

## Multi Pixel Photon Counterの研究開発

京都大学 理学部

横山 将志

masashi@scphys.kyoto-u.ac.jp

信州大学 理学部

魚住 聖

satoru@azusa.shinshu-u.ac.jp

他 KEK 測定器開発室 光センサーグループ

2007 年 (平成 19 年) 12 月 4 日

### 1. はじめに

Multi Pixel Photon Counter(MPPC) は、数光子から数千光子程度の微弱光測定のために近年開発された半導体光検出器であり、その数々の優れた特性から大きな注目を集めている。ピクセル化された APD をガイガーモードで動作させ、各ピクセルの信号の和を並列に読み出すタイプの半導体光検出器を一般的に Pixelated Photon Detector(PPD) と呼ぶが、MPPC は浜松ホトニクス製の PPD の商品名である。

過去長くにわたって、微弱光の測定には光電子増倍管が主に用いられてきた。光電子増倍管は優れた性質を持つが、磁場中での使用に向かず、また原理上小型化に限界があること、高価であること、動作させるために数 kV の高電圧を必要とすることなど、高エネルギー実験での使用に際していくつもの制約があった。このことから、安価で小さく手軽に使用することが可能で、なおかつ光電子増倍管に劣らない性能を持つ光センサーの登場が待望されていた。そのような要求に答えるべく、これまでに APD, HPD, EBCCD などの半導体光検出器が次々と登場したが、光電子増倍率や取り扱いやすさなどは光電子増倍管を凌駕するものではなかった。

このような状況で、多数のガイガーモード APD ピクセルからなり、優れた光子計数能力を持つ半導体光検出器 PPD のアイデアが 1980 年代にロシアのグループにより提唱され、その大きな可能性から、実用化に向けた研究開発がロシアを中心に進みつつあった。21 世紀に入った頃、Silicon Photomultiplier や MRS-APD などの PPD が相次いで現れ、日本でも浜松ホトニクスが 2004 年に PPD の開発に着手した。一方高エネルギー物理学者の間でも、これらのセンサーを早く実用化して近い将来に計画されている実験で使用したいという気運が強まり、2005 年に



図 1: 浜松ホトニクスより発売された MPPC の外観 [1] (左:CAN パッケージ, 右:セラミックパッケージ)。センサー受光部面積は共に  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 。

KEK 測定器開発室の一部門として光センサーグループが発足した。このグループには ILC カロリメータグループ、T2K 前置検出器グループ、RICH での使用を目指す Belle グループ、J-PARC での *K* 中間子実験グループなどが参加し、浜松ホトニクスと連携して PPD の早期実用化および性能向上に向けた研究開発を行ってきた。

その結果、開発開始から約 2 年を経た 2006 年秋に、浜松ホトニクス社製の PPD は MPPC という名で商品化された (図 1) [1]。現在、100, 400, 1600 ピクセルの 3 種類の素子が、それぞれ 2 種類のパッケージで市販されている。

これらの MPPC は、その小ささ、光電子増倍管に並ぶゲインと光子検出効率、磁場に対する耐性、高いコストパフォーマンス、70V 程度の電圧で動作することなど、光電子増倍管と比較して数々の優れた性質を持ち、非常に手軽に使用することができる。そればかりでなく、読み出しチャンネル数を飛躍的に増やせるため、より細分割された超高精度検出器を作ることを可能とする。また、

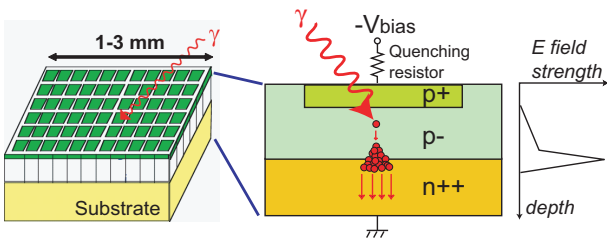


図 2: MPPC の構造と動作原理。赤丸は電子を表す。上図には描かれていないが、実際には電子雪崩に伴い生成される正孔も雪崩を起こす。

MPPC は他の PPD に比べ、熱電子ノイズが桁違いに少なく、300nm 程度までの短波長の光にも感度があり、チップごとのばらつきが非常に小さいなど多くの突出した利点を持ち、早くも世界中で高く評価されている。光センサーグループと浜松ホトニクスでは、実際の高エネルギー実験での大規模使用に向けてさらなる研究開発を推進している。

本記事では現在までに得られた MPPC の基礎特性と実際の各種実験での使用計画、将来の展望について紹介する。なお、これまでの研究成果の中には紙面の都合上本稿では紹介できなかったものもある。前号の高エネルギーニュースに報告があったとおり、2007 年 6 月に開催された PD07 ワークショップで MPPC の性能について数多くの優れた発表があった。講演内容は <http://www-conf.kek.jp/PD07> から閲覧可能なので、興味を持たれた方は参考にさせていただきたい。

## 2. 構造と動作原理

MPPC は、図 2 左と図 3 に示すように 1~3 mm 四方のシリコンチップにしきつめられた多数の微小 APD ピクセルにより構成される。現在市販されているものは受光部がどれも  $1 \times 1 \text{mm}^2$  であり、APD ピクセルの大きさ(ピッチ)に  $25/50/100 \mu\text{m}$  の 3 種類がある。

各ピクセルの断面構造を図 2 右に示す。ピクセル内の p-n 接合面にブレークダウン電圧 (APD がガイガーモードで動作するためのしきい値電圧) より 1~4 V 程度高い逆バイアス電圧をかけることによって、増幅領域はガイガーモードで動作し、入射光子により弾き出された光電子がこの領域中で雪崩増幅される。電子雪崩の発生したピクセルには電流が流れることよりピクセルに直列に接続された数百 kΩ 程度のクエンチング抵抗に電圧降下が発生し、増幅領域にかかっている電位差を下げることで雪崩は終息する。

