

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340061

研究課題名（和文） 地上ガンマ線望遠鏡のための次世代 PPD カメラの開発

研究課題名（英文） Development of the next generation of PPD camera for the ground based gamma-ray telescope

研究代表者

西嶋 恭司 (NISHIJIMA KYOSHI)

東海大学・理学部・教授

研究者番号：40202238

研究成果の概要（和文）：3 mm×3 mm(50μm) MPPC の基礎特性を調べた結果、温度特性として $-3.1 \times 10^4 / ^\circ\text{C}$ が得られた。また、ダークノイズを主とするノイズレートは、超過電圧、温度に依存していること、クロストーク発生確率の超過電圧特性は指数関数と一次直線の和で表せること、クロストークとアフターパルスの和の発生確率の超過電圧特性は温度に依存しないことなどが確かめられた。3 mm×3 mm(50μm) MPPC を 4×4 並べたディスクリートアレイ 4 個でプロトタイプカメラを作成し、小型の大気チェレンコフ望遠鏡で観測を試みたが、チェレンコフ光を検出することに成功しなかった。理由として、MPPC 信号のパルス幅に比べてトリガーレートが高過ぎたことが上げられる。

研究成果の概要（英文）：We studied the basic characteristics of MPPC (3 mm×3 mm size, 50μm pitch), and found that the temperature characteristics of the gain is $-3.1 \times 10^4 / ^\circ\text{C}$, noise rate depends on both overvoltage and temperature, cross talk probability as a function of overvoltage is expressed by a combination of exponential function and linear function, and the sum probability of cross talk and after pulse don't depend on the temperature. Then we built prototype camera for an atmospheric Cherenkov telescope, which consist of 4 discrete arrays of 4ch by 4ch MPPCs (3 mm×3 mm size, 50μm pitch). We didn't succeed to detect atmospheric Cherenkov image mainly due to higher trigger rate compared to pulse width of MPPC signals.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011 年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2012 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理学

キーワード：宇宙線（実験）

1. 研究開始当初の背景

地上大気チェレンコフ望遠鏡技術の進歩により、超高エネルギーガンマ線天文学とい

う新しい分野が驚くべき勢いで確立されつつあった。一方で Fermi Gamma-ray Space Telescope が予想通り素晴らしい成果を出し

始め、X線や電波なども含めた多波長観測により、粒子の加速機構や宇宙線の起源など宇宙における高エネルギー現象解明への期待が高まってきた。しかしながら、これらの謎にさらに迫るためには、TeVエネルギー領域で現在の最高感度の望遠鏡より一桁低いmCrabフラックスまで感度を向上させることが必要で、そのためには必然的に装置を大型化せざるを得ない。しかしながら、装置の大型化には限界があるうえ、口径20mを超える場合、構造上カメラの軽量化が求められる。現在のカメラに使用されている光電子増倍管は、応答が速くフォトン1個から計測可能であるが、量子効率が最新のUltra Bialkaliタイプでもせいぜい40%程度で、この欠点を補いかつ軽量のフォトン検出器として、我々はSiPMと呼ばれる半導体デバイスに注目した。

SiPMは、複数のガイガーモード・アバランシェ・フォトダイオードのピクセルからなり、検出効率が理論上ピーク波長で~80%と高く、軽量で高電圧が不要な優れたフォトンカウンティング検出器である。すでに数社でSiPM検出器が製品化されており、受光面積が3×3mm²のものまで入手できるが、その多くは感度のピーク波長が、我々が必要とする400nmよりはるかに長い500nm以上にあり、さらにその検出効率が10数%と極めて低い。これらに対して浜松ホトニクス社が開発したMPPC (Multi-Pixel Photon Counter: 浜松ホトニクス社製SiPMの商品名)は、感度のピーク波長が、我々が最も必要とする400nmにあり、最大検出効率65%を実現しており、有効面積が3×3mm²のデバイスも製品化された。SiPMは小さくても磁場中で動作できるという利点が生かせるということで、T2KやILC, JPARCなど日本の高エネルギー物理実験グループによりMPPCの共同開発が進められた。また、同じ理由によりPET(Positron Emission Tomography)など医療分野への応用も盛んに研究されている。このように、SiPMは幅広い分野で新しいフォトン検出器として期待されているが、宇宙線や宇宙物理学のようにある程度大面積を必要とする我々の用途で使用するには、市販されているSiPMではサイズが小さすぎる、クロストークやダークカレントレートが高いことなど改善すべき問題点が数多く存在している。この方面の先行研究で最も進んでいるのはMPI(Max-Planck-Institute für Physik)のグループであった。彼らは、MAGICやCTAなど大気チェレンコフ望遠鏡への応用を視野にMEPhi(Moscow Engineering Physics Institute)と共同で、すでに5×5mm²サイズの大型PPDの試作に成功し、性能テストを行っていた。しかしながら、得られた検出効

