

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610060

研究課題名(和文) ナノテクノロジーを利用した荷電粒子検出素子の研究

研究課題名(英文) Development of charged particle sensor with Nano technology

研究代表者

江成 祐二 (Enari, Yuji)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：60377968

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ナノテクノロジーを駆使したソーラーセル(CIGS系薄膜太陽電池)のテスト・サンプル(ソーラフロンティア社製)を入手し測定を行った。波長400 nmから1300 nmの広い波長領域で量子効率80%を超える良質のサンプルであることが分かった。荷電粒子から輻射するチェレンコフ光を模した光パルス照射、その時間応答を測定した。大強度の光に対しての応答は確認できたが、実用にはノイズの抑制がカギになることを明らかにした。宇宙線テスト用にFPGAを使用したトリガー回路を組み、汎用性の高いシステムを構築した。読出し回路を改善することにより宇宙線の検出を試みたが、入手できたサンプルでの目的達成には至らなかった。

研究成果の概要(英文)：A trial to examine if a thin film solar cell, which is well advanced with nano technology, could detect a charged particle with the Cherenkov light. The solar cell is one of CIGS solar cell developed by Solar Frontier Corporation. The measured quantum efficiency of the cell shows more than 80 % in the wave length range from 400 nm to 1300 nm. The solar cell was irradiated a generated light pulse with LED as like the Cherenkov light (a few hundred photons in a few ns), and measured output waveform. We have observed clear light response with large number of photons. However, it was not possible to detect pulse response on a weak pulse. It turned out the noise suppression of three order magnitude is required, therefore, readout system need to be reconsidered in order to detect the Cherenkov light with the solar cell. In order to test the solar cell with cosmic rays, a test bench is built with FPGA. The signal from three scintillation counters are digitized and injected into the FPGA.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験 荷電粒子検出 先端技術の応用 ナノテクノロジー ソーラーセル

1. 研究開始当初の背景

荷電粒子の検出にチェレンコフ光を使うことは先行実験(引用文献)によって示されていた。しかしながら、チェレンコフ光は微弱であり、反応時間が早く、量子効率の良い光検出器の使用が求められる。このような光検出器は非常に高価でアトラス実験レベル(11階建てビル)を覆うことはできない。本研究はその光検出器にナノテクノロジーにより大幅に性能が向上したソーラーセル(薄膜太陽電池)を用いることにより、大面積化が容易にできる、新しい荷電粒子検出器素子の開発を試みた。

ナノテクノロジーを使ったソーラーセルには、図1に示す通り様々な種類がある。シリコン系は日常的に良く使われており、完全に確立されたものである。新技術として注目したのは化合物半導体系と有機系である。有機系は他の二つの系統と比べると、フィルム状であるなど、有利な点もあるが、量子効率が少し低い。また放射線耐性は弱いことが分かり、最終的には化合物半導体系薄膜ソーラーセルに絞り込んだ。

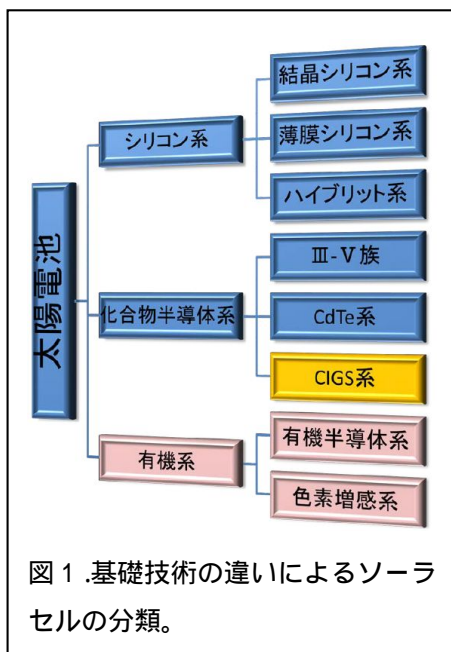


図1. 基礎技術の違いによるソーラーセルの分類。

2. 研究の目的

本研究の目的は、近年目覚ましく発展しているナノテクノロジーを用いたソーラーセルを用いた荷電粒子検出素子の開発である。荷電粒子が媒体を通過したときに放出されるチェレンコフ光をこのソーラーセルにより捕らえることができるかの実証が最終的な目標であった。

ナノテクノロジーを用いた薄膜ソーラーセルは従来のシリコン系太陽電池と同等以上の発電効率を持ち始めており(引用文献)、

- (1) 可視光領域での量子効率が非常に高いこと(波長 400 ~ 500 nm において 90% 以上)
- (2) 可視光外にまで感度を有すること、があげられる。特に紫外域に対する感度が重要である。

