

次世代ガンマ線望遠鏡 CTA の大口径望遠鏡開発における較正用パルサー 開発

猪目 祐介 (甲南大学 宇宙粒子研究室)

Abstract

高エネルギー宇宙物理学の更なる発展を目指して、現在 Cherenkov Telescope Array(CTA) 計画と呼ばれる国際共同実験が進められている。当計画には世界約 30 カ国、1200 人以上が参加しており、大中小 3 種類の大きさの大気チェレンコフ望遠鏡を複数設置することで従来の 10 倍高い感度を達成させ、より広いエネルギー領域の高エネルギーガンマ線源を観測する計画である。日本グループが開発に関わっている大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope: LST) の焦点面検出器には、LST 1 台につき 1855 本の光電子増倍管 (PMT) が検出素子として搭載されるが、これらの PMT を揃えて動作させ一つの検出器として用いる必要がある。そのためには各 PMT に対して、増幅率や、不要なパルス発生率などを測定する性能評価を行い、その結果を用いて検出器として運用するための較正を行う必要がある。この性能評価に向けて我々は、1 ns 以下の超短光を低価格でありながら安定して出力できる光源の開発を行った。安価で高速動作可能な電子部品を用いて開発を行った結果、要求値を満たす 1 ns 以下の超短光を安定して出力可能なパルサーの開発に成功した。

1 研究の背景と問題点

世界最大級の大気チェレンコフ望遠鏡を開発する Cherenkov Telescope Array(CTA) 計画は現在、1 台目の大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope: LST) を建設する重要な時期に差し掛かっている。CTA の日本グループが関わっている LST の検出器に関しては、検出素子として使用する PMT について、同じ型番であっても個体毎に、増幅率や不要なパルスの発生率などが僅かに異なってしまう。性能評価としてこの個体毎の性能差を測定し、搭載する PMT が全て均一に振る舞うよう較正を行う必要がある。これにより検出素子毎の性能のばらつきが補正されるため、精度の向上が見込まれている (B.S.Acharya et al. *Astroparticle Physics* 43 (2011))。LST の観測対象となる大気チェレンコフ光は 1 ns 以下の速さで発光するため、それと同等かそれ以上の速さで発光する光源を用いなければ、実際の運用時と同じ状況での個体差を測定できない。しかしそのような超短光を出力可能な装置は高価であり、今回の性能評価のために購入することは困難であった。そのため我々は、PMT の性能評価用に高速パルサーの開発を行うことにした。

2 性能の要求値

今回開発を行うパルサーに要求される性能は、観測対象の大気チェレンコフ光の 1 ns より高速な短光を、安定した光量と時間幅で出力可能である事。また安価で製造が可能である事である。今回は性能評価に用いることを目的としているため、既製品のように発光の時間幅を自由に変更できるような汎用性は求めない事とした。

3 構成

開発を行ったパルサーの構造は図 1 及び図 2 に示すように、

1. 入出力ボード
2. トリガージェネレーターボード
3. パルスジェネレーターボード
4. 半導体レーザー

からなる。1 から 3 のボードは重ねて配置され一つのケースに収納されており、4 の半導体レーザーはパルサーと NIM-CAMAC 同軸ケーブルで接続される。

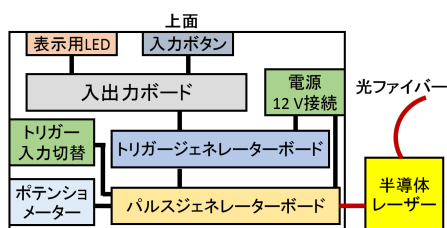


図 1: パルサー構造の断面図

3 - 1. 入出力ボード

入出力ボードは、パルサーが 1 秒間に短光を出力する周波数について、現在出力している周波数の表示と、周波数変更の操作入力を受け付けるボードである。後述のトリガージェネレーターボードと信号線及び 5 V 電源線で接続されており、表示する周波数信号と入力された操作信号はトリガージェネレーターボードで処理されている。図 2 のケース上面からボード上の表示用 4 桁 7 セグメント LED の確認とボタンの操作を可能とするため、3 つのボードの中で一番上に配置されている。

7 セグメント LED の表示には、4 ビット入力の 1 つの 7 セグメント LED ドライバと桁指定信号線を切り替えることで複数の桁を表示させるダイナミック制御を用いており、使用する信号線を抑えている。

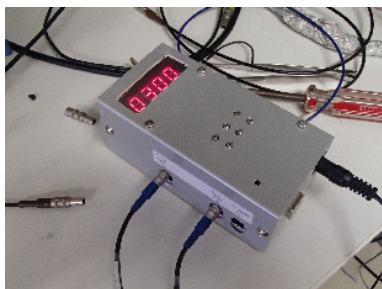


図 2: パルサー上部

3 - 2. トリガージェネレーターボード

トリガー信号について処理を行うボードであり、任意の周波数でトリガー信号の生成を行う他、入出力ボードの表示及び入力信号に対する処理も行う。生成するトリガー信号は TTL 信号に準じている。任意周波数のトリガー生成には、AVR マイコンと図 3 の Arduino uno 基盤 (Arduino, ArduinoBoardUno. (2014)), 上記の入出力ボードを用いてデジタル制御

