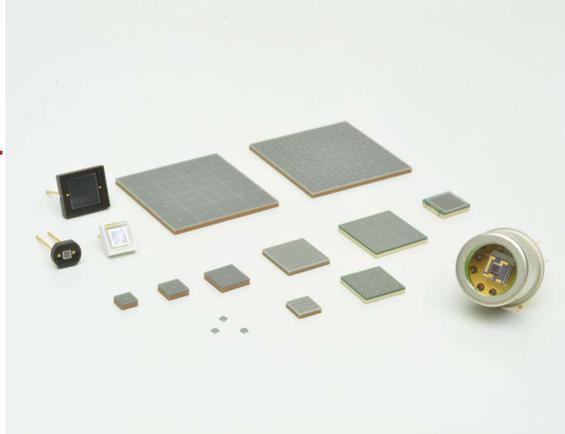


MPPC[®]

目次

1. 動作原理

- p.01
- 1-1 フォトンカウンティング
 - 1-2 ガイガーモードとクエンチング抵抗
 - 1-3 構造
 - 1-4 基本動作

2. 特長

- p.03
- 2-1 低アフターパルス
 - 2-2 高検出効率
 - 2-3 広いダイナミックレンジ
 - 2-4 低クロストーク
 - 2-5 金属クエンチング抵抗

3. 特性

- p.05
- 3-1 MPPCのタイプと特性
 - 3-2 増倍率
 - 3-3 ダークカウントレート
 - 3-4 クロストーク
 - 3-5 アフターパルス
 - 3-6 暗電流
 - 3-7 受光感度、検出効率
 - 3-8 時間分解能

4. 測定例

- p.10
- 4-1 増倍率
 - 4-2 ダークカウントレート
 - 4-3 クロストーク
 - 4-4 アフターパルス
 - 4-5 受光感度
 - 4-6 検出効率
 - 4-7 時間分解能
 - 4-8 ダイナミックレンジ
 - 4-9 回復時間

5. 使い方

- p.16
- 5-1 接続例
 - 5-2 デジタル方式・アナログ方式からの選択
 - 5-3 MPPCモジュール

6. 応用例

- p.17
- 6-1 LiDAR (Light Detection and Ranging)
 - 6-2 シンチレーション計測
 - 6-3 蛍光計測
 - 6-4 高エネルギー実験

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)は、Si-PM (Silicon Photomultiplier)と呼ばれるデバイスの1種で、ガイガーモードAPDをマルチピクセル化した新しいタイプのフォトンカウンティング (光子計測)デバイスです。光半導体素子でありながら、優れたフォトンカウンティング能力をもっており、フォトンカウンティングレベルの微弱光を検出するさまざまな用途に利用することができます。

MPPCは、低電圧で動作し、高い増倍率、高い検出効率、高速応答、優れた時間分解能、広い感度波長範囲といった特長があり、フォトンカウンティングにおいて必要とされる性能を高いレベルで実現しています。さらに、磁場の影響を受けない、衝撃などに強い、入射光の飽和による焼き付きがないという固体素子ならではの優位性もあり、従来からフォトンカウンティングに用いられてきた検出器に代わる大きな可能性をもっています。動作が容易で高性能な検出素子であるMPPCは、医療・学術・計測などの広い分野で応用が期待されます。^{1) 2) 3)}

1. 動作原理

1-1 フォトンカウンティング

光には、粒子と波の2重性があります。光量が極端に少なくなると、光はフォトン (光子)として離散的になり、その数を数えることができます。フォトンカウンティングは、フォトン1個ずつ計測する技術です。

MPPCは、非常に優れた時間分解能と、高増倍率で低ノイズの増倍機能を持ち、フォトンカウンティングに適しています。微弱光計測においてフォトンカウンティングは、出力電流値をアナログ的に測定する方法に比べると、高S/Nと安定した測定を実現することができます。

1-2 ガイガーモードとクエンチング抵抗

APDの逆電圧を降伏電圧以上にして動作させると、

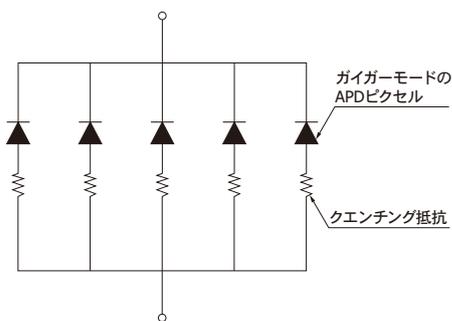
光量の大小に関係なく光入射によって素子固有の飽和出力が発生します（ガイガー放電）。この電圧でAPDを動作させる状態をガイガーモードと呼びます。ガイガーモードにおいては、1フォンの検出時においても放電現象により大きな出力が得られることが特長であり、ひとたびガイガー放電が始まると素子内部の電界が保たれる間は放電が継続します。

ガイガー放電を止めて、次のフォトンを検出するためには、動作電圧を下げるためAPDに外部回路を設ける必要があります。ガイガー放電を止める具体的な例として、ガイガーモードで動作するAPDにクエンチング抵抗を直列に接続し、APDのアバランシェ増倍を短時間で停止する方法があります。この方法では、ガイガー放電による出力電流がクエンチング抵抗を流れる際に電圧降下を起こし、直列に接続されたAPDの動作電圧が下がります。ガイガー放電による出力電流は鋭い立ち上がりのパルス形状で、クエンチング抵抗によるガイガー放電停止時の出力電流の立ち下がりには、比較的なだらかなパルス形状となります [図1-4]。

1-3 構造

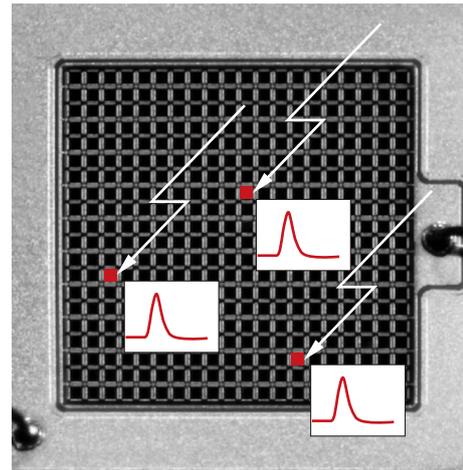
MPPCの構成を図1-1に示します。MPPCは、ガイガーモードAPDとクエンチング抵抗を組み合わせたものを基本単位（1ピクセル）とし、多数のピクセルを2次元に電気的接続をした構造をもっています。

[図1-1] 構成



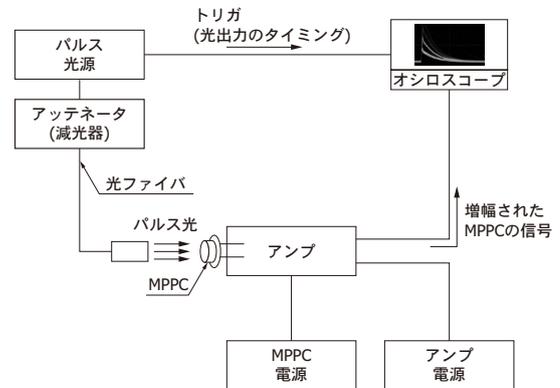
KAPDC00293A

[図1-2] MPPCによるフォトンカウンティングのイメージ



KAPDC00493A

[図1-3] MPPC評価用のブロック図 (オシロスコープを使用)



KAPDC00283B

1-4 基本動作

MPPCのピクセルは、それぞれがフォンの検出時に同じパルスを出します。複数のピクセルで発生したパルスは、重ね合わされて出力されます。たとえば、4フォトンが別々のピクセルに同時に入射して検出された場合、MPPCからは4つのパルスが重ね合わされた高さの信号が出力されます。

各ピクセルからの出力パルス数は1つであり、入射フォトン数によって変化しません。1ピクセルに1フォトンが入った場合も、2フォトンが同時に入った場合も出力パルスは1つだけです。このことは、MPPCに入射するフォンの数が増え、1ピクセルに入射するフォトン数が複数になった場合、入射フォトン数に対するMPPC出力の直線性が悪化することを意味します。入射フォトン数に見合ったピクセル数のMPPCを選択することが重要です。

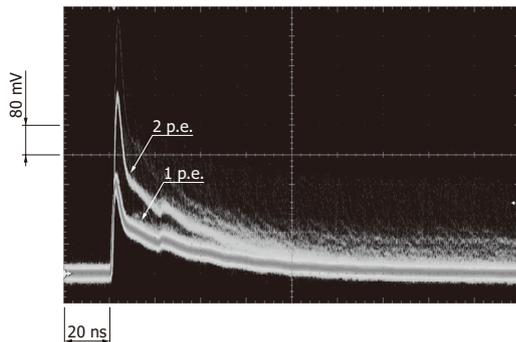
MPPCが検出したフォンの数を見積もるために、以下の2つの方法があります。

- パルスを観測
- 出力電荷を計測

(1) パルスを観測

光が、あるタイミングでMPPCに入射する場合、検出した光子数に応じて出力パルスの高さが変わります。図1-4は、MPPCに光子カウンティングレベルの光をパルス照射して、リニアアンプで増幅した出力をオシロスコープで観測した例です。1光子、2光子〜と検出した光子数ごとにパルスが分離していることが分かります。このパルスの高さを測定することによって、検出した光子の数を見積もることができます。

