

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740173

研究課題名(和文)次世代光増幅素子の飛躍的な性能向上と革新的撮像型サーベイメータへの応用

研究課題名(英文)Development of imaging radiation survey meter using silicon photomultipliers

研究代表者

中森 健之(Nakamori, Takeshi)

山形大学・理学部・准教授

研究者番号：30531876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：半導体光センサMPPCを用いたシンチレーション検出器を開発した。MPPCの出力信号波形を高速サンプリングし、波形解析処理を行うことでエネルギーしきい値を下げる事ができた。微細加工シンチレータアレイを用いてピンホール型ガンマカメラを制作し、撮像に成功した。空間分解能は2度程度であった。MPPCを可搬型装置に搭載し屋外で使用するために、環境温度に応じて動的に印加電圧を変える電源モジュールを導入し、0 から50 の範囲でMPPCの増幅率を維持することができた。高放射線量場での長期間使用を想定し、ガンマ線耐性を強化したMPPCを開発した。

研究成果の概要(英文)：We developed a scintillation detector using a semiconductor photon sensor, MPPC. We analyzed wave forms from the MPPC recorded by a fast analog memory chip. With offline signal processing, we demonstrated energy threshold was improved. We fabricated a pin-hole type gamma-ray imager using a fine scintillator array and a monolithic MPPC array. We successfully detected the gamma-ray source position with an angular resolution of 2 degree. We also employed a high voltage power supply module which controls output voltage along with the circumstance temperature, in order to keep the gain of MPPCs. We confirmed the module worked in our system as expected from 0 to 50 degrees. Finally we developed radiation-hardened MPPCs aiming for long-term usage of MPPCs in high radiation fields as the radiation monitor.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：放射線検出器 MPPC

### 1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の事故により、国内の広範囲にわたって放射性物質が拡散する事態となってしまった。福島県を中心に各地で実施されていた除染作業を効率化するためには、環境中での放射性物質量の分布を可視化する技術が必要であった。また当時は首都圏でも局所的に高い空間線量率を示す「ホットスポット」がしばしば発見されており、ガンマ線カメラの社会的ニーズが高まっていた。

光検出器は現代の物理学実験において不可欠な装置であり、特に素粒子・原子核が媒質中で起こす発光現象(シンチレーション光、蛍光、チェレンコフ光)を通じた間接的な粒子検出に幅広く利用されている。これまで最も成功を収めた光検出器は光電子増倍管(PMT)であり、信号を100万倍に増幅する能力と1ナノ秒程度の時間分解能を持つ。一方でガラス管がかさばること、1000Vを越える高圧を必要とすること、強磁場中で動作しないことなど使用上の制約も多い。現在までも半導体(テルル化カドミウム等)やシンチレータとPMTを用いたガンマ線カメラが開発されてきているが、前者は有感領域の薄さゆえの検出効率の低さが弱点であり、後者はPMTゆえの取り扱いの難しさとコストがネックであった。

MPPC(multi-pixel photon counter)は多数の微細なアバランシェ・フォトダイオード(APD)を並べてガイガーモードで利用するもので、入射光子数に応じた数のAPDがガイガー放電することにより発生する電荷量から光子を計数する。PMTに匹敵する高いゲインを持ち、APDと比べるとノイズの影響を受けにくい。単素子で0.1ナノ秒の優れた時間分解能を達成した報告もあり、APDの長所(半導体ゆえの細かいピッチ、耐磁場特性、100V以下の低電圧動作)を継承しつつ次世代化を促進する、現状では唯一の検出器と言える。MPPCを採用したサーベイメータ(ただし非撮像型)は浜松ホトニクスから当時プレスリリースされたばかりであり、今後の発展が強く期待されていた。一方で開発の歴史が浅いこともあり問題点もある。その最たるものが熱電子由来のダークカウント、アフターパルス、クロストークと言った、本来読みだすべき信号に混ざってしまう雑音である。

これらの雑音は真の信号に同期するものとしれないものがあるが、いづれも真の信号と信号波形の見かけ上は区別がしにくい。信号波形を記録しオフラインデータ解析によって真の信号の寄与だけを選び出す手法が、素粒子・原子核・宇宙線実験分野では研究されてきた。その手法を適用することでMPPCの信号雑音を低減し、精度の高いシンチレーション検出器を構成することが期待された。