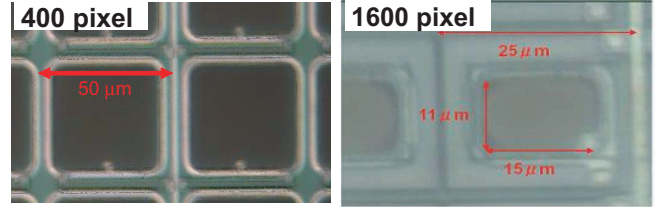


図 3: 400, 1600 ピクセル MPPC の拡大写真。ピクセル内部の黒い部分が有感領域に相当する。

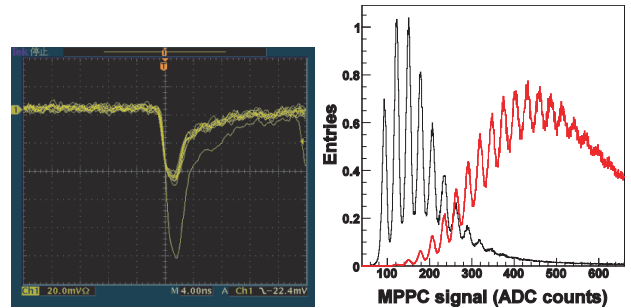


図 4: 左:MPPC の出力波形。2つの波高がそれぞれ 1,2 ピクセル相当の信号に対応する。右:MPPC 出力の電荷分布。検出された光電子数にそれぞれ対応するピークが見られる。

このとき 1 ピクセルからの出力電荷  $Q_{\text{pix}}$  は、 $C_{\text{pix}}$  をピクセル一つのキャパシタンス、 $V$  を印加電圧、 $V_{\text{bd}}$  をブレークダウン電圧として、

$$Q_{\text{pix}} = C_{\text{pix}}(V - V_{\text{bd}}) \quad (1)$$

で表される。一つのピクセルは 1 光電子による電子雪崩で飽和してしまうため、このままでは二つ以上の光電子を計数することができない。ここで受光面を多数の微小ピクセルに分割したうえで、全ピクセルの出力電荷の和を出力信号とすることが PPD の原理の革新的なところである。このときピクセルごとの特性が揃っており、 $C_{\text{pix}}$  および印加電圧が一樣であれば MPPC の出力電荷  $Q$  は

$$Q = \sum_i^N Q_i = N Q_{\text{pix}}$$

となり、電子雪崩を起こしたピクセルの数  $N$  に比例した電荷が得られる。この電荷を記録することで、光子計数が可能となる。ただし、「同時に」入射してくる光子に対するダイナミックレンジは原理的にピクセル数により制限される。また MPPC のゲイン  $g$  は  $Q_{\text{pix}}$  を素電荷  $|e|$  で割ったものとして定義され、典型的な  $C_{\text{pix}} \sim 10\text{--}100 \text{ fF}$ 、 $\Delta V \sim 1\text{V}$  から  $g = 10^5\text{--}10^6$  という高い値である。

1600 ピクセル MPPC に LED からのパルス光を入射した時の MPPC の出力波形と出力電荷分布を図 4 に示す。

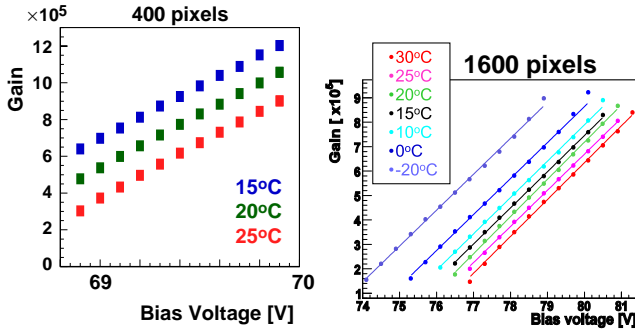


図 5: MPPC のゲイン-バイアス電圧。左:  $50\mu\text{m}$  ピッチ・400 ピクセル, 右:  $25\mu\text{m}$ ・1600 ピクセル。

増幅領域が  $2\mu\text{m}$  程度と薄いため信号の立ち上がりは早く (図 4 左), 時間分解能にも優れている。図 4 右では, 光電子数に対応するピークがはっきりと見られ, MPPC の高い光子計数能力を示している。

### 3. 基礎特性

以下に, MPPC の基礎特性について述べる。なお, 特に断らない限り現在市販されている有効領域が  $1\times 1\text{mm}^2$  の素子についての性能である。

#### 3.1 ゲイン・ブレイクダウン電圧

MPPC の動作原理の項で述べたとおり, 電圧降下により実効的な印加電圧がブレイクダウン電圧 ( $V_{\text{bd}}$ ) 以下になったとき電子雪崩が終わるため, MPPC のゲインは式 (1) に示されるとおり印加電圧とブレイクダウン電圧の差 (オーバーボルテージ)  $\Delta V \equiv V - V_{\text{bd}}$  に比例する。MPPC のゲインは ADC 分布でのペダスタルと 1 光電子ピークの電荷量の差から容易に測定できる。図 5 に測定された MPPC のゲインを示す。左が  $50\mu\text{m}$  ピッチ・400 ピクセル, 右が  $25\mu\text{m}$ ・1600 ピクセルの素子についての結果であり, それぞれ恒温槽中で温度を何点か変えつつ測定した。式 (1) から期待されるとおり, MPPC のゲインは印加電圧に線形に依存する。

