

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610054

研究課題名(和文) 新型半導体光増幅素子によるパルサーの高時間分解能可視光観測

研究課題名(英文) Development of an optical observation system using MPPCs for high time resolution

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) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：浜松ホトニクス社製1mm角MPPCを検出器として採用し、ペルチェ素子による冷却機構を組み込んだ検出器を開発した。外気温に対して20℃以上低い温度にセンサ部を冷却することができ、冬季の外気温環境下では1kHz以下の雑音レートとなり、カニパルサーの観測に要求される目標値が達成できた。0.5マイクロ秒の精度でMPPCのパルス検出時刻を測定する回路系を構築し、LEDによる周期信号の検出に成功した。データ収集系のシステムクロック精度が不定性の主たる要因であることが分かったため、GPSを用いた専用の時刻サーバを構築した。これらの開発により、観測体制が完成した。

研究成果の概要(英文)：We developed an optical photon detector employing 1 mm MPPC manufactured by Hamamatsu cooled by Peltier cooler. We demonstrated its cooling capability down to more than -20 degrees relative to the circumstance temperature. When we operate this system in winter, the dark count rate is reduced as low as 1 kHz, which is a system requirement for the detection of periodic signals from the Crab pulsar.

We also developed a timing measurement system for the MPPC with a time resolution of 0.5 microsecond. We successfully demonstrated period detection using LED flashes. During this experiment, we found the time accuracy is limited by the system clock of the data acquisition system. Then we developed a dedicated time server directly connected to a GPS receiver. Finally we completed the whole observation device and system.

研究分野：宇宙物理学(実験)

キーワード：パルサー 可視光 MPPC

### 1. 研究開始当初の背景

強い磁場を持つ中性子星が高速回転している天体パルサーは、電波からガンマ線に至る広い波長の電磁波を10から数100Hzの周期で放射している、宇宙の発電機とも呼ばれる非常に効率の良い加速器である。しかし粒子加速機構など放射を担う根本的なことが未だ決定的でない。申請者も参加しているミッションであるフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡は、2008年の打ち上げからこれまでに100を超えるガンマ線パルサーを発見し、体系的な理解が飛躍的に進展した(Abdo et al. 2010 他多数)。また2012年以降、超高エネルギーガンマ線望遠鏡によって100ギガ電子ボルトに至るまでカニパルサーの放射が伸びていることが報告されるなど、パルサーは今や宇宙物理において最も”ホット”な研究対象の一つである。その一方で、パルサーの可視光観測に関しては、電波はもとよりX線やガンマ線に比べて非常に少なく、主にMignaniやShibanov, Zharikovらのグループが精力的に観測を行っているに過ぎず、その数は10例程度である。特に、可視・赤外領域のパルス形状は、パルサー磁気圏の放射領域に制限をつけることができる強力なプローブとなる(Kisaka et al. 2011)が、観測に用いられるCCDは、天体からの光を時間積分して読み出しを行うため時間分解能に限界があり数ミリ秒程度に留まっている。

申請者は可視・近赤外に感度を持つ半導体光センサMPPCを無機シンチレータと併用した医療・環境計測用ガンマ線撮像検出器の開発に従事してきた(Kataoka et al. 2013, Nakamori et al. 2012 Kato et al. 2011 他)。MPPCはガイガーモードで動作する微細な半導体素子を2次元配列した集合体で、1光子の検出を可能とする高い内部増幅機能を持ち、1ナノ秒を切る時間分解能を持つ。半導体中の熱電子由来の雑音が生じるが、天体観測用のCCDと同程度に冷却すれば数100Hz程度にまで低減することができ、パルサーの周期的な信号を検出することは十分に可能だと期待された。

### 2. 研究の目的

本研究では可視光望遠鏡の焦点面に半導体光増幅素子MPPCを搭載する。中性子星「カニパルサー」から到来する周期的な可視光を数100マイクロ秒以下の精度で1光子ずつ検出することである。

### 3. 研究の方法

本研究は、センサ部の開発(以下の1-3)と光子到来時刻計測システムの開発(4-5)という2つの開発要素からなる。

(1) 浜松ホトニクス社製1mm角MPPCを検出器として採用し、ペルチェ素子による冷却機構を組み込む。この素子を1光子が検出できる増幅率で駆動した際に、熱電子由来の雑音レートが1kHz以下となるまで冷却できる