率はピーク($\lambda = 560$ nm)で30数%であり、感度波長、検出効率とも十分な成果が得られているとは言えない。一方、小型SiPMでクロストークの軽減に成功し、また、浜松ホトニクス社のMPPCを用いてチェレンコフ光を検出するテストにも成功している。そんな中、我々も浜松ホトニクス社の優れた半導体技術に目をつけ、1×1mm²サイズMPPCの特性評価を行ってきた。そこで本研究では、浜松ホトニクス社の優れたデバイス技術にMPIのPPD開発経験を生かし、MPIと技術的な面で協力し合いながら、CTA、AGIS、PeV Explorerなどの次世代大気チェレンコフ望遠鏡のためのSiPMカメラのプロトタイプを開発することを目指した。

2. 研究の目的

SiPMは、その高い検出効率だけでなく、高ゲインでフォトンカウンティング可能であること、低いバイアス電圧で動作するため高圧電源が要らないこと、コンパクトで低コストであること、などイメージングカメラデバイスとしては非常に魅力的である。しかしながら、高いダークカレントレート(常温で > 1 MHz/mm²)やクロストークの問題があり、しかもそれらはゲインやフォトン検出効率とトレードオフの関係にある。これらの基礎特性については、浜松ホトニクス社の1×1mm² MPPCで我々も確認済みである。そこで本研究では、目標ゲインを 5×10^6 に設定し、5×5mm²サイズMPPCでダークレートを常温で数kHz/mm²以下(場合によっては冷却検討)を実現し、このMPPC 2×2のレイユニット(100mm²)を製作し、検出効率65%($\lambda = 400$ nm)以上を目指した。このレイユニットを64個(8×8)並べ、ウinston・コーンタイプのライトガイドでユニット間の不感スペースをカバーすることにより有効面積を25%増加させた、64ピクセル80cm²のプロトタイプSiPMカメラを完成させる予定であった。

大気チェレンコフ望遠鏡のイメージングカメラに使われている光電子増倍管に代わって、ハイブリッドフォトン検出器やUltra Bialkali PMT等の開発が盛んに行われているが、口径20mを超えるF値1.2の大気チェレンコフ望遠鏡では、PMTで構成されるカメラでは重くなり過ぎて難しいかもしれないと考えられている。本研究では、大型化が難しいとされているSiPM検出器を、レイユニットにして受光面積を拡大することにより、この分野に始めて導入することを目指してプロトタイプの開発を開始した。そのために、半導体デバイスの質の高さでは世界的に定評があり、感度のピーク波長とその検出効率がすでに実証されている浜松ホトニクス社のMPPCを採用し、その技術者の協

力と、先行している MPI チームの経験を生かした国際協力を積極的に推し進める。もし実用化に成功すれば、次世代大気チェレンコフ望遠鏡を CTA や AGIS で計画されているように大型化しなくても、より小さくて安価な望遠鏡で、目標とされている性能、例えば超高エネルギーガンマ線のエネルギー閾値を 10-20 GeV まで下げ、1 TeV 領域では m Crab レベルの超高感度を実現することが可能となる。また、高電圧電源も不要で軽量、省エネであるため、例えばブレーザーモニター専用大気チェレンコフ望遠鏡などを安価に各地に展開することが可能になる。さらに、宇宙物理学に留まらず、高エネルギー物理実験や医療・生命科学等他分野への大きな波及効果が期待できる。

3. 研究の方法

(1) 大型 SiPM(MPPC)の開発

大気チェレンコフ望遠鏡のカメラは、例えば現在計画されている最大口径 25 m で F1.2 クラスの場合、最適とされる $0.05\text{-}0.1^\circ$ のピクセルサイズは直径約 3~5 cm に対応する。MPPC 単体でそこまで無理でアレイ化するにしても、なるべく大きい素子の開発が必要である。そこで、これまでの小型 MPPC の基礎特性評価の実績を基に、さらに大きな面積の $5\times 5\text{ mm}^2$ サイズ MPPC の開発を行う予定であった。海外ではすでに $5\times 5\text{ mm}^2$ サイズ SiPM の試作に成功している例はあるが、先にも書いたとおりその性能は全く不十分で実用的でない。そこで、浜松ホトニクス社の MPPC 技術で、検出効率、感度波長領域、ダークノイズレート等で、これを凌駕する MPPC を開発することを目指した。しかしながら、実際には $5\times 5\text{ mm}^2$ サイズの安定した性能の MPPC を作成することは、浜松ホトニクス社の協力を得ても非常に困難で、本研究でも $3\times 3\text{ mm}^2$ サイズ MPPC を使用することになった。