また, この測定を  $g = 0$  の点まで外挿することによりブレイクダウン電圧  $V_{\text{bd}}$  を求めることができる。図 5 にも見られるとおり, MPPC の特性には温度依存性があるが, その原因は主に  $V_{\text{bd}}$  の温度依存性により同じ印加電圧でも  $\Delta V$  が変化するためであることが分かっている。このため印加電圧でなく  $\Delta V$  を一定にすれば特性の温度

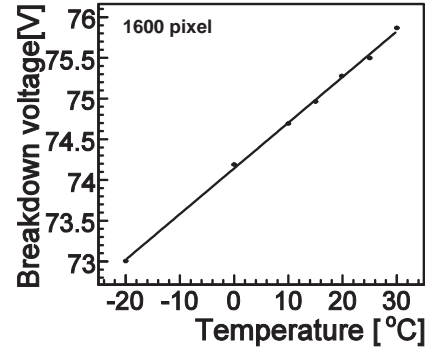


図 6: ブレイクダウン電圧の温度依存性。

依存性が小さくなる<sup>1</sup>。したがって, ブレイクダウン電圧  $V_{\text{bd}}$  は MPPC の特性を理解する上で非常に重要なパラメータである。図 6 に, 図 5 右で示した 1600 ピクセル素子のブレイクダウン電圧の温度依存性を示す [2]。ブレイクダウン電圧は, 温度に線形に依存することが分かる。同様の線形性は他のピクセルサイズの素子について, また室温から液体窒素温度までの温度について確認されており, この範囲で温度係数は約  $50\text{mV/K}$  であることがわかっている [3]。

#### 3.2 ダークノイズ

一般に PPD は高いゲイン・光子検出効率と引き替えに室温で高いダークノイズレートを持つことが知られている。実際, 数年前には  $1\text{mm}^2$  の PPD 素子では  $1\text{--}10\text{MHz}$  のノイズレベルが当たり前であった。ダークノイズの起源は主に熱励起による電子が電子雪崩を起こすことによると考えられている。このためノイズの大きさは 1 光電子相当が主であり, 後述のピクセル間クロストーク・アフターパルスの影響で 2 光電子以上相当の事象が現れる。

不純物による中間準位や, 構造上局所的に高電圧の領域が存在すると電子雪崩を誘発しやすくノイズ源となる。MPPC ではこれらを取り除いた結果, 他の PPD 素子に比べほぼ一桁低いノイズレベルを達成している。図 7 に測定されたノイズレートを示す。左が  $50\mu\text{m}$  ピッチ・400 ピクセル, 右が  $25\mu\text{m}$ ・1600 ピクセルの素子についての結果である。 $50\mu\text{m}$  ピッチ・400 ピクセルの素子については, スレッシュホールドを 0.5 光電子相当にした場合と 1.5 光電子相当にした場合をともに示す。MPPC のダークノイズレートは 0.5 光電子相当のスレッシュホールドで  $100\text{kHz}$  のオーダーであり, 1.5 光電子相当にスレッシュホールドを上げるとさらに一桁低下することが分かる。また, MPPC

<sup>1</sup>ただし, 今のところノイズレートは例外であり,  $\Delta V$  を一定にしても温度依存性がある。

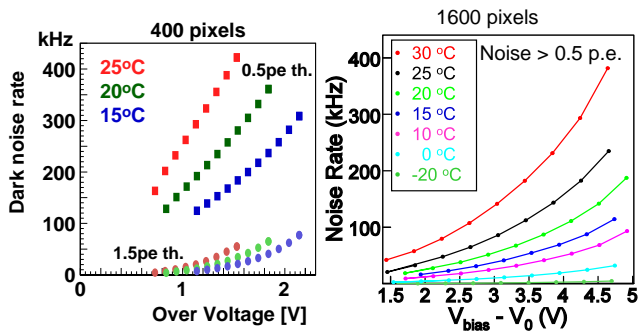


図 7: MPPC のダークノイズ。左:  $50\mu\text{m}$  ピッチ・400 ピクセル, 右:  $25\mu\text{m}$ ・1600 ピクセル。横軸は  $\Delta V$ 。左図ではスレッシュドを 0.5 光電子相当にした場合と 1.5 光電子相当にした場合をともに示す。

のノイズレートは室温付近では温度が約  $7\sim 8^\circ\text{C}$  下がるとに半分になり, 液体窒素温度では  $1\sim 10\text{ Hz/mm}^2$  まで落ちることが確認されている [3]。

### 3.3 光子検出効率 (PDE)

光子の検出効率 (Photon Detection Efficiency, PDE) は光検出器の重要な性能の一つである。MPPC の PDE は量子効率 (QE), 受光面積中の有感領域の割合, 電子雪崩を起こす確率, の三つの要素で決まっている。

MPPC は APD の構造を元としているため, PMT に比べて高い QE をもつことが特徴の一つである。しかしながら, 各ピクセルの周りにバイアス抵抗の部分およびピクセル間の絶縁のための不感領域が存在するため, その構造上有感領域の割合が 100% ではない。また, この不感領域の面積はピクセルの構造により異なるが, ある程度以上は小さくできないためピクセルが小さいほど有感領域の割合が小さくなる。現在  $25\mu\text{m}$ ,  $50\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$  の 3 種類のピクセルサイズが製品化されているが, 有感領域の割合はカタログ値でそれぞれ約 30%, 60%, 78% である。電子-正孔対が電子雪崩を起こす確率は  $\Delta V$  に依存するため, MPPC の PDE もまた  $\Delta V$  に依存することになる。