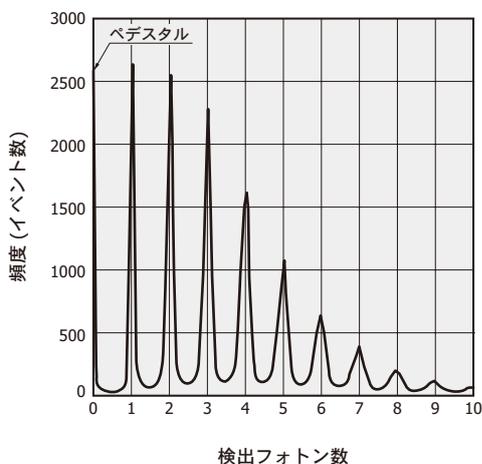
[図1-4] リニアアンプを用いたパルス波形 (S13360-3050CS)



(2) 出力電荷を計測

チャージアンプなどを用いてMPPCからの出力電荷量を計測することによって、特定期間に検出した光子数の分布を見積もることが可能です。積算された電荷量の出力を弁別すると図1-5のような分布が得られます。ピーク値は、左からペDESTAL、1光子、2光子、3光子〜に対応します。MPPCは高増倍率のため出力電荷量が多く、検出光子数に応じた離散的な分布を示しています。

[図1-5] チャージアンプを用いたパルス波高スペクトル (S13360-1350CS)

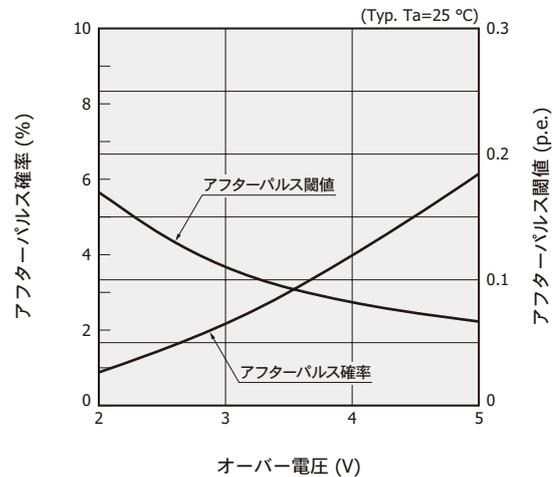


2. 特長

2-1 低アフターパルス

MPPCによる光子検出時に、出力パルスとは別に遅れて再び信号が出力されることがあります。これをアフターパルスと呼んでいます。最新のMPPCは、材料やウエハプロセス技術を改善することによって、従来品に比べてアフターパルスの大幅な低減を実現しました。アフターパルスの低減はS/N向上だけでなく、動作電圧範囲の拡大、高電圧領域での時間分解能特性や検出効率の向上など、さまざまなメリットをもたらします。

[図2-1] アフターパルスーオーバー電圧 (S13360-3050CS)



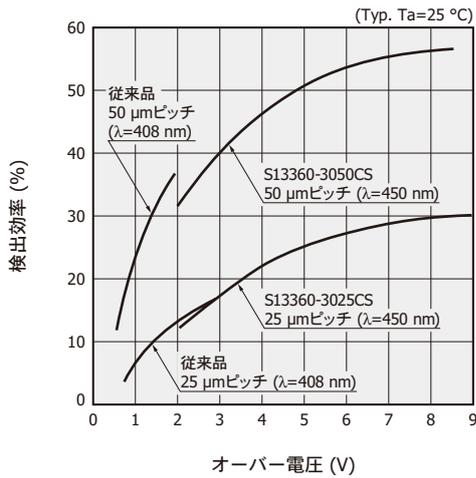
KAPD802563B

2-2 高検出効率

MPPCは、 $\lambda=400\sim 500$ nm付近に感度のピークをもっています。MPPCの感度は検出効率 (Photon Detection Efficiency: PDE)と呼ばれ、量子効率・開口率・アバランシェ確率の積から求められ、このうちアバランシェ確率は電圧依存性を持ちます。25 μm ピッチのMPPCでは開口率の高い設計を採用し、従来品と比べ検出効率を大幅に改善しました。さらに同様の設計で10 μm ・15 μm ピッチの製品も実現し、高速応答・広ダイナミックレンジと高検出効率を両立させています。なお50 μm ・100 μm ピッチの開口率は従来品と同じですが、オーバー電圧を上げることで検出効率は改善されます。

KAPD801333B

[図2-2] 検出効率－オーバー電圧



注) 検出効率は、クロストークとアフターパルスを含みません。

KAPD80217JC

[表2-1] 推奨オーバー電圧

ピクセルピッチ (μm)	推奨オーバー電圧 (V)		
	従来品 S12571/S12572シリーズ	S13360シリーズ	S14160シリーズ
10	4.5	-	5
15	4	-	4
25	-	5	-
50	-	3	-
75	-	3	-

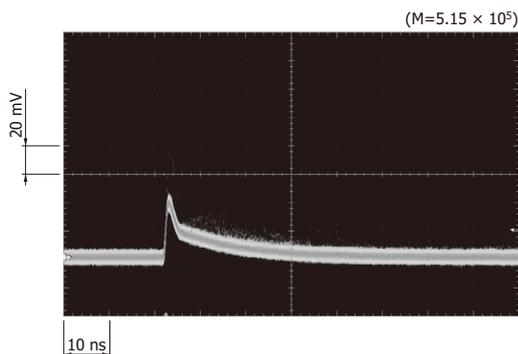
$$V_{ov} = V_{op} - V_{BR} \dots\dots\dots (2-1)$$

V_{ov}: オーバー電圧
 V_{op}: 動作電圧
 V_{BR}: 降伏電圧

2-3 広いダイナミックレンジ

MPPC のダイナミックレンジは、ピクセル数とピクセルの回復時間によって決定されます。最小10 μmのピクセルピッチを実現することで、単位面積当たりのピクセル数を増すとともに、回復時間を短縮して、ダイナミックレンジの飛躍的な拡大を実現しました。

[図2-3] パルス波形 (S14160-1310PS)

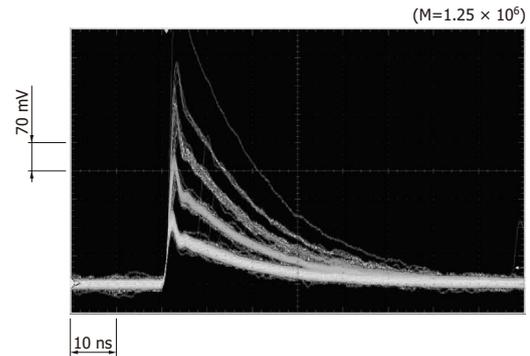


2-4 低クロストーク

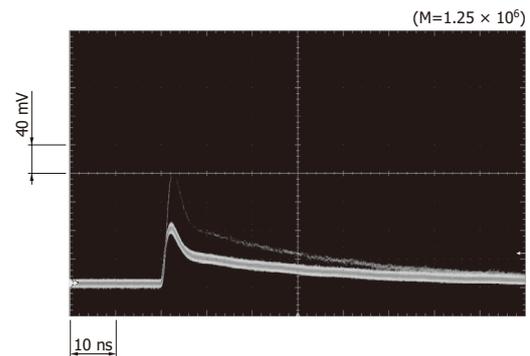
光子を検出したピクセルが他のピクセルに影響し、出力パルスとは別のパルスを同時に発生させることがあります。これをクロストークと呼んでいます。精密計測用のMPPCでは、ピクセル間に障壁を設けることで、クロストークの大幅な低減を実現しました。

[図2-4] パルス波形

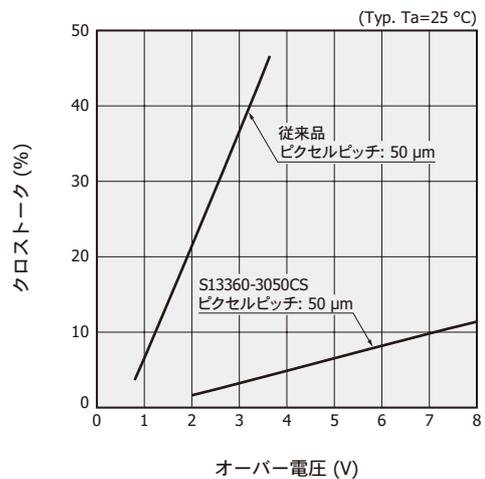
(a) 従来品 (ピクセルピッチ: 50 μm)