評価する重要な基礎特性パラメータとして、降伏電圧、ゲインとそのバイアス電圧特性および温度特性、ダークノイズレートとそのバイアス電圧特性および温度特性、クロストークとアフターパルス、それに検出効率とその波長依存性、信号分解能、時間分解能、回復時間、などを測定した。特に各パラメータの温度依存性に注目して評価した。

(2) プロトタイプカメラの製作

当初 $5\times 5\text{ mm}^2$ サイズ MPPC4 個を 2×2 に同一基板上にほぼ隙間なく配置したモノリシックアレイを作成し、1.2mm 間隔で 8×8 の格子状に並べてプロトタイプカメラを製作する予定であった。しかしながら前述したように $5\times 5\text{ mm}^2$ サイズの作成が間に合わなかったため、 $3\times 3\text{ mm}^2$ サイズ

MPPC を 4 個 $\times 4$ 個配置したディスクリートアレイを採用することに決定した。このアレイを 16 個並べて $2,304\text{ mm}^2$ の受講面積を実現することを目指した。実際には後述する読み出し回路が 64 チャンネル分しか間に合わなかったため、このアレイを 4 個並べてカメラを作成した。ディスクリートアレイを採用したため、ウィンストン・コーンタイプのライトガイドを用いてデッドスペースをなくすことを考えたが、工作上の問題で断念した。また、ダークカレントを抑え、ゲインの温度変動を補償するために、MPPC アレイの裏面にペルチェ素子を取り付けて冷却すること、温度補償回路を導入することも考えたが、いずれも今後の課題として残った。

カメラ筐体はアルミ製で、望遠鏡に固定の外箱と、メンテナンスや交換時に出し入れ可能な内箱に分離させた。内箱の焦点面には、MPPC を 256 チャンネルまで増設可能なように設計されている。また、読み出し回路（後述）は内箱に配置し、回路の電源、バイアス電源、データ読み出し用 LAN ケーブルが外部に出ている。

(3) 多チャンネル同時読み出し回路の設計と製作

これからの大気チェレンコフ望遠鏡カメラでは、ピクセル数が 1000 を超え、しかもガンマ線によるチェレンコフ光信号は継続時間が非常に短いため、高速の読み出し回路が必要となる。本研究では、カメラから送られてくる多チャンネルのアナログ信号を同時処理する、低消費電力で高速動作かつ低コストの 32 チャンネルの回路モジュールを設計・製作する必要があったが、SPIROC-A 改め EASIROC ボードを採用した。このボードはフランスの LAL 研究所で開発された ASIC をベースに東北大学、KEK などとともに開発したもので、32ch の MPPC に対してバイアス電圧を供給し、信号を SiTCP カードを通して読み出せる。このボードをカメラ筐体内部の MPPC のすぐ後ろに配置した。

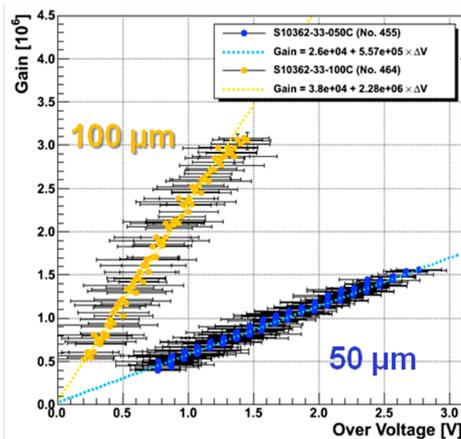
(4) 大気チェレンコフ光による応答試験

作成したプロトタイプ SiPM カメラを東京大学宇宙線研究所明野観測所の小型チェレンコフ望遠鏡に取り付け、実際の大気チェレンコフ光子に対する応答性を評価した。まずは、遠鏡を用いないで夜光を直接曝露し、カメラと読み出し回路全体の動作確認を行った。続いて、大気チェレンコフ望遠鏡を用いて、大気チェレンコフ光の検出を試みた。