図 8 左のようなセットアップを用い,  $50\mu\text{m}$  ピッチ・400 ピクセル素子の光子検出効率 (PDE) をバイアルカリ光電面の PMT をリファレンスとして測定した。スリットで光を絞り, 光を受ける面積が同じになるようにして MPPC と PMT で光量を比較した。図 8 右に結果をオーバーボルテージ ( $\Delta V$ ) の関数として示す。縦軸は (MPPC で観測された光量) / (PMT で観測された光量) を示す。このとき MPPC での平均光量は, 後述のクロス

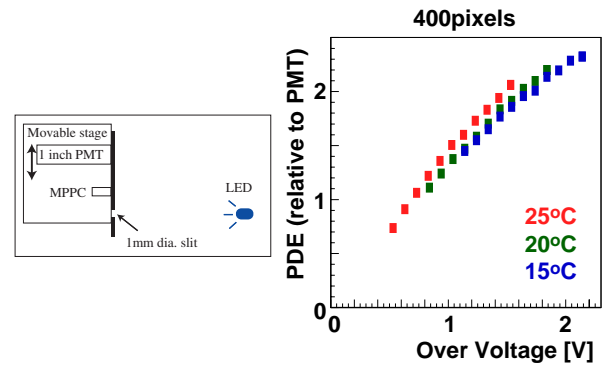


図 8: 左: 光子検出効率 (PDE) 測定のセットアップ。右:  $50\mu\text{m}$  ピッチ・400 ピクセル素子の PDE。横軸はオーバーボルテージ ( $\Delta V$ ), 縦軸はバイアルカリ光電面の PMT をリファレンスとして規格化してある。

トークやアフターパルスの影響を除くため, 総事象数に対するペダスタル (0 光電子事象) の割合からポアソン統計を仮定することで求めている。MPPC は PMT よりもよい PDE (この場合 2 倍近く) を示すことが分かる。PDE は  $\Delta V$  に強く依存しているが, これは前述の通り電子-正孔対が電子雪崩を起こす確率が変化することが主な要因と考えている。また, 温度が変わっても,  $\Delta V$  が一定であれば PDE の変化は小さいこともわかる。(もちろん, このときバイアス電圧は一定ではない。) ここに示したのは青色の LED を光源として用いた結果であるが, 他に緑色 LED や, 波長変換ファイバー (クラレ Y11) からの光に対しても同様の測定が行われ, MPPC は PMT よりよい PDE を持つことが分かっている。

PDE の波長依存性に関しては浜松ホトニクスのカatalogにもスペックが掲載されているが<sup>2</sup>, 他の PPD と比較すると短波長側 ( $400\text{ nm}$  付近) に PDE のピークがある。これは, MPPC の構造による特徴の一つとなっている。

### 3.4 ピクセル間クロストーク

あるピクセルで電子雪崩が発生した際, その雪崩中で赤外波長の光子が発生し, 周囲のピクセルに伝搬して別の雪崩を引き起こすことがある (図 9)。このような現象をピクセル間クロストークと呼ぶ。これが頻繁に起きると, MPPC の出力が実際に検出されるべき光電子数相当より大きくなってしまふ。また, この頻度がピクセル毎にばらついていると, 応答関数の形に不定性を生じる。ピクセル間クロストークが起きる確率は, 一定時間内に発生

<sup>2</sup>ただし現在カタログ値は電流をもとに計測されており, クロストーク・アフターパルスの影響を含んでいることに注意。

する熱電子ノイズの数から、次のようにして測定された。

$$\text{クロストーク確率} = \frac{2 \text{ ピクセル相当以上のノイズ数}}{1 \text{ ピクセル相当以上のノイズ数}}$$

熱電子ノイズは各ピクセルでランダムに起きるので、二つ以上のピクセルが同時に熱電子ノイズを出す確率は非常に小さい。よって、2 ピクセル相当以上のノイズはほとんどがクロストークによって引き起こされたものと考えられる。

2種類のMPPCのクロストーク確率を、バイアス電圧を変化させながら測定した結果を図10に示す。これらの結果から、クロストーク確率は $\Delta V$ (バイアス電圧とブレイクダウン電圧の差)の上昇に従って増加し、温度にはそれほど依存しないことがわかる。これは、クロストークを引き起こす赤外波長光子の生成数は雪崩の大きさに比例し、よって $\Delta V$ にのみ依存するためと考えられる。典型的なクロストーク確率は0.1~0.2程度であり、この分だけMPPCの出力が水増しされていることになる。これについては、ピクセル間に溝を作ってアルミ膜を埋め込み、ピクセル同士を光学的に分離させるなどの改良が現在試行されており、近い将来に改善されることが期待される。