### 2. 研究の目的

次世代型半導体光センサーMPPCは従来用いられている光電子増倍管(PMT)に匹敵する内部増幅機能を持つ新しい素子であり、世界中で注目・研究されている。しかし、主に熱電子由来の雑音が多いために扱いが難しく、特に時定数が長いシンチレータの微弱光検出において素子の性能を十分に引き出すことができていない。

本研究では、最新の大面積MPPCの波形を安価・小型な高速サンプリング回路を用いて取得し、詳細な波形解析によって雑音を排除する手法を構築する。シンチレーション検出器のエネルギー閾値の低下とエネルギー分解能向上を実証し、応用としてガンマ線カメラの基礎開発を行う。

また高い空間線量場で長期に使用した場合に、MPPC素子そのものがガンマ線によってダメージを受け、性能が劣化する可能性があった。従来品よりもガンマ線照射耐性を強化した素子を制作し、実用上問題ない耐性を持つことを実証する。

### 3. 研究の方法

安価・低消費電力の高速波形記録チップDRS4で取得した詳細波形を解析することにより、MPPCを用いたシンチレーション検出器のエネルギー閾値低下とエネルギー分解能向上を実証する。

MPPCに対して複数の波形解析手法をシンチレータ読み出し測定に適用する。一つは信号のタイミングに同期した固定時間幅に含まれる電荷量を積分する方法であり、もう一つは信号の大きさによって積分する時間幅を動的に変える手法である。後者では波形データから信号のピーク位置を検出し、ノイズレベルよりも有為に高い波高を示す範囲を求める。ジッタの影響を抑えるためにデジタルフィルタを用いて高周波成分を抑え、その後ピーク値を検出する手法も併せて検討する。これらを比較検討し、より有効な手法を決定する。

GAGGシンチレータアレイと4×4MPPCアレイを組み合わせる。MPPCアレイは抵抗分割方式によって4チャンネルで読み出し、読み出された電荷量の重心演算によって入射位置を再構成する。タンゲステン樹脂シートでコリメータを製作し、ピンホール型ガンマ線カメラを組み上げる。スペクトル計測と到来方向の識別ができることを実証する。

可搬性のある装置にMPPCを組み込んだ場合、小型の高圧電源が必要となると同時に、環境温度によって増幅率の変わるMPPCに対して、動的に印加電圧を変えることによって一定の増幅率で動作させる必要がある。そのため浜松ホトニクス製小型電源モジュールを採用する。MPPCの増幅率を一定にするために印加すべき電圧を関数としてあらかじめ調べたのち、電源モジュールにシリアル

通信で関数のパラメータを書き込む。恒温槽中で MPPC を動作させたとき、温度に依らず増幅率が一定に保たれることを実証する。

コバルト 60 ガンマ線照射施設において、従来型 MPPC と放射線耐性強化型 MPPC の試作品複数をそれぞれ 10 krad, 100 krad のガンマ線照射を行う。照射前後での暗電流の印加電圧依存性を計測する。降伏電圧の変化が起きないことと、暗電流の増加率とその時間変化を調べる。

#### 4. 研究成果

3mm 角 MPPC に GAGG シンチレータを光学接合し、137 セシウムのガンマ線を照射した。信号波形は 1 GHz のサンプリングレートで記録した。前掲の 3 種類のアルゴリズムを用いてエネルギースペクトルを算出した。その結果、固定幅積分法が最も S/N 比が悪いことが分かった。動的な積分幅を採用する方法と、デジタルフィルタを掛けたのちにピークサーチする方法では両者とも遜色ない結果となった。また 137 セシウムに付随するバリウムの 32 keV 特性 X 線 (K-) を検出することが可能であることを実証した。また  $3 \times 3 \times 10 \text{ mm}^3$  の LYSO シンチレータと 3 mm 角 MPPC を接合し、カドミウム 109 の 22 keV ガンマ線スペクトル形状から、エネルギーしきい値が低下していることを、より明らかな形で確認した (図 1)。

