

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510135

研究課題名(和文)高位置時間分解能を持つ中性子検出器を実現する為の新しい検出器構造の研究

研究課題名(英文)A new structure of neutron detector for high precision measurement.

## 研究代表者

内田 智久(Uchida, Tomohisa)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：40435615

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：高位置分解能、高時間分解能、高係数率を可能にするための2次元熱中性子検出器製造技術の研究を行った。光検出器(PINフォトダイオード)上に中性子を光に変換するシンチレータ層を形成、検出効率を上げるためにシンチレータ部に光検出部と垂直な方向に多数の光パイプを形成する方法を採用した。光パイプ形成のために微細な塗布が可能なディスペンサと呼ばれる定量吐出装置を使用した。この検出器構造により熱中性子の検出効率向上を確認した。

研究成果の概要(英文)：We studied a new manufacturing technique of a 2D neutron detector for high precision measurements. We use a PIN photodiode for this study and make a photo-conversion layer with a new structure onto the diode. The conversion layer has vertical light pipes to a light receiving surface of the diode in order to increase detection efficiency. We employ a liquid high-precision dispenser to make the light pipe. We observed the increased detection efficiency of the detector with the new structure.

研究分野：放射線計測

キーワード：放射線検出器 中性子

### 1. 研究開始当初の背景

中性子検出器では測定精度向上、計測時間の短縮化、コスト削減を実現する為に高位置分解能、高時間分解能、高計数率が可能な2次元(画像)放射線検出器開発が期待されていた。

中性子検出はその長所である中性子が故に困難である。現在はヘリウムガス検出器が多く、多くの検出器システムで使用されている。しかしながらヘリウムガス検出器を用いた検出器は以下の問題がある。

1. 低位置分解能：ヘリウムガス検出器の位置精度は1 cm程度である。位置分解能を上げる為にはターゲットから検出器までの距離を長く取る必要がある。このために検出システムが大きくなり応用分野が制限される。
2. 低い計数能力：ヘリウムガス検出器の信号波形幅が $\mu\text{sec}$ オーダーなので原理的に高計数が不可能である。従って、近年建設されている高強度中性子源の性能を十分に生かす事が出来ない。
3. 高コスト：世界的な中性子発生源建設および欧米のテロ対策による中性子検出器需要の拡大によりヘリウムガス価格が急激に上昇し問題になっている。

He ガス検出器に代わる検出器として一般的なガス(Ar/CO<sub>2</sub>など)を用いた2次元中性子ガス検出器開発を行っていた。この検出器はGas Electron Multiplier(GEM)と呼ばれる電子ガス増幅を用いた検出器でありホウ素などの粒子コンバータと組み合わせ中性子検出を実現する事が出来る。この検出器は先に挙げた問題を解決する事が出来るが位置分解能1mm程度が限界であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は高機能2次元検出器を実現する為に必要な検出器構造と製造手法を新たに開発し最良候補を選択する事である。

高機能2次元検出器を実現する為に半導体チップ表面に中性子光変換層を印刷技術で直接描画する方法を採用した。光半導体検出器は高位置分解能、高時間分解能、高係数率の特長を持つが中性子に対しての感度が非常に低い。そこで2次元光半導体検出器(半導体チップ)上に中性子光変換層を形成する事で高性能な中性子検出器を実現する。

チップ上に中性子光変換層を平面上に形成した場合、光変換層とチップの接触面のみ検出効率に寄与するため中性子の検出効率が低くなる問題がある。本研究では検出効率を向上させるための検出器構造とその製造方法についての研究を行った。

### 3. 研究の方法

光電子倍增管などの光検出器に中性子光変換部を設けることで中性子検出を行った例

は既にある。しかし、位置分解能が低い、形状が大きい、検出効率が低いなどの理由のために使用される機会は少ない。今回の研究では半導体光検出器を採用する事で検出効率以外の問題を克服する事ができる。従って、本研究の中心課題は検出効率の増大である。