ことを確認する。

(2) 可視望遠鏡の光学性能、特に点源のスポットサイズを計測し、1mm角MPPCに収まることを確認する。

(3) 焦点面に冷却機構付きMPPCを搭載する治具を制作し、実際の観測環境において1光子検出が可能であることをLEDを用いた人工光源によって確認する。

(4) VME TDCによるパルス時刻計測システムを開発する。このシステムにMPPCを接続し、周期的に光らせたLED光の検出時刻測定を行う。得られたデータの周期解析を行い、パルサーの検出が原理的に可能であることを実証する。

(5) GPS信号を直接受信する絶対時刻サーバを構築し、時刻精度を評価する。

### 4. 研究成果

(1) 図1のように1mm角MPPCの読み出し基板を制作した。この基板の裏面にペルチェ素子を3枚直列に接続し、素子と基板の間を銅版と熱伝導グリスで接触させ、最外部はヒートシンクとファンで放熱する冷却システムを構築した。図2に構造の模式図を示す。

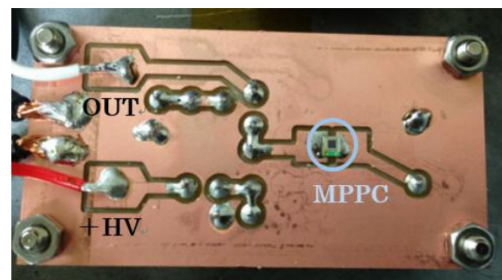


図1 製作したMPPC読み出し基板と実装された1mm角MPPC

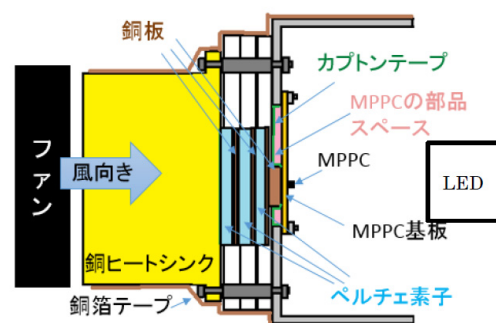


図2 MPPC冷却システム全体図(小松2014)

3つのペルチェ素子に印加する電圧の組み合わせを調べ、もっとも低温が実現する最適化を実施した。またMPPCの信号増幅率が温度依存性を持つことを利用し、温度センサを使用せずに、増幅率を1光子計測によって求めることにより、センサの温度を間接的に計測した。そのため、参照となる増幅率の温度依存性をあらかじめ環境試験機を用いて調査しておいた。冷却システムを駆動させたとき

に得られた信号増幅率の印加電圧依存性を図3に示す。冬季における実際の観測を想定し、環境試験機で気温を0°Cとして冷却システムを動作させたところ、-20°Cよりもさらに低温が実現できたことが分かった。

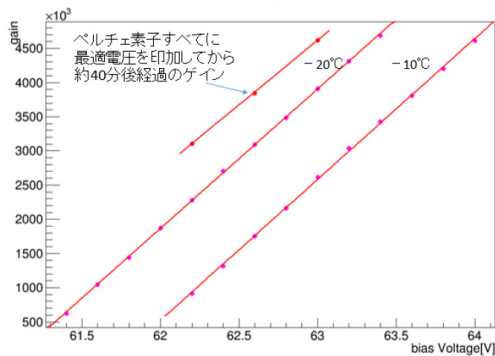


図3 MPPCの信号増幅率の印加電圧依存性。低温になるほど直線が左にシフトする(小松 2014)。

次に、上記で実現した冷却時における熱電子由来の雑音レートを調べた。あらかじめ既知の温度で調べた結果を比較したものを図4に示す。ペルチェ冷却によって目標とした約1 kHzにまで下げることができた。