(b) 低クロストークタイプ (S13360-3050CS)



[図2-5] クロストーク－オーバー電圧



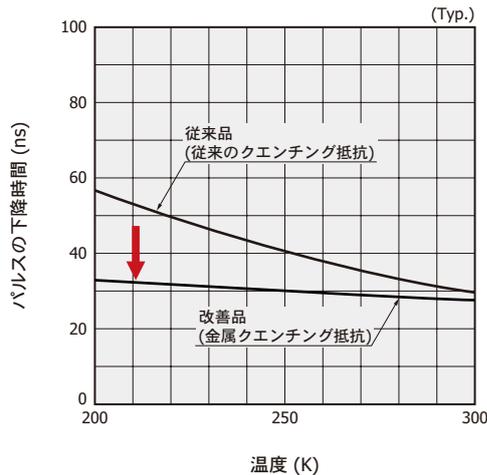
KAPD806131A

2-5 金属クエンチング抵抗

金属クエンチング抵抗の採用により、抵抗値の温度係数が従来の1/5に低減されました。その結果、特に低温時において、パルスの立ち下がりの変化が抑えられ出力波形が改善されます。

使用可能な温度範囲については、データシートを参照してください。

[図2-6] パルスの下降時間-温度
(受光面サイズ: □1 mm, ピクセルピッチ: 50 μm)



KAPD080258JA

3. 特性

3-1 MPPCのタイプと特性

さまざまな用途に対応できるように、豊富なピクセルサイズ・受光面サイズのMPPCを取りそろえています。パッケージとしては、メタル、セラミック、PWB (Printed Wiring Board)、CSP (Chip Size Package)などを用意しています。また、多チャンネルアレイとして、チャンネルごとの特性が均一で、チャンネル間デッドスペースの狭いMPPCアレイも用意しています。

高い増倍率・検出効率を必要とする用途には、ピクセルサイズの大きいタイプが適しており、高速応答・広ダイナミックレンジを必要とする用途にはピクセルサイズの小さいタイプが適しています [表3-1]。また、受光面サイズが大きいタイプは広ダイナミックレンジの計測や広い入射範囲の光検出に適しており、受光面サイズが小さいタイプは高速応答・低ダークカウントを必要とする用途に適しています [表3-2]。

MPPCは、動作電圧によって特性が変化します [表3-3]。さまざまな用途に合った動作電圧の設定ができるように、MPPCは広い動作電圧範囲をもっています。高増倍率・高検出効率・高時間分解能が要求される用途に対しては動作電圧を高め設定し、低ノイズ (ダーク、クロストーク、アフターパルスなど) が要求される用途に対しては動作電圧を低めに設定することによって、MPPCは最良のパフォーマンスを発揮します。

[表3-1] ピクセルサイズの異なるMPPCの特性

ピクセルサイズ	小 ← → 大
増倍率	→ (Large pixel size has higher gain)
検出効率	→ (Large pixel size has higher detection efficiency)
ダイナミックレンジ	← (Small pixel size has wider dynamic range)
高速応答性	← (Small pixel size has faster response)

[表3-2] 受光面サイズの異なるMPPCの特性

受光面サイズ	小 ← → 大
ダイナミックレンジ	→ (Large area has wider dynamic range)
大面積の光検出	→ (Large area has better light detection)
高速応答性	← (Small area has faster response)
低ダークカウント	← (Small area has lower dark count)

[表3-3] 動作電圧の異なるMPPCの特性

動作電圧	低 ← → 高
増倍率	← (増倍率が高くなる)
検出効率	← (検出効率が上がる)
時間分解能	← (時間分解能が上がる)
低ノイズ	← (低ノイズになる)

3-2 増倍率

(1) 定義

MPPCの増倍率は、1ピクセルが1フォトンを検出して発生したパルスの電荷量 (Q)を、1電子当たりの電荷量 (q: 1.602×10^{-19} C)で割った値で定義されます。

$$M = \frac{Q}{q} \dots\dots (3-1)$$

M: 増倍率

Qは逆電圧 (V_R)と降伏電圧 (V_{BR})に依存し、式 (3-2)で表されます。

$$Q = C \times (V_R - V_{BR}) \dots\dots (3-2)$$

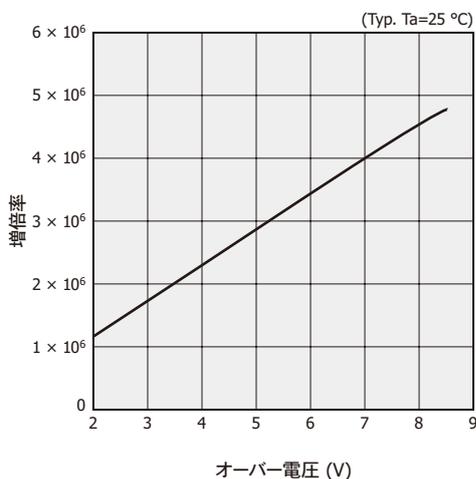
C: 1ピクセルの容量

式 (3-1)(3-2)は、ピクセル容量が大きいほど、逆電圧が高いほど、増倍率が高くなることを示しています。一方で、逆電圧の上昇により、ダークやアフターパルスなどの特性も変化します。用途に応じて、逆電圧を設定する必要があります。

(2) 直線性

MPPCの増倍率は、オーバー電圧を上げると、ほぼ直線的に上昇します。図3-1に代表例を示します。

[図3-1] 増倍率－オーバー電圧 (S13360-3050CS)



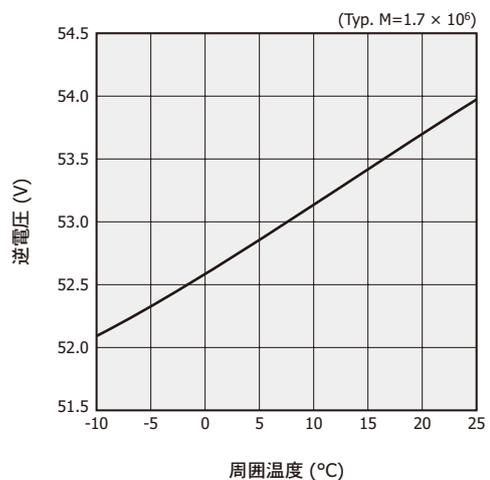
KAPD80226JB

(3) 温度特性

MPPCの増倍率には、APDと同様に温度特性があります。温度が上がると結晶の格子振動が激しくなり、加速されたキャリアのエネルギーが十分に大きくならないうちに結晶と衝突する確率が高くなり、連続したイオン化が起こりにくくなります。イオン化が起こりやすくするためには、逆電圧を上昇させて素子内部の電界を高める必要があります。増倍率を一定にするためには、周囲温度に合わせて逆電圧を変化させるか、素子温度を一定に保つ必要があります。

図3-2は、周囲温度が変化する場合、増倍率を一定にするために必要な逆電圧の例を表しています。

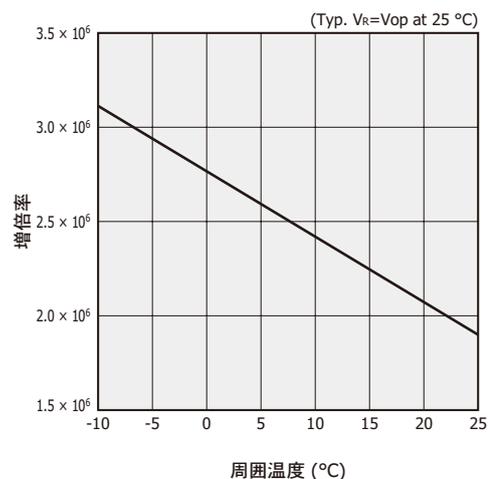
[図3-2] 逆電圧－周囲温度 (S13360-3050CS)



KAPD80227JB

図3-3は、逆電圧を一定にした場合の、増倍率と周囲温度の関係の例を示します。

[図3-3] 増倍率－周囲温度 (S13360-3050CS)



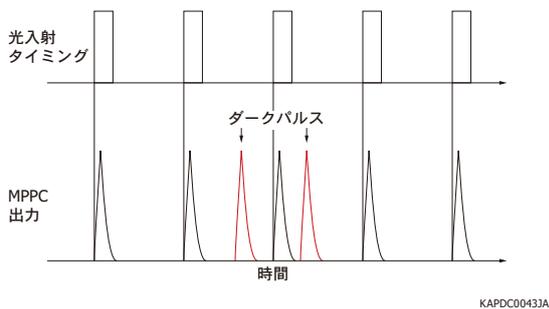
KAPD80228JB

3-3 ダークカウントレート

(1) 定義

MPPCではAPDと同様に、光によって生成されたキャリアだけではなく、熱的に発生したキャリアによってもパルスが発生します。このパルスをダークパルスと呼びます。ダークパルスは信号とともに観測され、検出誤差の原因となります。また、熱的に発生したキャリアも一定の信号 (1 p.e.) に増倍されます。入射光子によるパルスとダークパルスは、パルス形状からは区別が付きません [図3-4]。