中性子を光へ変換するための代表的な物質からホウ素と硫化亜鉛の組み合わせを用いた。検出効率を増加させるために必要な事は検出効率に寄与できる面積または体積を増加させることである。また将来2次元半導体検出器へ応用できるような構造が必須となる。

本研究では様々な検出構造を形成し検出効率を測定比較する事で進めるために数多くの半導体チップが必要となる。本研究では高価な2次元半導体チップの代わりに図1に示すPINフォトダイオード(浜松フォトニクス社製S2506-2)を用いた。

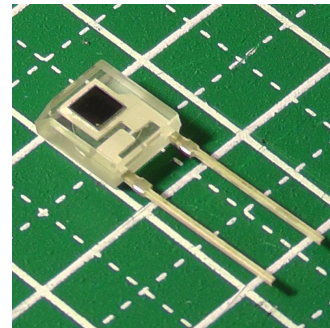


図1 フォトダイオード

PIN フォトダイオード上の中性子検出部生成のために図2に示すディスペンサと呼ばれる装置を用いた。



図2 ディスペンサ

ディスペンサは定量吐出装置とも呼ばれシリンジに充填された液体を空気で押し出すことでシリンジ先端に取り付けられたニードルから正確に微少の液体を吐出する事ができる。装置には精密移動可能な作業ステージが備えられておりステージ上にフォトダイオードを固定し中性子検出部を形成する事ができる。

製作した検出器を評価するためにPINフォトダイオードが出力する信号を処理する電子回路を設計製作した。

これらの装置を用いて、様々な検出器構造を形成し、チェックソース・カルフォルニウム 252 を用いて検出レートを測定し比較を行うことで研究を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 開発した新しい検出器構造

様々な方法を試みた結果、PIN フォトダイオード上に形成する光変換層に粉末化した炭化ホウ素と硫化亜鉛、エポキシ樹脂を混合したシンチレータを採用した。荷電粒子変換層と光発光層を分離する方法も考えられるが検出効率を向上させる構造が複雑になるために微細化が困難であると判断した。

ホウ素粒子は中性子に対する断面積が比較的大きいが光学的に不透明であるため光検出器から見える面のみ中性子検出に寄与する。従って、検出効率は低い。この問題を解決するために光検出器から直接見ることができない面で発光させた光を光検出器へ導く方法を考案した。

検出効率を上げるためにシンチレータ層に光検出面と垂直な方向に多数の円柱状エポキシ樹脂（光パイプ）を格子状に設けた（図3参照）。

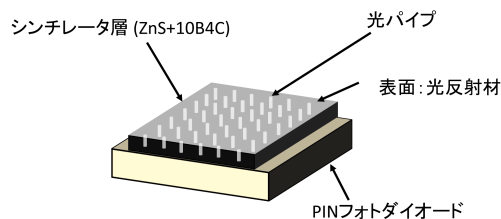


図3 開発した新しい検出器構造

円柱側面で発光した光は受光面へ導かれ光検出器で検出可能なる。原理的には円柱側面面積と底面面積の差が検出面積増加分となる。光パイプに集めた光を少しで多く集めるためにシンチレータ層の表面に光反射材を塗布した。

最終的に2次元検出器へ応用する場合、1ピクセルに1つの光パイプを設け、光パイプ底面を受光部に合わせて配置する計画である。

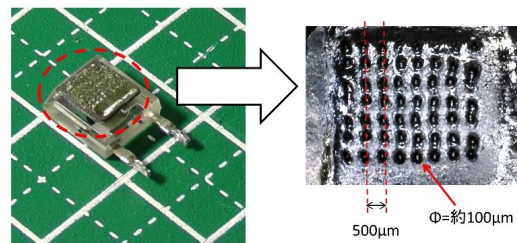
##### (2) 検出器構造の製造方法

以下の手順で製造した

1. PIN フォトダイオード表面にシンチレータ材料を塗布する（厚さ 0.5 mm）。シンチレータ材料は硫化亜鉛粉末、炭化ホウ素粉末、エポキシ樹脂の混合体。
2. エポキシ樹脂が硬化する前にディスペンサを用いてニードルをシンチレーション層に挿入し紫外線硬化型エポキシ