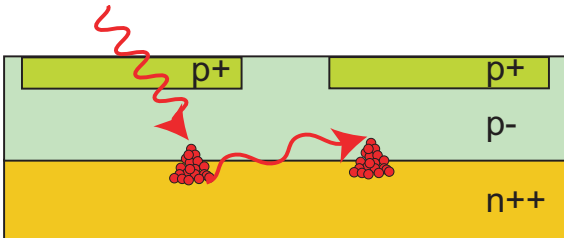


図9: 赤外波長光子によるピクセル間クロストークの発生。

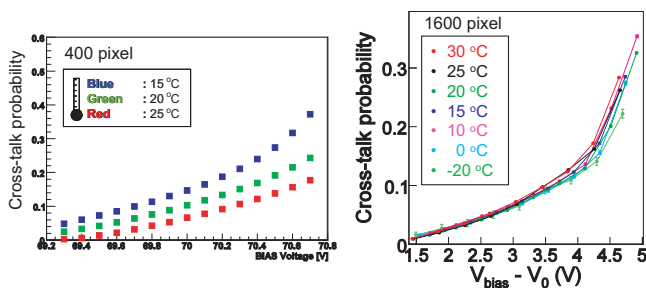


図10: 400,1600ピクセルMPPCのクロストーク確率の測定結果。

### 3.5 アフターパルス

MPPCの増幅領域内には結晶の格子欠陥が存在し、ここに雪崩電子が捕獲され、一定時間後に再放出されるこ

とにより再び雪崩を引き起こすことがある。このような現象はアフターパルスと呼ばれる。この格子欠陥のポテンシャルの深さは様々であり、どの程度の深さの欠陥に電子が落ち込むかでその捕獲確率や再放出の時定数に変化する。この現象の定量的な理解や改善は未だ進行中である[4]が、結晶の質を向上させることによりアフターパルスを減少させることができると期待され、今後の改善が待たれる。

### 3.6 回復時間と応答関数

MPPCの各ピクセルは、光電子がいくつ検出されても一定の信号しか出力できないため、MPPCの入射光量に対する応答は原理的に非線型である。この応答関数の形を正確に知ることは正確な光子計数のために重要であり、特に広いダイナミックレンジでの光強度の測定のためには不可欠である。

光信号が十分短い時間内に入射した場合、MPPCの応答は以下の式で表される。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{pix}}(1 - e^{-N_{\text{p.e.}}/N_{\text{pix}}})$$

ここで $N_{\text{pix}}$ はセンサー上に配置されたピクセルの数、 $N_{\text{fired}}$ はそのうち信号を出力したピクセルの数、 $N_{\text{p.e.}}$ は光電子数( $N_{\text{p.e.}} = \text{PDE} \cdot N_{\text{photons}}$ ,  $N_{\text{photons}}$ は入射光子数)である。ここで $N_{\text{p.e.}} \ll N_{\text{pix}}$ の時、MPPCの応答は線形とみなせるが、 $N_{\text{p.e.}}$ が $N_{\text{pix}}$ に近づくに従って非線型に振る舞い、入力がどんなに大きくても出力が $N_{\text{pix}}$ を越えることはない。よって、MPPCの応答関数とダイナミックレンジは $N_{\text{pix}}$ によって決まる。しかし、光信号がある程度長い時間にわたる場合は少し状況が変わる。各ピクセルは雪崩信号を出力した後、一定の時間を経て回復する。回復時間についてはこの後詳しく述べるが、ピクセル面積の小さい1600ピクセルMPPCでは4 ns程度と短い。よって、この回復時間と比べて同程度か数倍程度の時間幅を持つ光信号の強度を測定する場合、同一ピクセルが複数回信号を出力できるため、応答関数の形は光信号の時間幅に応じて変化する。(シンチレータや波長変換ファイバーからの数千光子程度までの信号を1600ピクセルMPPCで読み出す際は、このような状況になる。)よってこの場合、応答関数の形に影響を与える支配的な要素は、ピクセル数、回復時間、入力信号の時間幅の3つである。

ここでは、1600ピクセルMPPCの回復時間と、入射する光信号の時間幅を変化させた時の応答関数の変化について述べる。回復時間の測定は、図11左に示すように

連続する2つのパルスを用いて行われた。測定は以下のように行われる。

1. まず強いレーザーパルス光をMPPCに入射し、ほぼすべてのピクセルが信号を出力する状況を作る。その後  $\Delta t$  の遅延時間をおいて同じく強いLEDパルス光を入射し、全ピクセルから信号を出力させる。この二つ目のLED光に対するMPPC出力のピーク電圧値を  $V_{\text{on-recovery}}$  とする。
2. レーザー光を入射させず、LED光のみMPPCに入射させる。この時のMPPC出力のピーク電圧値を  $V_{\text{full-recovery}}$  とする。

手順1では、最初の信号出力の後回復が不完全な場合には、 $V_{\text{on-recovery}}$  は  $V_{\text{full-recovery}}$  より小さくなる。よって、 $\Delta t$  を変化させ、両者を比較すれば回復の様子が測定できる。図11右に結果を示す。測定された量は recovery fraction ( $f_r$ ) であり、 $f_r = V_{\text{on-recovery}}/V_{\text{full-recovery}}$  で定義される。測定結果は  $f_r(\Delta t) = A(1 - \exp(-(\Delta t - a)/\tau_r))$  の経験式でフィットされ、1600ピクセルMPPCの回復時間として  $\tau_r = 4.0 \pm 0.1$  ns が得られた。また、回復時間はバイアス電圧によってほとんど変化しなかった。

上の測定とは独立に、アフターパルスを用いた回復時間の測定も行われた。このときの3種類のMPPCの回復時間の測定結果を表1に示す。以上2つの測定結果はよく一致しており、また表1より、回復時間はピクセル容量とクエンチング抵抗の時定数でほぼ決まっていることがわかる。

次に、1600ピクセルMPPCの実際の応答関数の測定を行った。セットアップを図12に示す。LEDに時間幅  $w$  ns の矩形パルスを入力し、これにより発生したパルス光をMPPCに入射させ、応答を測定した。同時に光電子増倍管によりLEDからの光をサンプリングし、MPPCに入力された光量を決定した。応答関数は入力信号の時間幅  $w$  とバイアス電圧を変えてそれぞれ測定された。図12右に結果を示す。この図から、応答関数は  $w > \tau_r$  の場合  $w$  の値によって比較的大きく変化するが、バイアス電圧の値には影響されないことがわかる。