[図3-4] ダークパルス



観測されたダークパルスの数をダークカウントと呼び、1秒当たりのダークパルスの数をダークカウントレート [単位: cps (counts per second)] と定義します。当社のMPPCでは、暗状態において0.5 p.e.の閾値を超えるパルスの数でダークカウントレートを定義し、 $N_{0.5 \text{ p.e.}}$ と表します。

(2) 温度特性

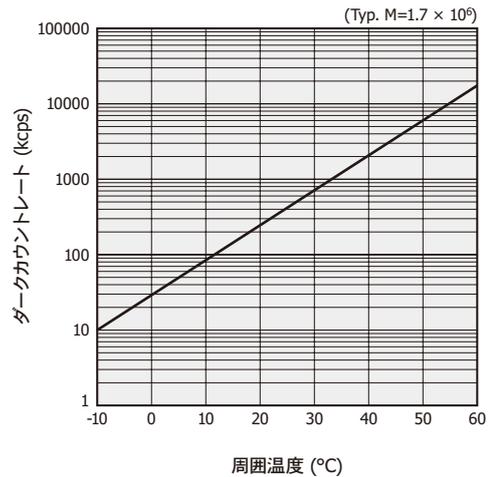
熱的に発生するキャリアによってダークパルスが発生するため、ダークカウントレートは周囲温度によって変化します。ダークカウントレートは、動作温度範囲において式 (3-3) のように表されます。

$$N_{0.5 \text{ p.e.}}(T) \approx AT^{\frac{3}{2}} \exp\left[\frac{-E_g}{2kT}\right] \dots\dots (3-3)$$

- T : 絶対温度 [K]
- A : 任意定数
- E_g : バンドギャップエネルギー [eV]
- k : ボルツマン定数 [eV/K]

図3-5は、増倍率が一定の場合の、ダークカウントレートの周囲温度依存性を示します。

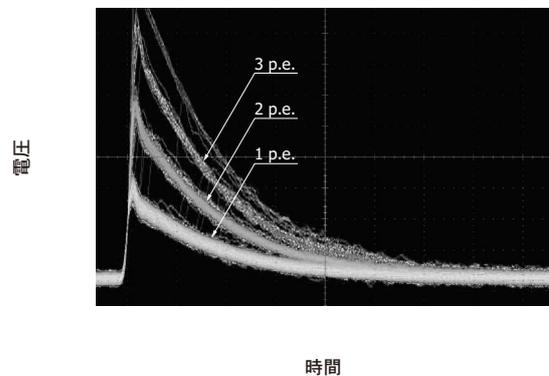
[図3-5] ダークカウントレートー周囲温度 (S13360-3050CS)



3-4 クロストーク

MPPCの1ピクセルに光が入射したときに、2 p.e.以上のパルスが観測されることがあります。これは、MPPCのピクセルでアバランシェ増倍が行われる過程で2次フォトンが発生し、このフォトンをも他のピクセルが検出することによります。この現象を光学的クロストークと呼びます。

[図3-6] クロストークの観測例

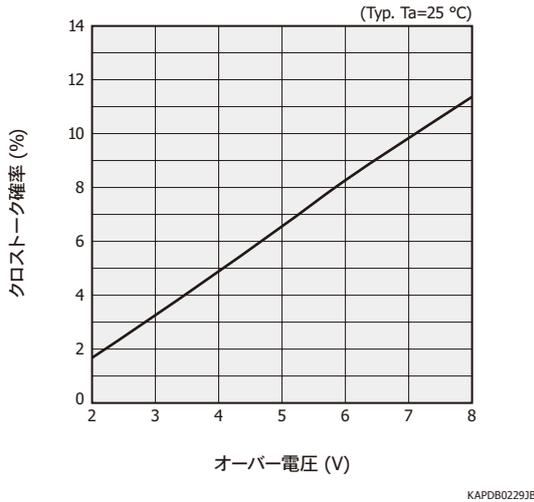


当社は、クロストーク確率 (Pcrosstalk) を式 (3-4) のように定義しています。

$$P_{\text{crosstalk}} = \frac{N_{1.5 \text{ p.e.}}}{N_{0.5 \text{ p.e.}}} \dots\dots (3-4)$$

クロストーク確率は、動作温度範囲でほとんど温度依存性がありません。また、オーバー電圧が高いほど、クロストークの発生頻度は高くなります [図3-7]。

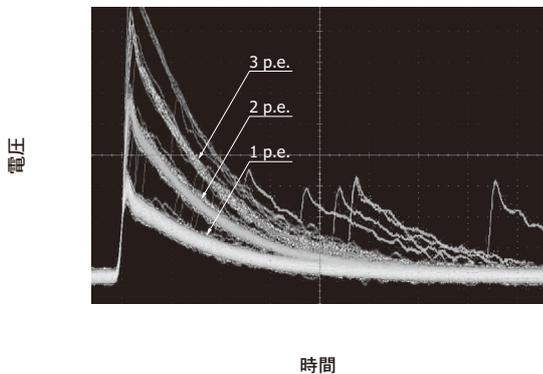
[図3-7] クロストーク確率-オーバー電圧 (S13360-3050CS)



3-5 アフターパルス

MPPCのピクセルでアバランシェ増倍する過程で、結晶欠陥にキャリアが捕獲されることがあります。このキャリアが放出されると、入射光子によるキャリアとともにアバランシェ増倍され、アフターパルスとして観測されます。入射光子によるパルスとアフターパルスは、パルス形状からは区別が付きません。

[図3-8] アフターパルスの観測例



3-6 暗電流

暗状態において出力される電流を暗電流と呼びます。MPPCの暗電流 (I_D)は、式 (3-5)のように表されます。

$$I_D = I_s + I_j + I_b \dots\dots (3-5)$$

I_s : 表面リーク電流
 I_j : 再結合電流
 I_b : バルク電流

MPPCがガイガーモードにあるときのバルク電流は、単位時間あたりにアバランシェ増倍が発生したピクセル数を N_{fired} とすると式 (3-6)で表されます。

$$I_b = q M N_{\text{fired}} \dots\dots (3-6)$$

q : 1電子当たりの電荷量
 M : 増倍率

MPPCの増倍率は $10^5 \sim 10^6$ 倍のため、式 (3-5)では I_b が支配的となり、式 (3-5)は式 (3-7)のように近似することができます。

$$I_D \approx I_b = q M N_{\text{fired}} \dots\dots (3-7)$$

暗状態においては、アバランシェ増倍を起こしたピクセルの数はダークカウントレートと一致するため、暗電流 I_D は $N_{0.5 \text{ p.e.}}$ と $P_{\text{crosstalk}}$ を用いて式 (3-8)のように近似されます。特定の逆電圧における増倍率とクロストーク確率が分かっている場合、ダークカウントレートから暗電流を、暗電流からはダークカウントレートのおおよその値を見積もることができます。

$$I_D \approx q M N_{0.5 \text{ p.e.}} \frac{1}{1 - P_{\text{crosstalk}}} \dots\dots (3-8)$$

3-7 受光感度、検出効率

MPPCの光検出感度を表す特性として、受光感度と検出効率があります。受光感度は、入射光を連続光としてMPPCに入射した場合の、入射光量に対するMPPCの出力電流 (アナログ値)の比で表されます。検出効率は、パルス光をMPPCに入射して光子カウンティングを行ったときに、入射光子数に対して検出できる光子数の割合を示します。なお、受光感度および検出効率に関するパラメータとして、開口率・量子効率・アバランシェ確率があります。

開口率は、MPPCのピクセル領域全体に占める光検出可能部分の割合です。フォトダイオードやAPDと異なり、MPPCの受光面にはピクセル間配線など光を検出できない部分があるため、受光面に入射した光子の一部は検出されません。一般的にピクセルサイズが小さいほど、開口率は低くなる傾向にあります。

量子効率は、ピクセルに入射した光がキャリアを生成する確率として定義されます。量子効率は他の光半導体素子と同様に、入射光の波長に依存します。

アバランシェ確率は、光電効果によりピクセル内で生成されたキャリアがアバランシェ増倍を起こす確率です。MPPCに印加する逆電圧が高いほど、アバランシェ確率は高くなります。

(1) 受光感度

受光感度 S (単位: A/W)は、入射光量 (単位: W)に対する光電流の割合で、式 (3-9)で表されます。

$$S = \frac{I_{MPPC}}{\text{入射光量}} \dots\dots (3-9)$$

I_{MPPC} : 光電流 [A]

