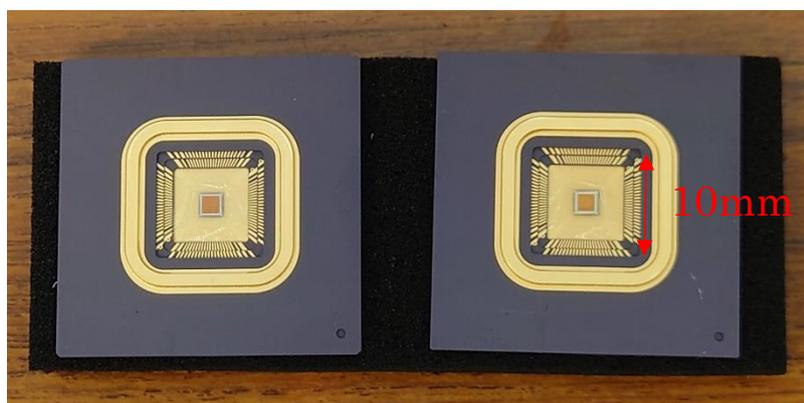


図 4 : 製作した可視光検出用の SOI センサー

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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