この新しい荷電粒子検出素子の原理が実現可能かを実証する必要がある。その後、この素子の動作原理の確認のため、量子効率の波長依存性、ベース材等の光の吸収効率の波長依存性を詳細に調べ、広い波長領域に渡り輻射されるチェレンコフ光から予想される信号量を予想し、実験データと比較することにより考慮外の効果はないことを検証する。

3. 研究の方法

ソーラーセルの選定から、検出器としての動作検証まで実行するために、大きく分けての4つのパートに分け、進めた。

- (a) ソーラーセルの研究および選択：テスト用の通常のシリコン系の太陽電池(PINダイオード等)とナノテクノロジーを用いた無機化合物半導体のCIGS(Cu, In, Ga, Se)系の中から選定する。実機を製作する上で電極の形状を自由に変更可能である製作者や研究機関を探した。
- (b) 素子の電気的特性および光学特性のテスト：ソーラーセルに照射する光の波長、強度を調節可能である光学系と、読み出し回路の設計を行った。
- (c) チェレンコフ光輻射の波長依存性を考慮したシミュレーション：検出器としての構成を決めるための光の輻射と検出器への入射までのモデルを構築する。
- (d) 宇宙線をつかったテスト：検出器として動作検証するため、宇宙線をトリガーするシステムを構築した。

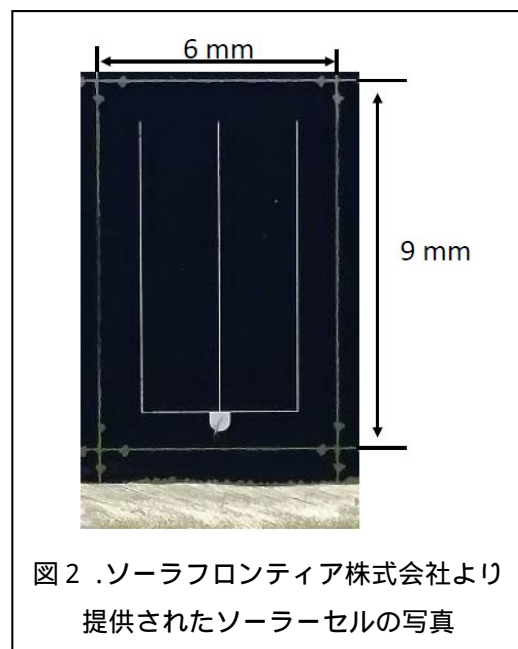


図2. ソーラフロンティア株式会社より提供されたソーラーセルの写真

4. 研究成果

(1) ソーラセルの精査と入手

CIGS 系のソーラーセルを開発している研究機関は日本国内にも 10 ヶ所程度存在する。つくば市にある産業技術研究所 太陽光発電工学研究センターの柴田肇博士から幾つかの会社、研究機関を紹介してもらい、最終的にはソーラーフロンティア株式会社 of 櫛屋勝巳博士からサンプル・セルの提供を受けることに成功した。図 2 がサンプル・セルで大きさは 6 mm×9 mm であり、理想的なサイズ

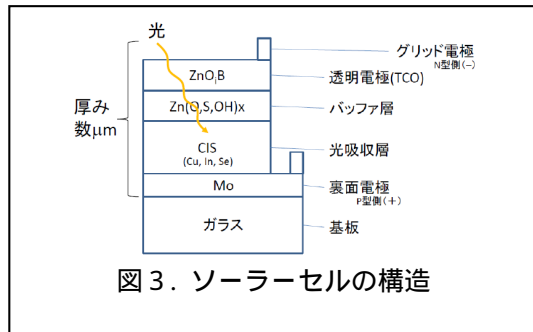


図 3. ソーラーセルの構造

のセルを手に入れることができた。このセルの層構造を図 3 に示す。ガラス基板の上に各層を蒸着し、厚み数 μm で太陽電池を形成している。透明電極は入射面全体であり、信号は早い取り出しができる構造になっている。このサンプルは東京大学 先端科学技術研究センターの渡辺 健太郎 博士に協力を仰ぎ、基本的なパラメータを測定することができた。照射光に波長 550 nm、強度 100 nW/cm^2 を使い、電流と電圧の関係を調べた。(図 4 上) また量子効率の波長依存性も取得し、波