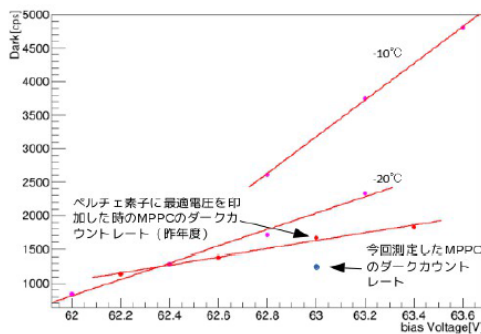


図4 熱雑音信号レートの印加電圧依存性(清水 2015)。温度が低いほど低下することが期待される。

(2) 観測に用いるミード社のACF光学望遠鏡を導入した。望遠鏡の焦点面に通常の天体撮影用CCDカメラを搭載し、恒星を撮影した。そのデータから、この望遠鏡のスポットサイズを見積もった。図5に「こと座」のγ星を撮影したデータを示す。露光時間は1 msである。CCDピクセルのサイズから、点源像の大きさを換算すると1 mm角のMPPC素子に対して十分小さく結像できていることが分かった。したがって、この望遠鏡を用いて研究対象となる点源「カニパルサー」を観測した際に、到来光子を漏らすことなくMPPC素子上に集光することが可能であることが示された。

(3) (1) で開発したセンサを望遠鏡に接続する治具を制作した。冬季の観測ドーム内気象環境において冷却システムを駆動させ、LED光を望遠鏡を経由してMPPCセンサに導入

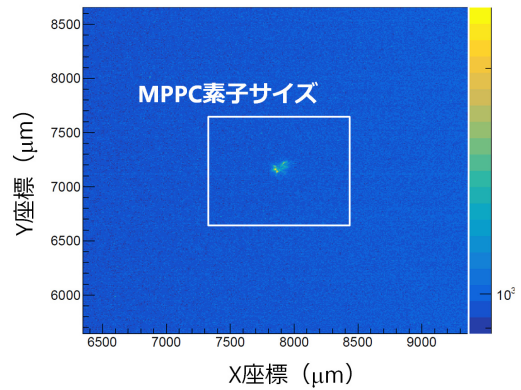


図5 恒星を撮影したCCD画像。点光源はMPPC素子に十分収まる大きさに結像できている。

した。MPPCの出力信号を計測し、ドーム内の電源環境でも目立った雑音は観測されず、実験室内と同等の1光子検出が可能であることを実証した。

(4) 豊伸電子社のVMEバス8チャンネルTDCを用いてパルス時刻計測システムを構築した。本研究の要求する時刻精度を大幅に上回る時間分解能を有する既製品のファームウェアを改造することにより、0.5マイクロ秒の時間分解能と2ミリ秒の計測ウィンドウで動作するモジュールを開発した。さらに既製品では各チャンネルで一度に1パルスしか時刻計測できなかった。上記の広いウィンドウの間に複数回の熱雑音パルスと天体光子由来の信号が出力されることが十分に起こり得るため、ファームウェアの改造により3つのパルス時刻を計測できるように開発した。この状態でも3つ以上のパルスが発生した場合に計測漏れが起こる。この問題を克服するため、MPPCの出力パルスをあらかじめ分岐させ、0.5から1ミリ秒遅延させたのちにTDCの各チャンネルに入力する測定系を図6のように構築した。TDCの各チャンネルが異なる時間帯の信号を、互いにオーバーラップして計測することになり、デッドタイムが実質的にゼロとなる測定が実現した。信号分配と遅延するディレイモジュールを制作した(清水 2016)。

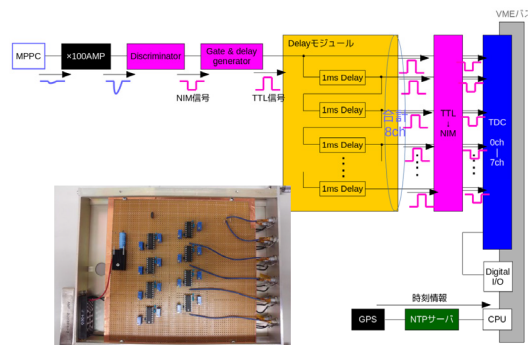


図6 時刻計測システムのブロック図と制作したdelayモジュール(清水 2016)