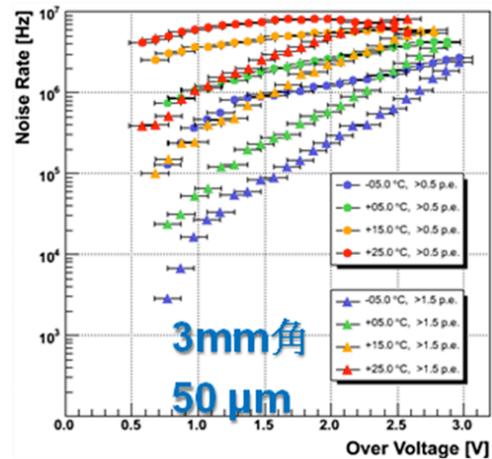
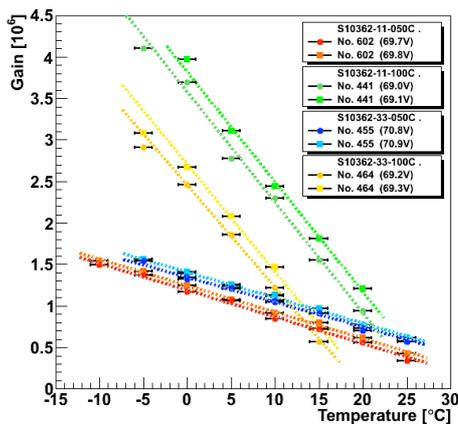
4. 研究成果

(1) MPPCの基礎特性評価

浜松ホトニクス社製 3 mm×3 mm MPPCの基礎特性を調べた。バイアス電圧を固定した場合のゲインの温度特性は、50 μm ピッチに対して、 $-3.1 \times 10^4 / ^\circ\text{C}$ 、100 μm ピッチに対して $-1.3 \times 10^5 / ^\circ\text{C}$ と得られた。例えば 10^6 ゲインで使用する場合、 1°C の温度変化に対して、50 μm ピッチタイプで約3%のゲイン変動に収まるが、100 μm ピッチタイプの場合にはその変動がおよそ 13%に達するため、かなり厳密な温度コントロールを行うか、あるいは温度補償回路の使用が不可欠であることがわかった。

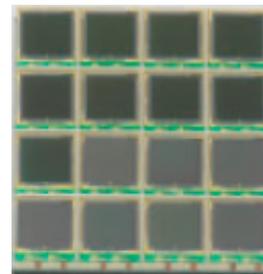


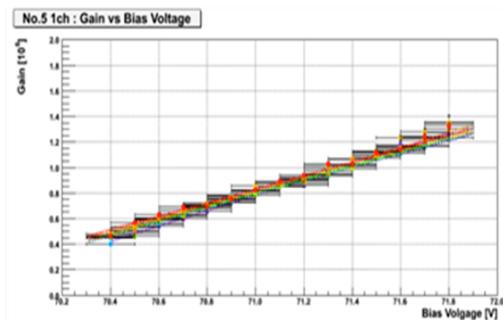
温度をパラメータにしたノイズレートの超過電圧特性の測定結果の1例を図に示す。ダークノイズを主とするノイズレートは、超過電圧、温度、ピクセルサイズに依存していること、クロストーク発生確率はピクセルサイズに依存し、超過電圧特性は指数関数と一次直線の和で表せること、クロストークとアフターパルスの和の発生確率の超過電圧特性は温度に依存しないことなどが確かめられた。



2×2 モノリシックアレイの基礎特性を試験し、ゲインのバイアス電圧特性と温度特性を調べた。絶縁破壊電圧は、個体により 0.1V 程度の違いがあるが、同じチップ上のチャンネル毎の差は 0.1 V 以下で十分そろっている。温度依存性は平均で $5.6 \times 10^{-2} / ^\circ\text{C}$ 、チップ間の差は 3%程度でチャンネル毎の差は 2%程度以下であった。その結果としてゲインの超過電圧特性は温度によらずほぼ一定で $6.0 \times 10^5 / \text{V}$ であり、チップ間、チャンネル間のばらつきとも 2%以下という安定した結果が得られた。ゲインの温度特性は、70.3V のバイアス電圧に対しておよそ $-3.0 \times 10^4 / ^\circ\text{C}$ と得られ、これは、 10^6 ゲインに対して約 3%/ $^\circ\text{C}$ の変動幅に対応する。