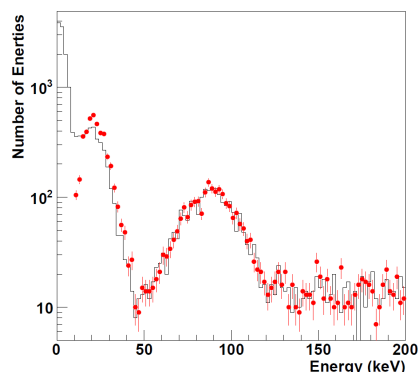


図 1 カドミウム 109 のスペクトル。黒が固定幅積分法、赤が動的積分法。

0.5mm 角に切り出した GAGG シンチレータアレイと  $4 \times 4$  MPPC アレイを接合した。シンチレータの上面から 14 mm の位置に、鉛と等価のガンマ線阻止能をもつタングステン樹脂シートの 3 mm 厚のものを設置し、中央に直径 1mm の穴を開けたものをピンホールとした。タングステンシートから 22 mm 上の面でコバルト 57 線源の位置を移動させた。4 端子から読み出された電荷量のスペクトル (図 2) から、122 keV に対応するイベントのみを取り出し、入射位置の再構成を行ったところ、線源位置の移動に伴って、検出位置も移動していた (図 3)。その結果、視野角が  $40^\circ$  程度のピンホールカメラとして動作していることが分かった。また再構成された像を 2 次元

ガウシアンでフィットすることにより角度分解能を評価したところ、視野中の位置の依存性は小さく、FWHM で  $2^\circ$  程度であることが分かった。

さらに、このピンホールカメラの視野中にコバルト 57 線源と 241 アメリシウム線源を同時に置いたときの撮像実験を行った。得られたエネルギースペクトルから、122 keV と 60 keV のエネルギーをそれぞれ切り出すことによって、2 つの線源の位置が明確に識別できることを確認した。

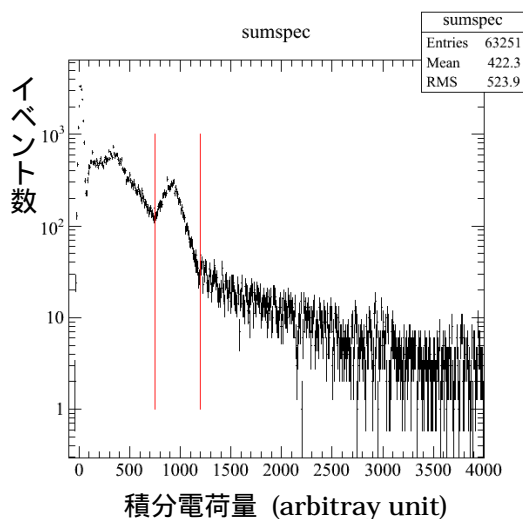


図 2 ピンホールガンマカメラで取得したコバルト 57 のスペクトル。赤線の間にあるイベント (122 keV 相当) を画像再構成に用いた。

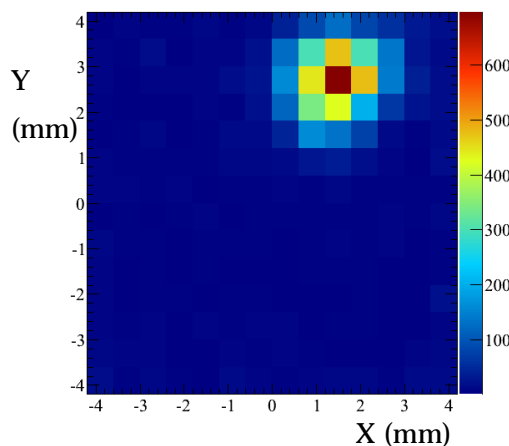


図 3 ピンホールガンマカメラで撮像したコバルト 57 線源。縦横軸は検出器面上での長さ。

3mm 角 MPPC を恒温槽中で 0 から 50 まで変化させ、印加電圧と増幅率の関係を調べた。そして、増幅率を  $6 \times 10^5$  に維持するためには、温度と印加電圧の関係は線形であることが分かった。次に、浜松ホトニクス製の MPPC

電源モジュールと温度センサを接続し、PC と UART 通信経路を制作し、通信ソフトウェアを作成した。上記実験で得られたパラメータを書き込むことによって、温度センサの出力に応じて適切な電圧が出力されていることを確認した。そして電源モジュールと MPPC を接続し、0 から 50 の間で増幅率が 10%未満ずれに抑えられていることが分かった(図 4)。