これらの開発した回路群を用いて、MPPC の出力パルス時刻計測システムが完成した。MPPC に「カニパルサー」と同じ周期でこれらの開発した回路群を用いて、MPPC の出力パルス時刻計測システムが完成した。MPPC に「カニパルサー」と同じ周期で明滅する LED 光を入射し、パルスの時刻計測試験を実施した。図 7 に示すように、パルスの検出時刻を、信号周期で畳み込むことによって、パルスの到来時刻に周期性があることを検出することに成功した。また周期を未知として周期を検出するソフトウェアも独自に開発し、同じ測定データを用いて動作を確認した。一方で、図 7 (右) を精査すると、周期パルスの検出時刻が 4-50 マイクロ秒程度の不定性があることが分かった。この主たる原因は、絶対時刻に換算するさいにデータ収集コンピュータのシステムクロックを参照しているためである。このコンピュータは ntpd によって国内の NTP サーバと時刻を同期しているが、遠隔地にある時刻サーバを参照している限り、この程度の時刻不定性は避けられないことは明らかであった。

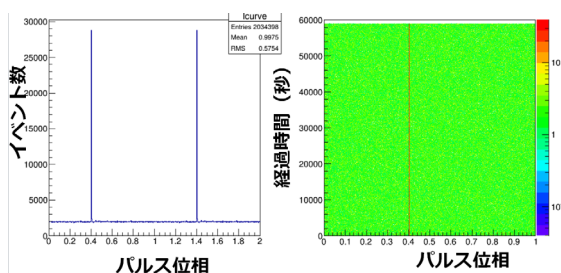


図 7 (左) 発光周期で畳み込んだ、光子検出タイミング分布。平坦に分布する、ランダムなタイミングで発生する熱雑音の中で、同じタイミングで発光する信号がとらえられている。(右) データ計測経過時間に対する畳み込み時刻分布。30 分以上に渡って安定して動作することを示した。

(5) (4) で得られた時刻精度は、当初の開発目標を達成していた。しかしデータ収集系の絶対時刻精度を向上させることは、より精度の高い観測につながるため、GPS アンテナとラズベリーパイを用いて独自に時刻サーバを構築した。間近に設置した時刻サーバと同期することにより、測定系の絶対時刻精度を向上させることを目指した。

GPS アンテナの PPS 信号をラズベリーパイ上で動作させた Linux カーネルに直接検知させることにより、マイクロ秒を切るレベルの精度を持つ時刻サーバを構築した。定期的に ntpq を実行して同期状態を監視したデータの一部を図 8 に示す。GPS 信号とシステム時刻のズレはマイクロ秒の桁で推移していることが分かった。このサーバを同一ネットワーク上に置いて参照することにより、パルス時刻の計測精度が向上することが期待される。

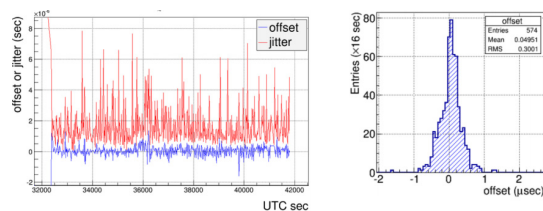


図 8 GPS を接続した Raspberry Pi 上の時刻精度の推移 (左) と offset の分布 (右)

(6) (1) から (5) で開発したコンポーネントを統合し、「カニパルサー」の観測体制が整った。検出器を望遠鏡に搭載した様子を図 9 に示す。「カニパルサー」は冬季に観測できる天体である。最終年度の冬に観測を実施する計画であったが、天候と月齢、設備使用可能期間のタイミングが合わず、実施することができなかった。本研究期間の終了後も観測に挑戦する。



図 9 山形大学天文台に搭載したパルサー時刻計測システム

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕 (計 1 件)  
「半導体光増幅素子 MPPC を用いたパルサーの高時間分解観測装置の開発」中森健之 他、日本天文学会 2015 年 3 月

〔その他〕  
研究代表者の指導による学位論文

- ① 「MPPC を用いた Crab パルサーの可視光観測システムの開発」、小松未侑、2014 年度山形大学卒業論文
- ② 「パルサーの光子到来時刻測定用 Delay モジュールの開発」、清水達也、2015 年度山形大学卒業論文

## 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