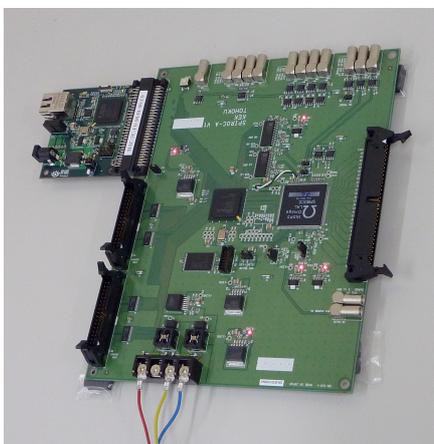
プロトタイプカメラに用いる 3mm×3mm(50 μm ピッチ)MPPCの4×4ディスクリートアレイの特性評価を行った。ゲインのバイアス電圧特性はほぼリニアで、平均 $5.5 \times 10^5 / \text{V}$ であった。また、チャンネル間の特性の差は最大でも10%以下であり、モノリシックアレイとの顕著な差は見られなかった。ゲインの温度特性は、 10^6 ゲインでの動作時で 3% deg^{-1} であり、その他特性も含めて単体の 3mm×3mm(50 μm ピッチ)MPPCと同等であった。ノイズレートは、0.5フォト閾値の場合常温で2~3 MHzあり、温度によって一桁以上の差がある。





(2) 夜光暴露試験

夜光の暴露試験の結果、視野の広さにもよるが、夜光のレベルとダークカレントのレベルは似たオーダーで、大気チェレンコフ望遠鏡の焦点カメラとして実用化するためには、大型MPPCにおいては時間分解能の改善が必要であることが明らかになった。



(3) 読み出し回路の性能試験

EASIROCボードを2枚作成し、基本的な動作試験を行った。単体のMPPCの信号をセルフトリガーで問題無く読み出すことができ、ADC分布を取ることができた。

(4) プロトタイプカメラの性能評価

東京大学宇宙線研明野観測所で、夜光に暴露する試験をした。さらに、明野観測所に移設された小型チェレンコフ望遠鏡を用いて、その焦点面にこのカメラを取り付け、そのレスポンスを調べた。カメラをそのまま夜光に暴露した状態では正常に動作し、信号をきれいに記録することができたが、残念ながら、望遠鏡の焦点面に取り付けた状態では、集光された夜光量が多く、トリガーを工夫してもDAQレートが数 kHzから下がらず、EASIROCボードによるDAQが追いつかない状況で、カメラ面上にチェレンコフイメージを得ることができなかった。課題として、今回月明かりの影響が残っていたが例えそうでなかったとしても、EASIROCボードの大気チェレンコフ

望遠鏡への採用は、そのトリガーの作り方などかなり工夫が必要で、今のままでは相当厳しいことがわかった。また、MPPCの信号自体もその幅が数十 nsec以上あり、大気チェレンコフ望遠鏡への応用のためには、この幅を格段に狭める必要がある。

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 18 件)

- ① Y.Mizumura, J.Kushida, K.Nishijima, K. Kodani, et al., Searchs for very high energy gamma rays from blazars with CANGAROO-III telescope in 2005-2009, *Astropart.Phys.*, 査読有, 35, 2012, 563-572, 10.1616/j.astropartphys.2012.01.002

[学会発表] (計 56 件)

- ① 佐々木浩人、CTA 大口径望遠鏡カメラ構造、日本物理学会第 68 回年会、2013 年 3 月 26 日、広島大学
- ② 梅原克典、CTA 大口径望遠鏡用焦点面検出器の開発、日本物理学会 1012 年秋季大会、2012 年 9 月 13 日、京都産業大学
- ③ 榎田淳子、CTA 大口径望遠鏡の焦点面検出器の開発、日本天文学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 22 日、鹿児島大学
- ④ K. Kodani, Measurement of the basic properties of the Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) as a photon counting device for the future IACTs, the 32nd International Cosmic Ray Conference, 2011 年 8 月 13 日、Pullman Beijing West Wanda (China)
- ⑤ 米谷光男、CTA 焦点面検出器の開発、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 25 日、新潟大学
- ⑥ 若塚昌彦、地上ガンマ線望遠鏡への応用のための MPPC の夜光に対する応答、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 25 日、新潟大学
- ⑦ 折戸玲子、CTA 焦点面検出器の開発、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 11 日、九州工業大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西嶋 恭司 (NISHIJIMA KYOSHI)
東海大学・理学部・教授
研究者番号：40202238

(2) 研究分担者

榎田 淳子 (KUSHIDA JUNKO)
東海大学・理学部・准教授
研究者番号：80366020
吉村 浩司 (YOSHIMURA KOJI)
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：50272464

(3) 連携研究者

梶野 文義 (KAJINO FUMIYOSHI)
甲南大学・理工学部・教授
研究者番号：50204392
佐々木 修 (SASAKI OSAMU)
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：30178636
中家 剛 (NAKAYA TSUYOSHI)
京都大学・理学研究科・教授
研究者番号：50314175