受光感度は増倍率に比例するため、MPPCに印加する逆電圧が高いほど受光感度は大きくなります。なお、受光感度にはクロストークやアフターパルスが含まれていることに注意する必要があります。

(2) 検出効率

検出効率 (PDE)は、入射した光子のうち何%を検出できるかを示す特性であり、式 (3-10)で表されます。

$$PDE = \frac{\text{検出光子数}}{\text{入射光子数}} \dots\dots (3-10)$$

検出効率は、開口率・量子効率・アバランシェ確率の積で表すことができます。

$$PDE = F_g \times QE \times P_a \dots\dots (3-11)$$

F_g : 開口率
 QE : 量子効率
 P_a : アバランシェ確率

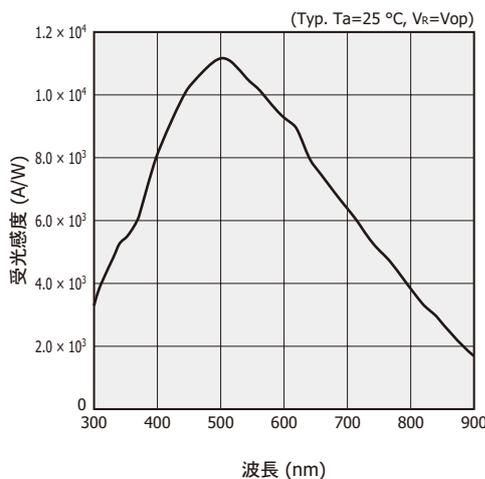
受光感度から求める検出効率 (PDE_{current})は式 (3-12)で表されます。

$$PDE_{\text{current}} = \frac{1240}{\lambda} \times \frac{S}{M} \dots\dots (3-12)$$

λ : 入射光の波長 [nm]

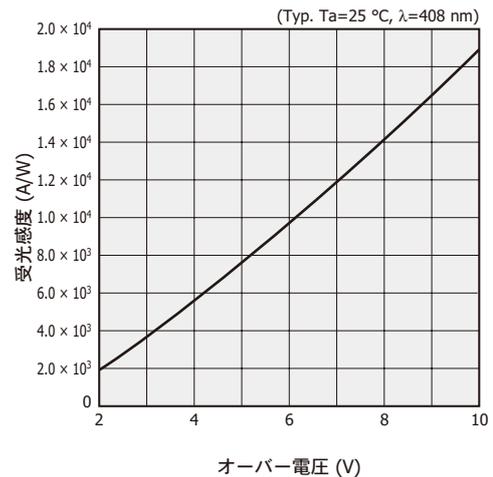
PDE_{current}にはクロストークやアフターパルスが含まれているため、PDEよりも高くなります。

[図3-9] 分光感度特性 (S13360-3025CS)



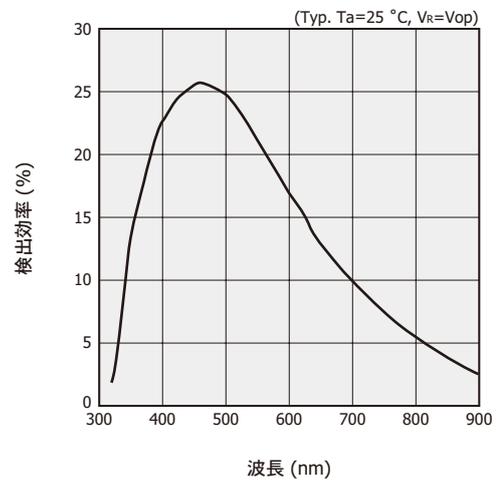
KAPD80230JC

[図3-10] 受光感度-オーバー電圧 (S13360-3025CS)



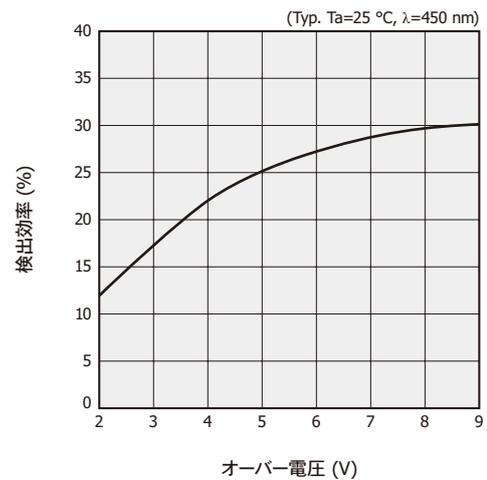
KAPD80231JB

[図3-11] 検出効率-波長 (S13360-3025CS)



KAPD80259JB

[図3-12] 検出効率-オーバー電圧 (S13360-3025CS)

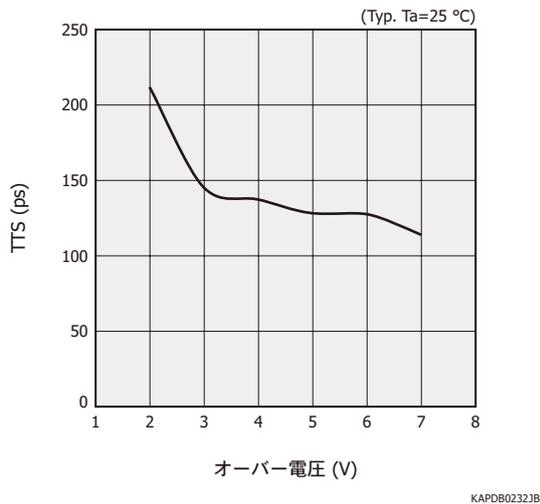


KAPD80233JB

3-8 時間分解能

MPPCの各ピクセルにおいて光入射後から信号が出力されるまでの時間には、配線長の違いなどによってバラツキが生じます。このバラツキはTTS (Transit Time Spread)と呼ばれます。MPPCに印加する逆電圧が大きくなると、TTSは小さくなり改善します。

[図3-13] TTS-オーバー電圧 (S13360-3050PE)



KAPDB0232JB

4. 測定例

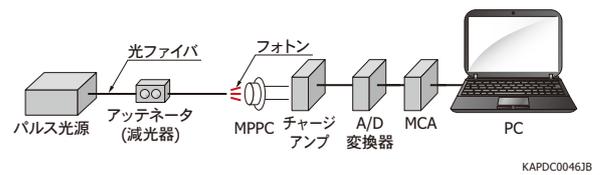
MPPCの特性の測定例について、以下に示します。

4-1 増倍率

(1) チャージアンプによる測定

MPPCが光子を検出したときの出力電荷量から、増倍率を見積もることができます。図4-1は、チャージアンプを用いて増倍率を測定する接続例を示します。

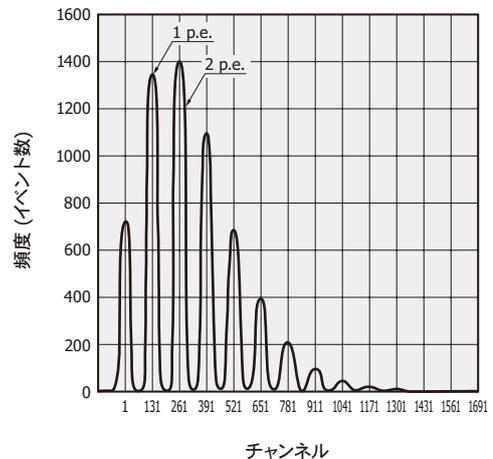
[図4-1] 増倍率測定用の接続例 (チャージアンプを使用)



KAPDC0046JB

アッテネータで十分に減光したパルス光をMPPCに照射し、出力電荷量の度数分布を取ると図4-2のような出力結果が得られます。

[図4-2] 出力電荷量の度数分布例



KAPDB01363A

図4-2において、曲線のピークは左からペDESTAL、1光子、2光子～を示します。ペDESTALは、出力の基準となります。この例は、MPPCが1光子、2光子を中心として検出していることを表しています。隣り合うピークの間隔は、1光子検出分の電荷量に相当します。増倍率 (M) は式 (4-1) で表されます。

$$M = \frac{\text{隣り合うピーク間の電荷量差}}{q} \dots\dots\dots (4-1)$$

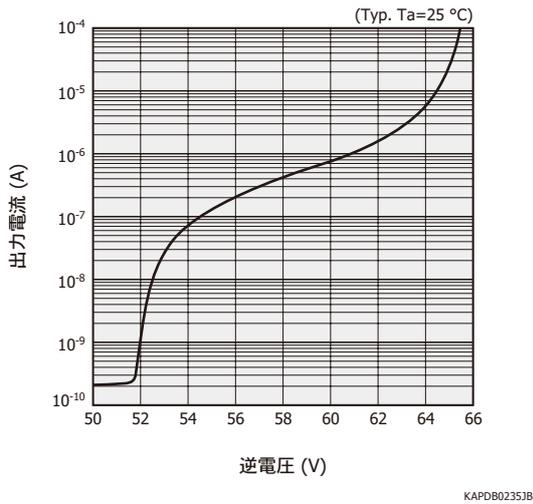
q: 1電子当たりの電荷量

また、式 (4-1) を用いて増倍率-逆電圧グラフを作成し、外挿することで増倍率 1 の逆電圧、すなわち降伏電圧 V_{BR} を求めることができます。

(2) dl/dV法による測定

MPPCの出力電流-逆電圧特性を図4-3に示します。出力電流を逆電圧で微分した関数 [式 (4-2)] に極大値を与える電圧をVpeakとすると、Vpeak - VBRは型名ごとにほぼ一定ですが、VpeakとVBRのそれぞれの値は同型名の場合でも素子ごとに異なります。あらかじめ、ある型名におけるVpeak - VBRを求めておくと、特定の素子についてVpeakを測定することによってVBRを推定することができます。