樹脂を吐出しながらニードルを引き抜くことで円柱状の光パイプを形成

3. 紫外線により光パイプを硬化させた後にPINフォトダイオードを恒温槽に入れてシンチレータ層を硬化させる
4. 全体が硬化した後に表面に銀インクを



塗布する

図4 製作した検出器

図4に製作した検出器の写真を示す。写真右は反射材を塗った検出器、写真左は反射材を塗布する前にシンチレータ部を上から見た写真である。光パイプ径は表面付近で広がるために大きく見えるが内部は約 100 µm になっている。

##### (3) 測定結果

###### 検出レート

チェックソースを用いて製作した検出器と光パイプが無い検出器の検出レートを測定して比較した。その結果、検出レートを1.2から1.3倍上昇した。今回上昇が認められたことは光パイプによる効果と考えている。

もし理想的な光パイプが形成され、全ての面が中性子検出に寄与すると仮定すると増加率は1.6倍となる。検出レ率が理想値より大幅に低い事、検出器により値が異なる理由は検出器により光パイプの形状が異なるためと考えられる。

###### スペクトラム

光パイプからの光がスペクトラムを変化させているかどうかを確認するためにスペクトラムを比較した。

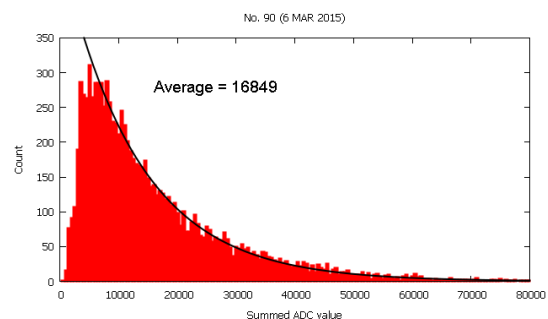


図5 光パイプ有り検出器のスペクトラム

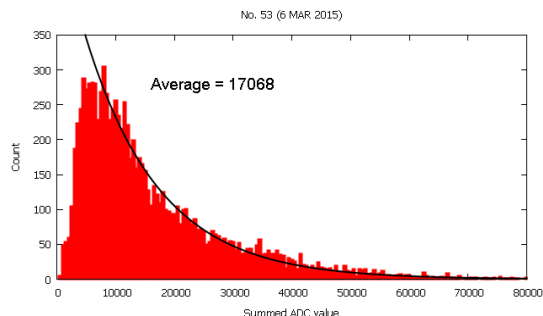


図6 光パイプ無し検出器のスペクトラム

図5は光パイプを持つ新しい検出器のスペクトラムであり、図6は光パイプがない検出器のスペクトラムである。両者間には有意な相違は見られず、光パイプによる減衰効果は確認できない。この理由として、発光が光パイプとシンチレータの接触面で発生するため光反射による減衰効果が小さい事、発生面から受光面までの距離が0.5 mmと短い事が考えられる。

#### (4) 今後の展開

本研究で採用した検出器構造による検出効率の向上は現時点では期待値より低い。これは光パイプが期待通りに形成されていないことが原因と考えている。2次元検出器へ応用するためにはさらなる微細化が必要である。そこで、今後はさらなる微細化と光パイプ形状のばらつきを減らす製作方法の研究開発を進める。

#### 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

塗布技術を用いた中性子検出器の試作,  
 内田 智久, 池野 正弘, 身内 賢太郎,  
 島崎 昇一, 田中 真伸, 田中 秀治, 第  
 62回 応用物理学会春季学術講演会,  
 2015年3月, 東海大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

内田 智久 (UCHIDA, Tomohisa)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
 核研究所・准教授

研究者番号: 40435615

##### (2) 連携研究者

田中 秀治 (TANAKA, Shuji)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
 核研究所・准教授

研究者番号: 80311124

田中 真伸 (TANAKA, Manobu)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
 核研究所・教授

研究者番号: 00222117