とした事で、高い操作性と安定性を実現している。使用する ATmega328P (Atmel, ATmega328P. (2014)) は安価な AVR マイコンであり、16 MHz クロックで動作する。性能評価で使用が想定される周波数は、検出器に使用されているアナログメモリのダイナミックレンジにより最大 500 Hz 程度であるため、パルサーのトリガー周波数は 1 Hz から 1 kHz まで 1 Hz 刻みに設定可能としている。またパルサー自体は 12 V の単一電源を接続するが、このボード上で三端子レギュレータを用いて 5 V に降圧させて使用しており、入出力ボードと電源を共通化させている。ここで使用している三端子レギュレータは放熱のため銅板を介してケースと接続されている。

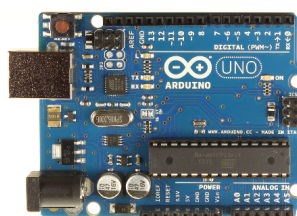


図 3: Arduino uno

3 - 3. パルスジェネレーターボード

今回開発を行ったパルサーの中心部と言えるボードであり、トリガージェネレーターボード又は外部入力からのトリガー信号を入力させることで、1 ns 以下の高速な超短光を発光させるためのパルス信号を出力する。

1 ns 以下の高速動作が要求されていながら、光源には消費電力が比較的大きい半導体レーザーを想定していた。そのため (Wilfried Uhring (Chantal-Virginie Zinta & Jeremy Bartringer)) を参考に、1 GHz 以上のクロックで動作し、100 mA 程度の電流を流せることを条件にトランジスタ等の能動素子の選定を行った。また、抵抗やコンデンサなどの受動素子についても高周波特性の良い表面実装の素子を用いる事とした。図 4、図 5 にその試作ボードと作成した回路図を示す。

短光の光強度調節には、パルス高自体を調節するのではなく常に光源に供給するバイアス電流を調節することでレーザー発振が起こるしきい値を変更することで行っている。このバイアス電流は 1 mA から

120 mA 程度まで、高精度のポテンショメーターを用いて細かく調節可能としているため、様々な種類の半導体レーザーを用いることが可能である。またトリガー入力から短光が発光するまでの時間が変化してしまうジッターの対策として、トリガー信号の入出力に同一規格の高速ロジック IC を用いる事で、トリガー信号と短光のジッターを 100 ps 以下にまで抑えている。これにより性能評価に用いる解析プログラムの精度向上にも貢献できている。

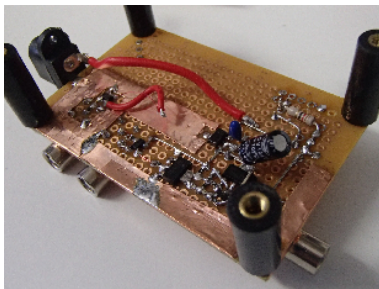


図 4: 試作パルスジェネレーターボード

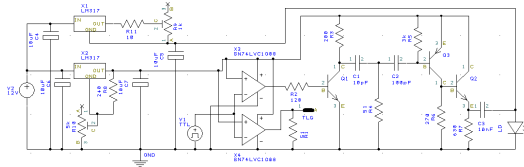


図 5: パルスジェネレーター回路図

3 - 4. 半導体レーザー

開発したパルサーからのパルス信号により短光を発光する光源として用いる。常にバイアス電流が与えられている事により半導体レーザー本体が発熱してしまうため、半導体レーザー単体ではパルス光強度が温度により変化してしまう。温度変化を軽減させるため、図 6 のように半導体レーザーの金属製フレームに沿った形状でアルミを削り出し、シリコングリスを塗布して密着させ放熱板として用いている。またこの放熱板を装着した事で、図 7 にあるように発光面に光を伝達するコネクタを取り付けることが容易となった。現在は光ファイバー接続用の SMA905 コネクタを取り付けており、発生させた短光をほぼ減衰させる事なく遠方まで伝達することが可能となっ

ている。

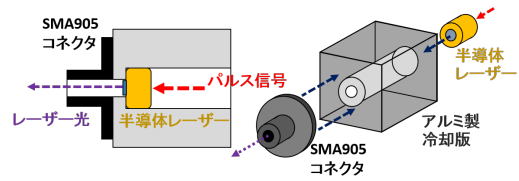


図 6: 放熱板と半導体レーザー及び SMA905 コネクタの取付図

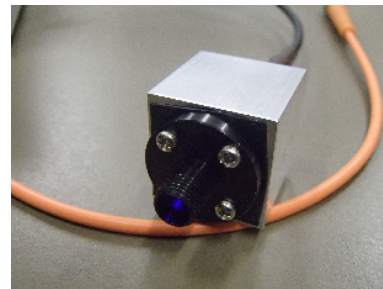


図 7: SMA905 コネクタを装着したアルミ製放熱板

4 パルサーの性能評価

開発したパルサーの性能について、要求されている性能を満たしているか、また要求値を明確に設定していなかった部分に関してどの程度の性能を有しているかを確かめるため、図 8 に示す装置のセットアップを用意して性能評価を行った。