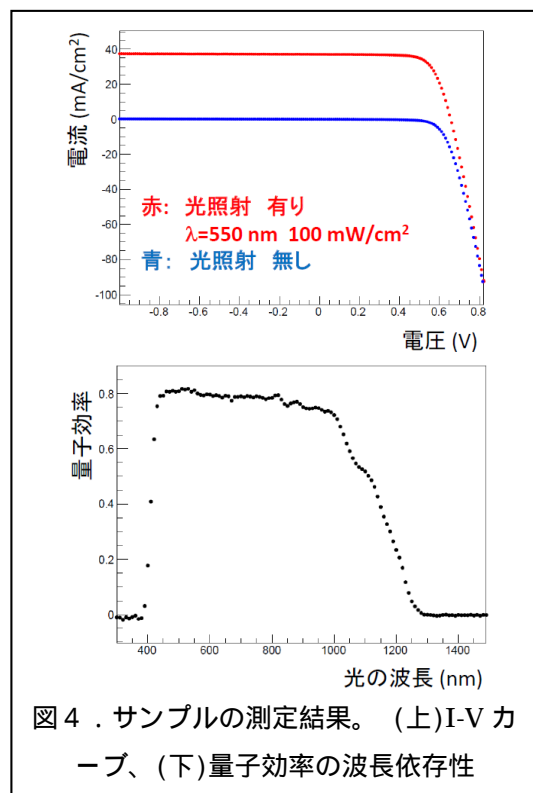


図 4. サンプルの測定結果。(上) I-V カーブ、(下) 量子効率の波長依存性

長 400 nm から 1200 nm の広い範囲に感度をもち、しかも量子効率が 80 %程度という素晴らしいサンプルであることが分かった。

(2) テストベンチの構築

光源には波長の異なる数種類の発光ダイオードを用い、光量の調整には THORLABS 社の校正済みのフォトダイオードを用い、波長 200 nm 付近の紫外領域から波長 2000 nm の赤外領域までのできるだけ広い波長領域でテストできるようにした。実際の測定は暗箱の中にソーラーセルを設置、プローブで電極上の電圧を測定する。このプローブは 3D 稼働台に乗せ、出来るだけ設置および測定が容易にできるように工夫した。

光パルスを作るためには、LED に矩形波を送る。その時に LED がソーラーセルの近くにあると、測定系にこの矩形波のノイズが乗ってしまう。このため、暗箱とは別に LED を光らせるためだけの箱を作り、それを光ファイバーにより暗箱に光を導くシステムを作り上げた。この結果、矩形波によるノイズをほぼゼロに抑制することに成功した。

光パルスに対する応答を、プローブを介してオシロスコープで測定した。強い光を入射した時にはアンプ等なしで応答を測定できるが、目的の微弱光に対しては信号の増幅が必要であった。ここで問題になったのは太陽電池の内部抵抗が数 M と非常に高いことである。これにより、通常のアンプが使えないため、Texas Instrument のオペアンプ LME49720 にて負帰還の回路を製作した。最終的にはこれをプリアンプとし、メインアンプに浜松ホトニクス社製の C11184 を使うことにより、全体で信号増幅率 100 倍のシステムを製作した。

(3) シミュレーションによる見積もり

媒質中に荷電粒子が入射した時に輻射するチェレンコフ光のシミュレーションを行った。図 5 に窓材で使われているガラスの屈折率 1.4、入射粒子のエネルギー 1 GeV の時の輻射光子数を示す。通常は 300 nm 以下には感度がないが、200 nm から 300 nm にも感度があれば測定可能な光子数は 2 倍に出来ることが判明した。

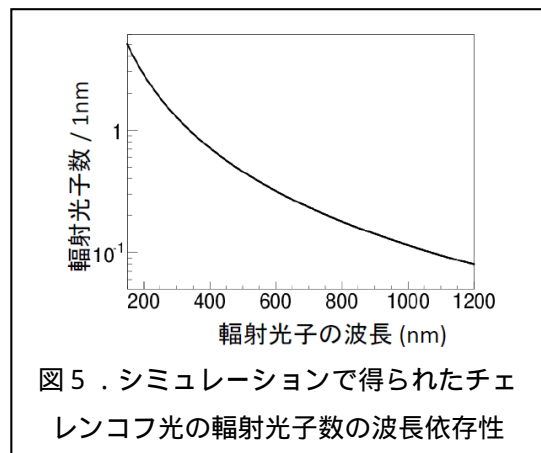


図 5. シミュレーションで得られたチェレンコフ光の輻射光子数の波長依存性

(4) テスト結果

製作したテストベンチにおいて、光パルス照射時に得られたソーラーセルからの応答を図6に示す。単位時間あたりの光量は一定で、パルスの幅を $10\ \mu\text{s}$ 、 $6\ \mu\text{s}$ 、 $3\ \mu\text{s}$ と変化させると、そのパルス幅に応じて立ち上がり時間が伸びており、照射したパルスの応答であることが分かる。波形の立下りはかなり遅く、 $1\ \text{ms}$ ほど掛かることが分かった。これは内部抵抗が大きいことが挙げられる。このため、静電容量の小さい回路の開発が必要になることが分かった。