以上の結果より、MPPCをダイナミックレンジが必要な用途に使用する場合は、測定すべき光信号の時間構造を知った上で、応答関数を注意深く決定すべきであるといえる。

### 3.7 放射線耐性

高エネルギー実験での使用を考えると、放射線耐性は重要な特性の一つである。これまでに国内で  $\gamma$  線・中性子・

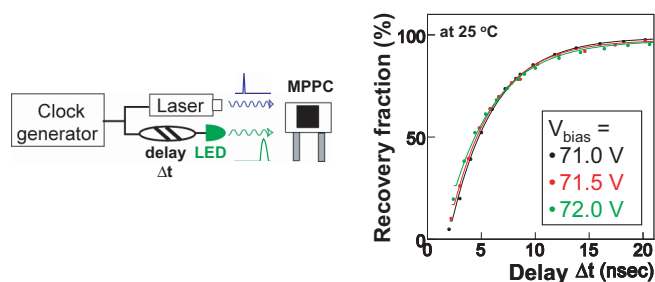


図 11: 左:回復時間測定の設定アップ。これらの測定には小型パッケージの1600ピクセルMPPCが用いられた。右:パルス間の遅延時間  $\Delta t$  に対する recovery fraction の測定結果。

表 1: アフターパルスを用いて測定された3種類のMPPCの回復時間と、ピクセル容量とクエンチング抵抗の時定数との比較。

	回復時間	RC 時定数
1600 ピクセル	~4 ns	~5 ns
400 ピクセル	~9 ns	~11 ns
100 ピクセル	~33 ns	~35 ns

陽子・重イオンによる照射が行われており、PD07 ワークショップでの報告 [5] は注目を集めた。

$^{60}\text{Co}$  線源をもちいた  $\gamma$  線の照射では、ノイズレートや暗電流が増加する一方で、240Gy 照射後もゲインやクロストーク率に大きな変化はみられなかった。一方、240Gy の照射直後には大きな放電パルスが観測された。RCNP のシンクロトロンで 53.3 MeV の陽子ビームを照射したところ、 $5.4 \times 10^7 \text{ p/mm}^2$  (8Gy) の照射では暗電流・ノイズは増加するものの ADC 分布から光電子ピークが判別でき、ゲインも大きな変化がなかったが、 $1.4 \times 10^8 \text{ p/mm}^2$  (21Gy) の照射ではピークが識別できなくなった。中性子の照射は東海村にある東京大学の原子炉「弥生」で改良を重ねつつ数度にわたり行っている。当初の照射では、 $10^7 \text{ n/cm}^2$  照射したところでは変化が見えず、 $10^{11} \text{ n/cm}^2$  ではピークが判別できなかった。現在、その間に相当する照射量のデータを取得したところであり、鋭意解析中である。その他、HIMAC において重イオンの照射が行われた。

以上、いずれもまだ「まず照射して何が起こるか確認した」という段階ではあるが、興味深いデータが得られつつある。今後これらの結果をふまえて放射線損傷の機構を理解し、改良を探る方向に開発が進むと期待される。

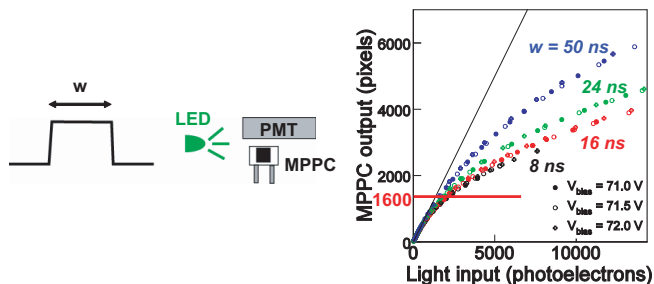


図 12: 1600 ピクセル MPPC の応答関数測定の設定アップ (左) と結果 (右)。

## 4. MPPC の利用

以上で見えてきたように、MPPC は非常に優れた特性を持つ光検出器であり、すでにいくつかの実験で使用が決定・検討されている。ここでは紙面の都合で特に著者の参加している実験を中心に、現在光検出器グループに参加しているグループでの計画について述べる。

### 4.1 T2K 前置検出器

T2K 実験 [6] は 2009 年 4 月開始予定の次期ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村の J-PARC 陽子シンクロトロンから岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデへ 295km ニュートリノを飛ばし、ニュートリノ振動の研究を行う。このとき生成直後のニュートリノビームの性質を測定するために、J-PARC 敷地内に前置検出器が設置される。

T2K 前置検出器では、荷電粒子の運動量測定のために CERN から UA1 で使われたマグネットを輸入し、検出器を 0.2T の磁場中に置く計画である。運動量測定のためのガス TPC を除く各検出器 (標的を兼ねたファイングレイン検出器および  $\pi^0$  検出器, 電磁カロリメータ, ミューオンレンジ検出器, ニュートリノビームの方向を測る軸上ニュートリノモニター) では、すべて押し出し成形で作ったプラスチックシンチレータを波長変換ファイバーで読み出すという、K2K-SciBar 検出器 [7] と同じ手法を用いる。十分な光量を確保するためには光検出器を磁石の内部に置くことが望ましいが、そのためには磁場中で稼働しかつコンパクトな光検出器が必要であった。MPPC はこの条件を満たす理想的な検出器であるとして、2005 年夏に前置検出器の光検出器として採用された。

前置検出器全体では MPPC を約 5 万個使用する計画であり、日本グループ (京都大学・KEK) ではこのうち 15,000 個の受け入れ時検査を担当する。その前段階として、2007 年に KEK 測定器開発室と共同で 50 ミクロン