性能の評価方法としては、まず暗箱内の一端に短光観測用の高速な APD (アバランシェフォトダイオード) を設置し、反対側に半導体レーザーと接続した光ファイバーの端を設置して短光を観測する事で短光の時間幅を測定した。次に短光観測用の素子を APD から PMT (光電子増倍管) に取り替えて短光の観測を行う事で、短光の発光強度と長時間運用時の安定性を測定した。

今回の性能評価で用いた素子として、APD には浜松ホトニクス製の S9055-01 (遮断周波数=1 GHz) を、PMT には LST の検出器にも搭載される浜松ホトニクス製の R11920 及び同社の H8643MOD を用い、光源となる半導体レーザーには日亜化学製の NDV4212 を使用した。

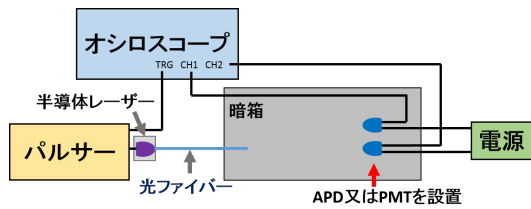


図 8: パルサー性能評価のセットアップ

5 結果

パルサーの性能評価を行った結果と使用している部品の仕様などから、開発したパルサーの仕様及び性能を次の表 1 にまとめた。また光源として NDV4212 半導体レーザーを用いた際の性能については表 2 に示す。表 2 におけるパルサー使用時の発光強度については、LST で使用する PMT である R11920 を用いて観測を行った。性能評価の結果、図 9 に示すように、要求値である 1ns を下回る、800 - 920 ps 幅の超短光が出力されていることが確認できた。

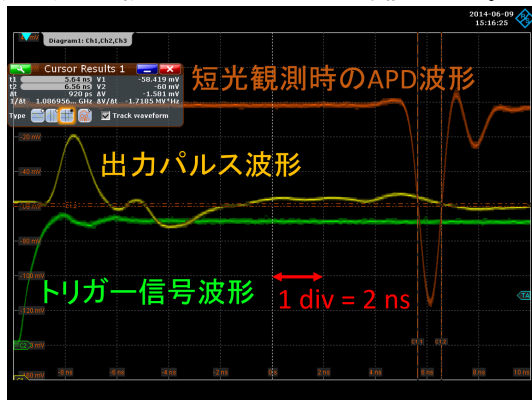


図 9: APD で測定した短光の時間波形

6 今後の展望

半導体レーザーは温度変化や微弱な電流の変化にとっても敏感であるが、運用中は本体が発熱するため、現在はバイアス電流や周波数の条件を変化させて長時間運用した際の安定性の測定を行っている。また半導体レーザーは上記の理由から運用を開始してから安定するまで時間を要するため、どの程度の時間で安定化するかも求める必要がある。このような実

表 1: 開発したパルサーの仕様及び性能

項目	値
動作電圧	9 - 12 V
消費電流	500 mA 以下
出力パルス高	3.0 - 7.0 V
出力パルス立ち上がり時間	600 - 660 ps (10% - 90%)
出力パルス幅	1.1 - 1.2 ns (FWHM)
出力バイアス電流	1 - 120 mA
Sync 信号	TTL 準拠 (5 V)
トリガー信号	内部 & 外部入力 (TTL)
内部トリガー周波数	1 - 999 Hz

表 2: NDV4212 の仕様及びパルサー使用時の性能

項目	値
動作電圧	4.6 - 5.5 V
動作電流	100 - 130 mA
発光波長	405 nm
パルサー接続時の発光時間幅	800 - 920 ps (FWHM)
パルサー接続時の発光強度	1 - 100 phe 以上

用に向けた動作確認を行い、より詳しい仕様及び性能表を作成する予定である。それ以外にも、現在完成している試作のパルサーはユニバーサル基盤上で開発を行っているため、回路の見直し等を行いパターンを生成する事でノイズの削減やパルス幅をより狭めるなどの機能向上が見込まれる。このように当初の要求値は達成できているが、更なる改良を行っていく予定である。

Reference

Wilfried Uhring, Chantal-Virginie Zinta & Jeremy Bartringer, A low cost high repetition rate picosecond laser diode pulse generator. , Proc. SPIE 5452, Semiconductor Lasers and Laser Dynamics, (1 September 2004); doi: 10.1117/12.545038.

B.S.Acharya et al. Astroparticle Physics 43 (2011);

ATmega328P, <http://www.atmel.com/ja/jp/devices/ATMEGA328P.aspx> (access 2014/07/16);

Arduino-ArduinoBoardUno, <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>, (access 2014/07/16);