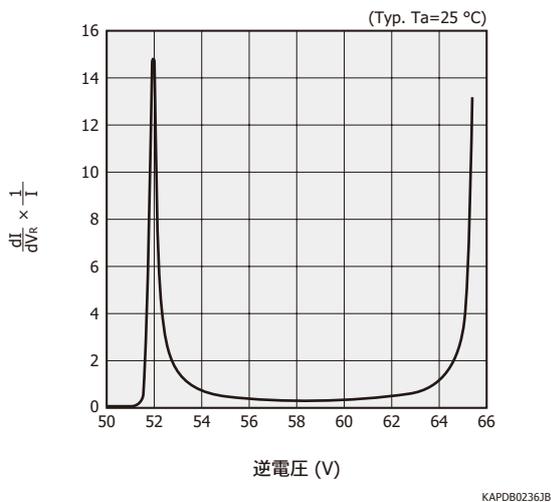
[図4-3] 出力電流-逆電圧 (S13360-3050CS)



$$\frac{d}{dV_R} \log(I) = \frac{dI}{dV_R} \times \frac{1}{I} \dots\dots (4-2)$$

I : 出力電流 [A]
V_R: 逆電圧 [V]

[図4-4] $\frac{dI}{dV_R} \times \frac{1}{I}$ の逆電圧特性



増倍率 (M) は、式 (4-3) で表すことができます。

$$M = \frac{C \times (V_R - V_{BR})}{q} \dots\dots (4-3)$$

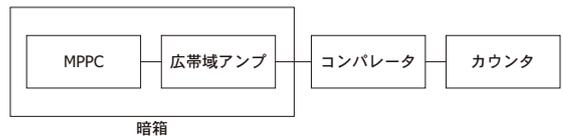
C : ピクセル容量 [F]
V_{BR}: 降伏電圧 [V]
q : 1電子当たりの電荷量 [C]

ピクセル容量は一定であるため、増倍率はdI/dV法によって求めた降伏電圧と逆電圧から求められます。ただし、推奨動作電圧から大きく外れた高い動作電圧を印加した場合には、アフターパルスやクロストークなどのノイズ成分が大きくなり、正確な測定ができなくなります。

4-2 ダークカウントレート

MPPCを暗箱の中に設置して、出力パルスをカウンタに入力します。あらかじめ決めておいた閾値 (0.5 p.e. など) を超える出力パルスのイベントの回数をカウントすることによって、ダークカウントレートを求めることができます。なお、MPPCの出力パルス幅は数十nsと非常に短いため、広帯域のアンプを使用する必要があります。

[図4-5] ダークカウントレート測定用のブロック図

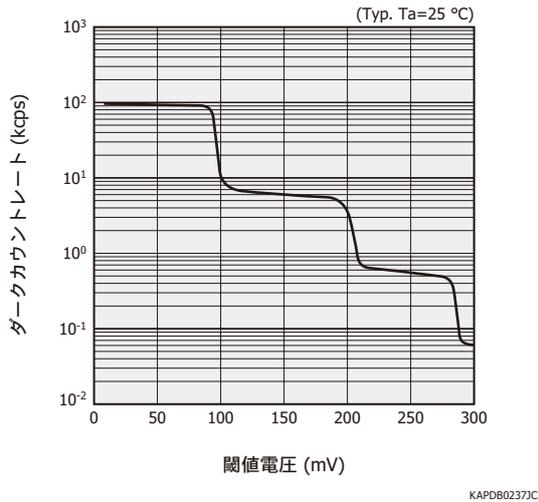


4-3 クロストーク

閾値をたとえば0.5 p.e.と1.5 p.e.に設定して、閾値を超えたダークパルスのカウントレートを測定することによって、それぞれの閾値におけるダークカウントレート N_{0.5 p.e.}、N_{1.5 p.e.}を求めることができます。クロストーク確率 P_{crossstalk}は、式 (3-4) によって測定できます。

さらに、閾値を掃引するとダークカウントレートのプロットは図4-6のようになります。ダークカウントレートが急激に減少する閾値電圧は、左から1フォトン、2フォトン~のパルス高さに対応します。このグラフからN_{0.5 p.e.}、N_{1.5 p.e.}、N_{2.5 p.e.}~を求められます。

[図4-6] ダークカウントレート-閾値電圧



4-4 アフターパルス

ダークパルスの発生はランダムであり、ダークパルスが発生する時間間隔は指数分布に従います。ダークパルス発生時間間隔 Δt_{dark} (単位: s) は式 (4-4) で表されます。

$$\Delta t_{\text{dark}} \propto \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{dark}}}\right) \dots\dots (4-4)$$

τ_{dark} : ダークパルス発生の特定数 [s]

アフターパルスの発生時間間隔は、複数の指数分布の和で表されます。アフターパルス発生時間間隔 Δt_{AP} (単位: s) は式 (4-5) で表されます。

$$\Delta t_{\text{AP}} \propto \sum_k A_k \times \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_k}\right) \dots\dots (4-5)$$

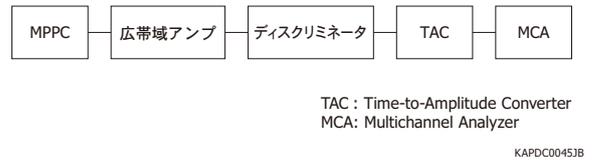
k : Δt_{AP} を構成する時定数の数
 A_k : 定数
 τ_k : アフターパルス発生の特定数 [s]

τ_{dark} と τ_k は著しく異なるため ($\tau_{\text{dark}} \gg \tau_k$)、あるパルスが発生してから次のパルスが観測されるまでの経過時間 Δt のヒストグラムを作成し、アフターパルスを含まない時間領域でダークパルス成分を見積もります。ヒストグラム全体からフィッティングした成分を差し引くことにより、アフターパルス成分を求めることができます。

測定の際には、ディスクリミネータ・TAC・MCA を使うことによって、前述のヒストグラムを作成することができます。MPPC への光子入射により得られる出力信号はアンプで増倍されディスクリミネータへ送られます。ディスクリミネータは光子検出の閾値に達したレベルの信号を受け取ると TAC へ信号を送ります。MPPC から次の信号が出力されると、同様にして TAC へ信号が送られます。ここで TAC は、初めの出力信号と次の出力信号との時間間隔に比例した振幅のパルスを出力します。

MCA は TAC から受け取ったパルスはその高さに応じて分類し、チャンネルに分けていきます。MCA に蓄積されたデータは Δt のヒストグラムとなります。

[図4-7] アフターパルス測定接続例



TAC: Time-to-Amplitude Converter
 MCA: Multichannel Analyzer

KAPDC00453B

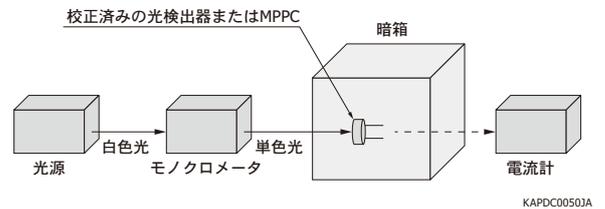
4-5 受光感度

受光感度を測定するためには、まず単色光源からの光を暗箱中の校正済みの光検出器で検出し、その出力値から光検出器への入射光量 (単位: W) を求めます。次に、光検出器の代わりに MPPC を用いて同様に測定を行い、MPPC の光電流 (単位: A) を測定します。これらの測定結果から、受光感度 (S) を式 (4-6) より求めます。

$$S = \frac{I_{\text{MPPC}}}{\text{入射光量}} \dots\dots (4-6)$$

I_{MPPC} : 光電流 [A]