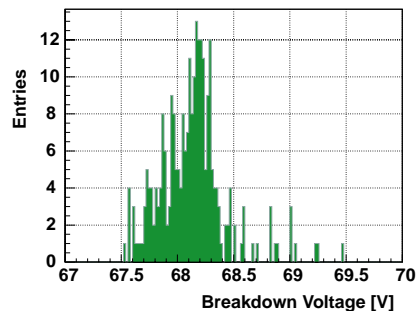


図 13: 400 ピクセル素子 300 個の 20°C におけるブレイクダウン電圧の分布。

ピッチ・400 ピクセルの MPPC 300 個の特性測定を行った<sup>3</sup>。図 13 に 20°C でのブレイクダウン電圧の分布を示す。分布の RMS は 0.3 V であり、95% が 1V 以内、全数が 2V 以内に収まっている。T2K 前置検出器向けに開発中の読み出し回路は MPPC の印加電圧を最大 5 V の幅で調整可能であるため、この程度のブレイクダウン電圧のばらつきは許容範囲内である。その他の基礎特性も測定した結果、すべての特性が T2K での使用に十分な範囲に収まり、かつ個体差がばらつきなく揃っているという結果を得た [8]。

MPPC の大量生産は 2008 年初頭から始まるため、原稿執筆時点は大量生産時の品質検査の手順を確立し、受け入れ時の測定システムをセットアップしているところである。2008 年前半には日本担当分の試験を終え、検出器の製作、インストール・コミッションングと 2009 年の実験開始に向けて急ピッチで準備を進める予定である。

### 4.2 ILC カロリメータ

国際リニアコライダー実験 (ILC)[9] においては、細分割されたカロリメータの光信号読み出しに MPPC を用いる予定である。ILC では、ヒッグス粒子や SUSY 粒子などの終状態に現れるジェットのエネギーを精度よく測定することが非常に重要であり、このため Particle Flow Algorithm (PFA) と呼ばれる方法が提案されている。この方法では、荷電粒子の運動量は中央飛跡検出器で測定され、光子や  $K_L^0$  などの中性粒子のエネギーはカロリメータで測定される。このようにジェット中の粒子一つ一つを区別して、一粒子ごとに精度のよい方法を用いることにより、目標である  $30\%/\sqrt{E}$  のジェットエネギー分解能を達成することができる。しかし、この方法ではカロリメータ内でジェット内の粒子を個別に見分ける必要が

<sup>3</sup>なお本実験では、その後 T2K 用に開発された 50 ミクロンピッチ・有感部  $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$  の素子を用いる予定である。

あるため、非常に細かく分割されたカロリメータ ( $1 \text{ cm}^2$  程度) が必要となる。われわれが計画しているのは、図 14 に示すようなストリップ状のシンチレータとタングステン/鉛からなるサンドイッチ型カロリメータである。各シンチレータストリップの大きさは  $1 \times 4.5 \times 0.3 \text{ cm}^3$  程度であり、総計一千万本以上のストリップからの光信号を個別に読み出さなくてはならない。また、カロリメータは 3 Tesla の磁場中に置かれるため、磁場に強く、安価でコンパクトであり、なおかつ高い性能を持つ光センサーが必要であった。これらの点で MPPC は要求される性能を満たし、われわれの目標に理想的であると言える。しかしカロリメータでは同時にダイナミックレンジも非常に重要であり、より多くのピクセルを持った MPPC の開発が現在も進められている。

また、2007 年初めには、MPPC を用いた電磁カロリメータプロトタイプ製作を世界で初めて行った。製作したプロトタイプの構造を図 15 に示す。10 cm 程度の小さなプロトタイプだが、総読み出しチャンネル数は 468 に及ぶ。このプロトタイプの製作のため、我々は約 700 個の 1600 ピクセル MPPC の性能評価を行った。図 16 に得られたブレイクダウン電圧とピクセルキャパシタンス、ノイズレートのばらつきを示す。この測定により、数百個の使用においても性能のばらつきは数%以下と十分小さいことが確認された。次に、このプロトタイプの性能を評価するため 2007 年 2-3 月に DESY に於いて 1-6 GeV の電子ビームを用いてテストを行った。その結果、シミュレーションによる予想と同等の結果が得られ、MPPC がカロリメータ読み出しに有用であることが示された。今後は、MPPC のさらなるダイナミックレンジの獲得や、温度依存性などの基礎特性の改善に向けての開発を進める予定である。さらに 2008 年秋には、読み出し数 2000 チャンネルの大型のプロトタイプの製作とビームテストが計画されている。

### 4.3 その他の応用

KEK 測定器開発室 光センサーグループには、他にも Belle の PID アップグレード [10]、J-PARC のハドロン実験、原子炉ニュートリノ実験などに興味を持つグループが参加している。リニアリティの改善・大面積化・時間分解能・PDE の向上・放射線耐性の向上・低温での動作など、異なった要望・アイデアを持ったグループが集まることで、多面的な開発が進んでいる。

