

卒業論文概要書

2010年 1月提出

学籍番号 1G06M062-9

所属学科	物理学科	氏名	三浦 大陽	指導員	片岡 淳 印
研究 題目	次世代光検出素子 MPPC 評価システムの開発				

【はじめに】

現在最も実績のある光検出器は光電子増倍管(以下 PMT)で、カミオカンデ等の素粒子実験にも採用されている。PMT に入射した光は光電陰極で電子に変換され、その後ダイノードで増倍される。最終的な増幅率は 10^6 以上に及ぶが、この構造故に簡略化が困難、かつ磁場中での動作も不可能である。これらの問題を解決する半導体素子として Avalanche Photodiode (以下 APD)が挙げられ、磁場への耐性など多くの特徴を持つが、内部増幅率が 100 倍程度と低く、ノイズの影響を受けやすい。近年 APD をさらに発展した Multi-pixel Photon Counter(以下 MPPC)が注目されている。MPPC は Si-PM (Si-multiplier)とも呼ばれ、その名の通り PMT と同等の増幅率を持ち、時間分解能にも優れる。しかしながら、MPPC が実際に放射線計測に使用されている例はほとんどなく、その基礎特性もよくわかっていない。本論文では VME バスをベースにした MPPC 評価システムを新たに立ち上げ、単素子および 2次元 MPPC 試作アレーの基礎特性を詳細に調べた。

【PET への応用】

次世代複合型陽電子断層撮影(以下 PET)装置として MRI-PET (MRI:核磁気共鳴画像法)や TOF-PET(TOF:飛行時間)が提案されているが、MRI は数テスラの強力な磁場を必要とすること、また TOF 測定にはサブナノ秒の高速な応答が必要であり、PMT を用いた現行の装置でこれらの技術を実現することは困難である。PMT と同等の増幅率をもつ MPPC は上記の問題を解決でき、比較的代替しやすい点で有用である。

【MPPC 動作原理】

MPPC は二次元に配列された多数のガイガーモード APD で構成される。個々のガイガーモード APD は光子が入射したか否かの情報しか出力できないが、その重ね合わせで入射光子数を見積もる仕組みになっている。そのため、ガイガーモード APD のピクセル数を上限とした光子の計測が可能である。

また、各ガイガーモード APD にはクエンチ抵抗が接続されている。ガイガー放電後の抵抗で電圧降下を起こし、出力は止まる。その間に入射した光子には正常に反応できないが、その不感時間はおよそ 20 ナノ秒である。

【MPPC データ処理系の立ち上げ】

MPPC の高いゲインと高速応答は入射した光子の数を、識別・分離することをも可能にする。本論文では VME バス対応の電荷積分 ADC (以下 CSADC)および高速電流アンプを用いて、MPPC スペクトル評価用・高速データ処理システムを新たに開発した。パルス波高スペクトルの一例を示す。(図 1.) 単光子から 11 光子まで明確に分離していることが分かる。

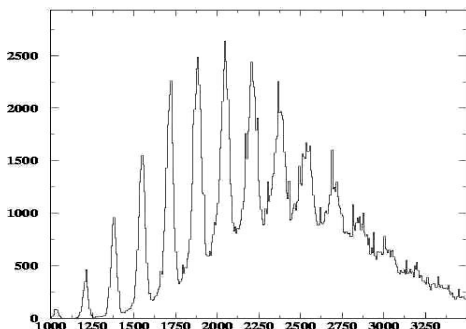


図 1. MPPC による微弱光スペクトル

【MPPC の基礎特性評価】

使用した MPPC は 1mm 角 MPPC(50 μ m、25 μ m タイプ)、及び、4 \times 4 3mm 角 MPPC-ARRAY(25 μ m タイプ)であり、試験した基礎特性及びその結果は以下の通りである。

・ゲイン (増幅率)

MPPC に光子レベルの微弱な光をあて、1 光子が作るピークと CSADC がもつオフセットからゲインを算出した。ゲインは温度・電圧に依存し、その関係はおおよそ線形であった。

・暗電流 (単素子のみ)

Keithley 237 を用い、光をあてていない状態で流れる電流値を調べた。ここでいう暗電流は後述するダークカウントとは別起源の、定常的にバルクに流れる直流電流である。この暗電流は低電圧付近でほぼ一定であるが、動作電圧(ガイガーモード)付近になると急激に増加した。

・線形性

光子数が多くなると同一 APD に 2 つ以上の光が入射する確率が上がるが、一つの APD は先に述べたように光子入射の有無しか判別できず、入射光子数と出力は線形でなくなる。このため、MPPC に異なる光量をあて、出力がどのように直線からずれるか調べた。また、大光量を入射すると本来の APD 数以上の値を出力したが、これは同じ APD が複数回反応している為であると考えられる。(図 2.右)

・ダークカウント・クロストーク

MPPC に光をあてない状態でも入射光子に相当するパルス(ダークカウント)が出力される。0.5 光子、1.5 光子に相当する閾値を設けダークカウントの温度、電圧依存性を調べた。また、それぞれのカウント数からクロストーク率を算出した。クロストーク率はゲイン一定の場合温度に依らずほぼ一定であり、その値は 10%前後であった。

・時間分解能

MPPC 出力の立ち上がり時間は極めて高速であるが、その応答タイミングは微小ながら前後する。CFD(Constant Fraction Discriminator)を用いてこの分解能を調べた。LED 発光時間を 10 ナノ秒とした場合、FWHM での分解能は 491 ± 0.9 ピコ秒であった。

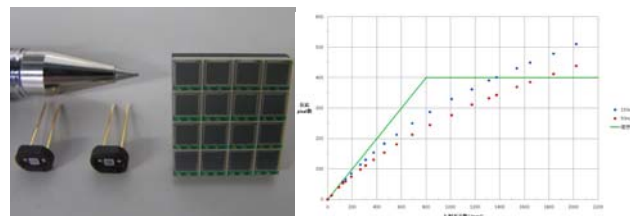


図 2. 左: 使用した MPPC 図 2.右: 線形性(50 μ m タイプ)

【考察】

高い増幅率、サブナノ秒の時間分解能をもつ MPPC は次世代 PET 用素子として有望であるが、その光検出効率は PMT と同程度で決して良いとは言えない。また、大光量において線形性は崩れる為、それを考慮した閾値を設定することは必須である。本研究は、次世代 PET プロジェクトの一環として当研究室における MPPC 試験システムを築いたという意味で極めて有意義であったと言える。