目標とするパルスの幅は $5\ \text{ns}$ 以下である。この領域でのテストは照射できる光の量も限られることもあり、ソーラーセルからの出力は小さく、読み出し系のノイズに埋もれ、パルスとして認識することはできなかった。このテストから、入手したソーラーセルではチェレンコフ光を検出するにはノイズが3桁程大きく、抜本的な対策を講じなければソーラーセルを用いて荷電粒子検出の実現は出来ないことが明らかになった。

(5) 宇宙線を用いたテスト

これはサンプル・セルを入手する間に、組み上げたものであり、実際にはこのテストをソーラーセルに対して実施することは出来なかった。しかしながら、新しい試みとして、論理回路の組み上げに FPGA を用い、システムを構築した。宇宙線が目的とするサンプルを通過したことを知るために、暗箱の上下にシンチレーションカウンターを設置、それらが同期した時だけにトリガー信号が出るような論理回路が必要である。シンチレーションカウンタからのアナログ信号は閾値を決めてデジタル信号にして、その信号を ALTERA(現 Intel)FPGA Arria-V に入力し、ファームウェアにより論理回路を構成し、この同期を取るシステムをくみ上げた。これにより培われた技術を生かし、フィルタリングを組み込んだ研究開発も行っている。

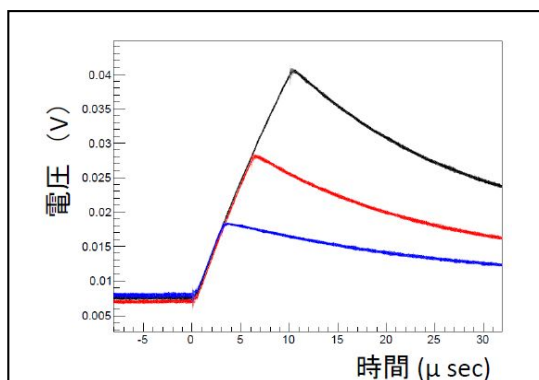


図6 .テスト・セルからの光パルスの応答信号。光パルスの時間幅 $10\ \mu\text{s}$ (黒), $6\ \mu\text{s}$ (赤), $3\ \mu\text{s}$ (青)である。

<引用文献>

“A 5 ps TOF-counter with an MCP-PMT”, K. Inami, Y. Enari et al. Nucl. Instrum. and Meth., A560 (2006) 303.
Solar cell efficiency tables (ver. 41)”, M. A Green, et al. Prog. in Photo Research and Appl., 21, 1 (2013) 1-11

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0件)

[学会発表](計 4件)

宇野健太、田中純一、江成祐二、井口竜之介、嶺岸優司、楊易霖、「新しいトリガー読み出しのためのバックエンドシステムの開発」、日本物理学会 第72回年次大会、2017年3月19日、大阪大学(大阪府豊中市)

宇野健太、田中純一、江成祐二、井口竜之介、嶺岸優司、「フィルタリングを組み込んだFPGAファームウェアの性能評価」、日本物理学会 2016年秋季大会(2016年9月24日、宮崎大学(宮崎県宮崎市))

宇野健太、田中純一、江成祐二、山本真平、井口竜之介、嶺岸優司、森達哉、「フィルタリングを組み込んだFPGAファームウェアの研究開発」、日本物理学会 第71回年次大会、2016年3月22日、東北学院大学(宮城県仙台市)

江成祐二、「薄膜ソーラーセルを用いた荷電粒子検出素子の開発」、日本物理学会 第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学(宮城県仙台市)

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

[その他]

ホームページ

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~yenari/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

江成祐二 (Enari, Yuji)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：60377968

(2)研究分担者

特に無し

(3)連携研究者

特に無し

(4)研究協力者

櫛屋 勝巳 (Kushiya, Katsumi)
ソーラーフロンティア株式会社・執行役員
兼 知財戦略室・室長
東京大学・国際高等研究所・サステイナ
ビリティ学連携研究機構・客員教授

渡辺 健太郎 (Watanabe, Kentaroh)
東京大学・先端科学技術研究センター・
助教