国内・海外の他のグループでも MPPC への注目は大きく、特にヨーロッパでは類似の PPD を開発・研究してきたことから様々な応用が提案されている。アメリカでは

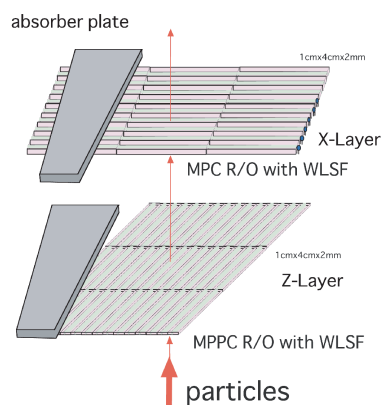


図 14: シンチレータストリップからなるカロリメータの構造。

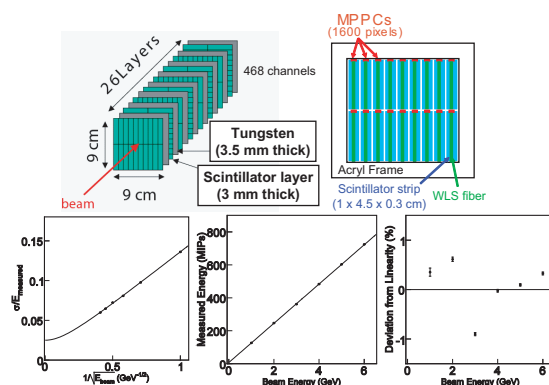


図 15: 電磁カロリメータプロトタイプの構造と陽電子に対する性能。下段左は得られたエネルギー分解能 ( $\sigma/E = (13.4 \pm 0.1) / \sqrt{E} \oplus 2.5 \pm 0.1 \%$ )、下段中、右は入射ビームエネルギーに対するプロトタイプでの測定エネルギー。

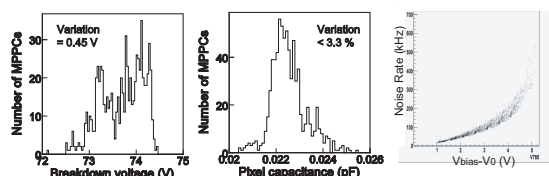


図 16: 1600 ピクセル MPPC 約 700 個の性能のばらつき。



主に ILC の検出器開発に関わる人々から注目されているようである。高エネルギー分野以外でも、宇宙線分野での大気チェレンコフ望遠鏡や、ミュオンスピン回転/緩和/共鳴 ( $\mu$ SR) による物性研究など、様々な分野で応用が検討されている。また、物理以外への展開では、特に PET などの医療分野への応用が開発当初から議論されており、今後の進展が期待されている。

## 5. 今後の展望

数年の開発期間を経て、MPPC は今や市販され T2K など最先端の実験に使用されるまでになった。しかし、MPPC の持つ可能性を最大限に引き出し、上に述べたような様々な応用を実現するためにはこの先さらなる開発が必要である。

特に大面積化は様々な応用に対し有効であるが、ダークノイズは面積に比例して増加すると考えられるため、そのさらなる低減が不可欠である。また、歩留まりが悪いとコスト増に繋がるため、生産過程の管理や製品の安定性への要求がこれまで以上に厳しくなるであろう。これらの改善には、現在市販されている型の MPPC がそうであったように、ユーザー側からのフィードバックをかけながら生産者がある程度の経験を積むことが必要となると思われる。素子自身の大面積化を図る代わりに受光面の前に集光機構をつけるアイデアもあり、実用化に向けて様々なアプローチで研究が進むと期待される。

その他 将来の課題としては、すでに述べたクロストークやアフターパルスの低減や放射線耐性の改善のほか、ブレークダウン電圧の温度依存性の低減、様々な用途に対応するためのパッケージの開発、読み出し回路の開発などがあげられる。他にもここに挙げ忘れた、あるいはまだ考えられていないアイデアもあると思われる。MPPC はまだまだこれから開発の余地のある素子であり、潜在的に应用範囲は広く展望は非常に明るい。

## 6. 終わりに

MPPC は非常に優れた特性を持つ光検出器であり、幅広い範囲への応用の可能性を持っている。本稿がこのような素子を探している方の目にとまり、新たな応用を生み出すきっかけになれば幸いである。

なお、本稿で述べた測定結果の多くは、KEK 測定器開発室・光検出器グループでの研究過程で得たものである。データを提供していただいた他のメンバー、サポートをいただいた KEK に感謝の意を表したい。また、開発・試

験を進める上で浜松ホトニクスから多大な協力をいただいたことは言うまでもない。この場を借りてお礼を申し上げたい。

## 参考文献

- [1] 浜松ホトニクス, <http://jp.hamamatsu.com> 山本晃永, “Newly Developed Semiconductor Detectors by Hamamatsu”, presentation at PD07.
- [2] 魚住聖, “Study and Development of Multi Pixel Photon Counter for the GLD Calorimeter readout”, presentation at PD07.
- [3] 音野瑛俊, “Study of MPPC at liquid nitrogen temperatures”, presentation at PD07.
- [4] 生出秀行, “Study of Afterpulsing of MPPC with Waveform Analysis”, presentation at PD07.
- [5] 松原綱之, “Radiation damage of MPPC by gamma-ray irradiation with  $^{60}\text{Co}$ ”, presentation at PD07; 松村徹, “Radiation damage to MPPCs by irradiation with protons”, *ibid*; 田中隆之, “Radiation damage test of MPPC by a 290MeV/u C beam at HIMAC”, PD07 poster presentation.
- [6] Y. Itow *et al.* arXiv:hep-ex/0106019. <http://jnuusrv01.kek.jp/public/t2k/>
- [7] 中家剛, 高エネルギーニュース 22 巻 4 号 124 ページ (2004); 田中秀和, 高エネルギーニュース 26 巻 2 号 104 ページ (2007).
- [8] 五味慎一, “R&D of MPPC for T2K experiment”, presentation at PD07.
- [9] <http://www.linearcollider.org>
- [10] 飯島徹, “Geiger-mode APD as a RICH photodetector”, presentation at PD07.