[図4-8] 受光感度測定接続例

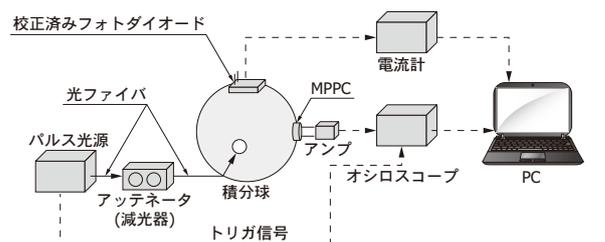


KAPDC00503A

4-6 検出効率

検出効率を測定するには、図4-9のようにパルス光源を用います。パルス光源から出た単色パルス光をアッテネータで減衰させた後に積分球で反射し、校正済みフォトダイオードおよび MPPC へ光を入射します。校正済みフォトダイオードからの出力電流を電流計で取得し、その値から MPPC への入射光子数を求めます。⁴⁾

[図4-9] 検出効率測定接続例



KAPDC00513A

パルス光源からのトリガ信号と同期してオシロスコープでMPPCのデータ取得を行い、パルス光に対するMPPCの応答波形を測定します。その応答波形からMPPCの出力電荷量を取得します。この出力電荷量の取得を多数イベントにおいて行い、図4-2のような出力電荷量の度数分布を取得します。パルス光が微弱で1パルス光当たりの光子数が数個のとき、この分布は理想的にはMPPCの検出光子数を平均値にもつポアソン分布に従います。しかし、一部のイベントにはダークパルスが含まれ、1 p.e.以上のイベントにはクロストークとアフターパルスの影響があるため、実際に測定される分布はポアソン分布からは歪んだ分布となります。ペDESTALのイベントにはクロストークおよびアフターパルスの影響がないため、このイベント数からダークパルスの影響を補正することによりポアソン分布の平均値を取得することができます。

ポアソン分布は式 (4-7) で定義されます。

$$P(n, x) = \frac{n^x e^{-n}}{x!} \dots\dots (4-7)$$

n: MPPCの検出光子数 (平均)
x: MPPCの検出光子数

式 (4-7) で $x=0$ の場合、ポアソン分布は式 (4-8) で表されます。

$$P(n, 0) = e^{-n} \dots\dots (4-8)$$

式 (4-8) の左辺は、ダークパルス分の補正も含めると式 (4-9) で表されます。

$$P(n, 0) = \frac{\left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}}\right)}{\left(\frac{N_{ped}^{dark}}{N_{tot}^{dark}}\right)} \dots\dots (4-9)$$

N_{ped} : パルス光計測時の0 p.e.イベント数
 N_{tot} : パルス光計測時の全イベント数
 N_{ped}^{dark} : ダーク状態の0 p.e.イベント数
 N_{tot}^{dark} : ダーク状態の全イベント数

MPPCの検出光子数 (平均) n は式 (4-10) で表されます。 n を入射光子数で割ることによって、検出効率を求めることができます。

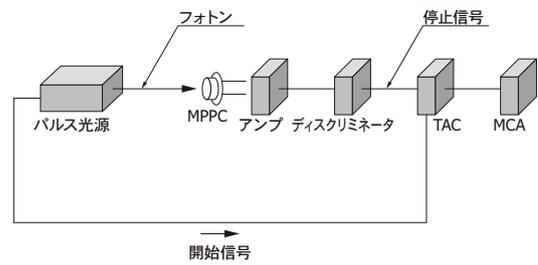
$$n = -\ln\left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}}\right) = -\ln\left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}}\right) + \ln\left(\frac{N_{ped}^{dark}}{N_{tot}^{dark}}\right) \dots\dots (4-10)$$

4-7 時間分解能

図4-10はTTS法による時間分解能の測定装置例で

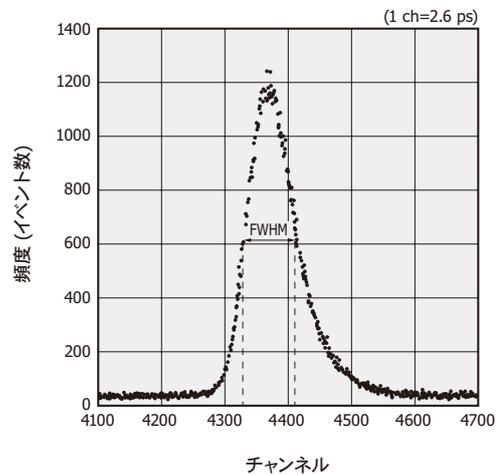
す。パルス光源は光子を出すと同時にTACへ開始信号を送ります。開始信号を受け取ったTACは、時間測定を開始します。一方、MPPCへの光子入射により得られる出力信号はアンプで増倍されディスクリミネータへ送られます。ディスクリミネータは光子検出の閾値に達したレベルの信号を受け取るとTACへ信号を送ります。TACはディスクリミネータからの信号を時間計測の停止信号として受け取ります。ここでTACは光子が入射してから出力するまでの時間に比例したパルスを出力します。MCAはTACから受け取ったパルスをその高さに応じて分類し、チャンネルに分けていきます。MCAに蓄積されたデータはMPPCの応答のヒストグラムとなり、時間分解能はこのヒストグラムの半値幅 (FWHM) で表されます。

【図4-10】 時間分解能測定のための接続例



KAPDC00301A

【図4-11】 TTS (代表例)



KAPD801373A

4-8 ダイナミックレンジ

(1) 同時に入射した光子に対するダイナミックレンジ

同時に入射した光子についてのダイナミックレンジは、MPPCのピクセル数と検出効率によって決まります。入射光子数が多くなると、1ピクセルに2個以上の光子が入り始めます。1ピクセルに2個以上の光子が入射しても、光子入射のオン・オフ判定しかできません。

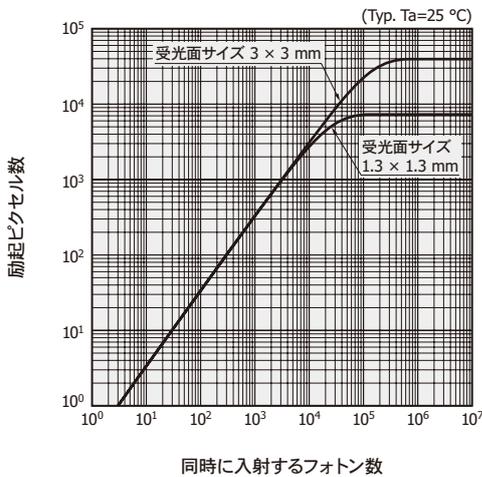
ん。そのため、入射光子数が多くなると直線性が悪化します。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \times \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}}\right) \right\} \dots (4-11)$$

N_{fired} : 励起ピクセル数
 N_{total} : 全ピクセル数
 N_{photon} : 入射光子数
 PDE : 検出効率

ダイナミックレンジを広くするためには、同時に入射する光子に対して十分なピクセル数をもったMPPC (大受光面サイズまたは小ピクセルピッチのタイプ) を使う必要があります。

[図4-12] 同時に入射する光子に対するダイナミックレンジ (ピクセルピッチ: 15 μm)



KAPD80238JB

(2) フォトンカウンティングのダイナミックレンジ

MPPCの励起ピクセル数は、式(4-12)で表されます。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{photon}} \times \text{PDE} \dots (4-12)$$

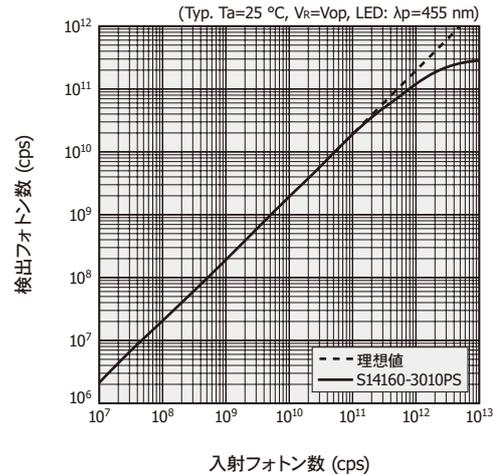
入射光子数が多くなると、複数の出力パルスが重なるためカウント数に誤差が生じ、直線性が悪化します。直線性は、パルスペア分解能と呼ばれるパラメータで決定されます。パルスペア分解能は、MPPCの回復時間(「4-9 回復時間」参照)と読み出し回路の特性によって決まります。パルスペア分解能を考慮したMPPCの励起ピクセル数は、式(4-13)で表されます。

$$N_{\text{fired}} = \frac{N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{1 + N_{\text{photon}} \times \text{PDE} \times T_{\text{resolution}}} \dots (4-13)$$

T_{resolution}: パルスペア分解能

ダイナミックレンジを広くするためには、回復時間の短いMPPCを選択する必要があります。

[図4-13] フォトンカウンティングのダイナミックレンジ (S14160-3010PS)



KAPD80239JB

(3) 電流測定 of ダイナミックレンジ

MPPCの光電流 (I_{MPPC})は、式(4-14)で表されます。

$$I_{\text{MPPC}} = N_{\text{photon}} \times \text{PDE}_{\text{current}} \times M \times q \dots (4-14)$$