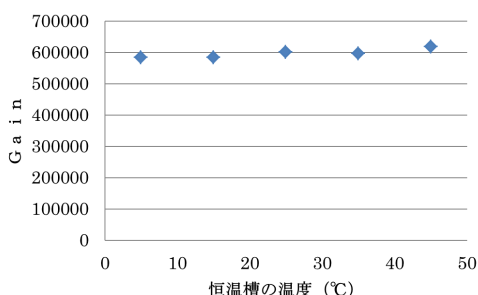


図 4 電源モジュールを用いたときの、温度変化に伴う MPPC の増幅率の変化。

東京工業大学のコバルト 60 ガンマ線照射施設において、従来型 MPPC と放射線耐性強化型 MPPC の試作品 5 種をそれぞれ 10 krad, 100 krad のガンマ線照射を行った。照射前後での暗電流の印加電圧依存性を計測した(図 5)。100 krad のガンマ線照射の後でも、暗電流が急激に増加する降伏電圧は照射前後でほとんど変化しないことが分かった。また降伏電圧以下では暗電流が 1 桁以上増加したが、動作電圧付近ではより低い増加率に抑えられていることが分かった。ガンマ線照射は素子表面を損傷してリーク電流が増加するが、降伏電圧を超えると内部増幅を受けた成分が暗電流で支配的となる。そのため増加率が小さくなると考えると説明できる。10 krad 照射サンプルでは従来品で 2.5 倍程度、強化品では 1.2 倍程度にしか暗電流が増えないことが分かった。また 100 krad 照射品の結果は、従来品で約 10 倍、強化品で約 3 倍という結果であった。素子の個性を考慮すると、およそ照射量に線形な増加傾向があることが分かった。また時間変化については、照射後 2 時間程度で急速に低下していき、その後はほぼ変わらないという結果を得た。

実際に現場で使用することを考えたときには、本照射実験のように一度に大量にガンマ線を浴びるのではなく、より低い線量を定期的に浴び続けることになる。10 krad は 0.1 mSv/h の線量場に約 40 日滞在することと等しい。100 krad では 1 年間に相当する。100 krad を浴びて暗電流が 3 倍になった場合でも、セシウム 137 の 662 keV ガンマ線のエネルギー分解能にはほとんど影響を与えない。一方エネルギーしきい値は上昇することになる。MPPC の暗電流は 1 光電子相当の信号(ダークカウント)の長時間平均とみなすことができ、

照射後のダークカウントレートは 2 MHz 程度である。このレートにまで上昇すると、32 keV の撮像には問題が生じ、検出位置分解が難しくなることが分かった。

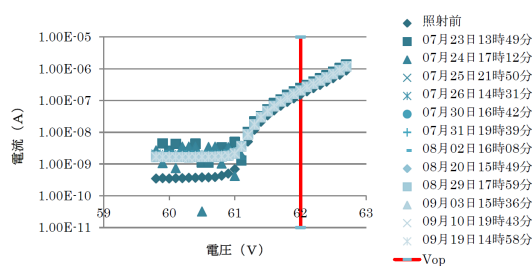


図 5 10 krad を照射した、ガンマ線耐性強化 MPPC の印加電圧と暗電流の関係。赤線が動作電圧を示す。

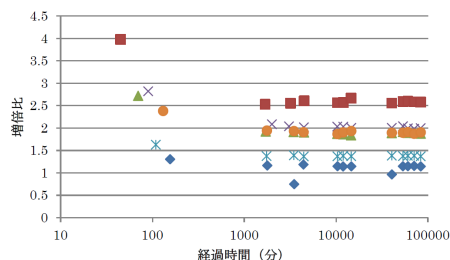


図 6 10 krad を照射した MPPC の動作電圧における暗電流増加率の時間変化。マーカの違いは素子の種類を示す。J1 が従来比、その他が改良品。

## 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)

[学会発表](計 1 件)

T. Nakamori, "Development of radiation-hardened MPPCs", 2013 年 7 月 2 日-2013 年 7 月 9 日, 33th International Cosmic-ray Conference, Centro de Convencoes Sulamerica, Rio de Janeiro, Brazil

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中森 健之 (NAKAMORI, Takeshi)

山形大学・理学部・准教授

研究者番号: 30531876