PDE_{current}: 受光感度から求める検出効率
 M : 増倍率
 q : 1電子当たりの電荷量

入射光子数は、入射光量 (単位: W)を用いて、式(4-15)で表されます。

$$N_{\text{photon}} = \frac{\text{入射光量} \times \lambda}{h \times c} \dots (4-15)$$

λ: 波長 [m]
 h: プランク定数
 c: 光速

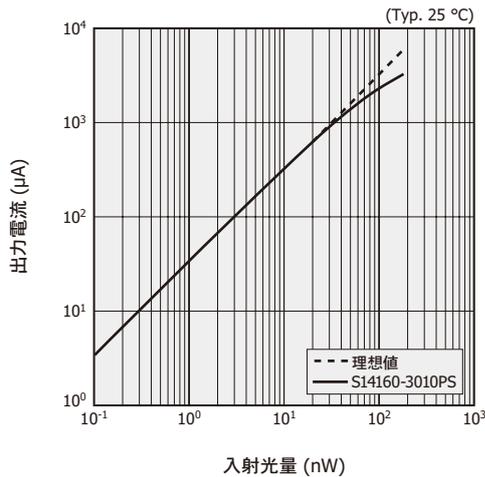
入射光量が多くなると、1ピクセルに2つ以上の光子が入射したり、同じピクセルに回復時間内に光子が入射することが増えてきます。これが直線性の低下を招きます。これらを考慮したMPPCの出力電流 I_{MPPC}は式(4-16)で表されます。

$$I_{\text{MPPC}} = \frac{N_{\text{photon}} \times \text{PDE}_{\text{current}}}{1 + \frac{N_{\text{photon}} \times \text{PDE}_{\text{current}} \times T_{\text{R}}}{N_{\text{total}}}} \times M \times q \dots (4-16)$$

T_R: 回復時間 [s]

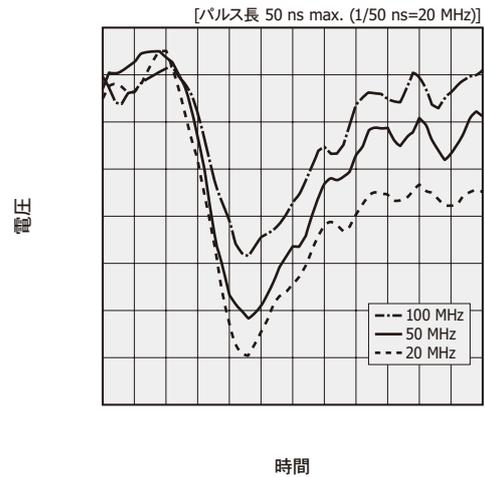
大光量の入射時には、素子が発熱して増倍率が低下することによって、直線性が悪化することがあります。また出力電流が多く流れるため、使用する保護抵抗によってはMPPCに印加される逆電圧が低下する場合があります。このため適切な値の保護抵抗を使用する必要があります。

[図4-14] 出力電流－入射光量 (S14160-3010PS)



KAPD80240JB

[図4-16] 異なる周波数のパルス光を入射したときの出力パルス (S14160-1315PS)

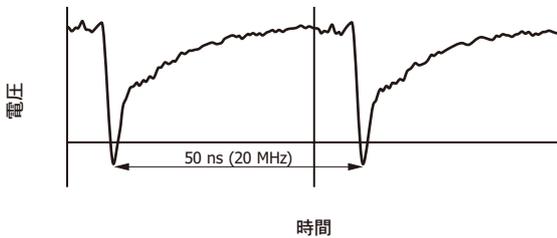


KAPD80163JB

4-9 回復時間

ピクセルの増倍率が100%回復するために必要な時間（回復時間）は、受光面サイズとピクセルサイズによって異なります。図4-15にS14160-1315PSの特定の1ピクセルに、パルスの回復時間と同じ間隔で光が入射したときの出力を示します。パルスが100%の高さまで回復していることが分かります。

[図4-15] パルスレベルの回復 (S14160-1315PS)



KAPD80158JB

出力パルスが完全に回復する前に次の入力パルスが入射したときには、動作電圧で設定した増倍率に満たない小さいパルスが出力されます。図4-15のパルスの立ち上がり部分はピクセルの充電過程であり、充電が完了しないうちに次の光子を検出した場合、その充電レベルに応じた大きさのパルス出力となります。

図4-16は、特定の1ピクセルに異なる周波数のパルス光を入射したときの出力パルス形状を示します。光の入射周波数を上げるにつれ、ピクセルの充電が十分にできず、パルスの高さが低くなる様子がみられます。

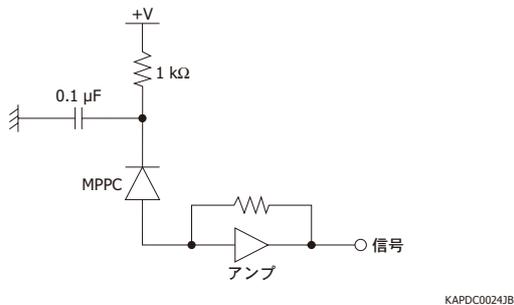
5. 使い方

5-1 接続例

MPPCの特性は、動作電圧や周囲温度によって大きく変わります。一般に動作電圧を上げることによって素子内部の電界強度が上がり、増倍率、検出効率、時間分解能が向上しますが、一方でダークカウント、アフターパルス、クロストークなどS/Nを低下させる成分が増加します。優先すべき特性に合わせて、動作電圧を設定する必要があります。

MPPCは用途に応じて、さまざまな使い方をすることができますが、ここではパルスを観測する場合の代表的な使い方を紹介します。測定時には、広帯域のアンプとオシロスコープを使用すると便利です。図5-1に広帯域アンプを接続する場合の接続例を示します。電源側の1 k Ω 抵抗・0.1 μ Fコンデンサは、電源の高周波ノイズを取り除くためのローパスフィルタを構成します。1 k Ω 抵抗は、過電流に対する保護抵抗の役割も担います。MPPCは微弱光検出器ですが、シンチレータとのカップリング時など、大光量の光が入射する場合には大きな電流が流れ、保護抵抗における電圧低下が顕著になることがあります。用途に応じて、保護抵抗の値を設定する必要があります。なお、アンプはできるだけMPPCの近くに接続してください。

[図5-1] 接続例



MPPCの出力パルスの急峻な立ち上がりを活用した計測を行う場合、広帯域のアンプとオシロスコープを選定する必要があります。MPPCの出力パルスは数nsで立ち上がるため、1 GHz程度でサンプリングを行えるような機種を推奨します。狭帯域のアンプやオシロスコープを使用すると、出力パルスになまりが生じ、正確な値が得られないことがあります。

5-2 デジタル方式・アナログ方式からの選択

MPPCに入射する光量によって、読み出し方式をデジタル方式・アナログ方式から選択する必要があります。

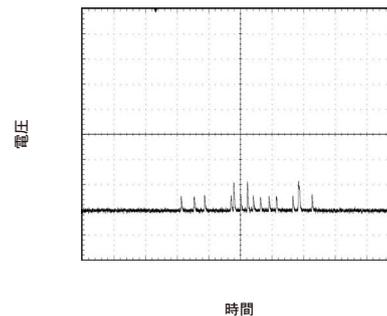
入射光量の異なる場合のMPPCの出力をオシロスコープで観測した波形を図5-2 (a)(b)(c)に示します。(a)(b)(c)の順で入射光量が多くなり、(a)は極微弱光を入射した場合を示します。(a)の出力信号は離散したパルス形状であり、この状態ではデジタル方式を選択して、信号を2値化しパルス数をカウントする方が高S/Nの測定ができます。デジタル方式の場合、ダークカウントは減算が可能のため、検出限界はダークカウントの揺らぎによって決まります。

入射光量が多くなると、出力波形はパルスが重なり合った形状になります [(b)(c)]。この状態ではパルス数をカウントできないため、アナログ方式を選択して、アナログ出力を測定し平均値を求めます。アナログ方式の検出限界は、暗電流のショットノイズと読み出し回路の遮断周波数により決まります。

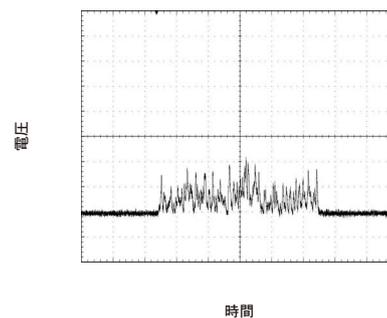
図5-3は、デジタル方式・アナログ方式のそれぞれに適した入射光量範囲 (受光面サイズ: \square 3 mm, ピクセルピッチ: 50 μ mの場合)を示します。

[図5-2] 出力波形

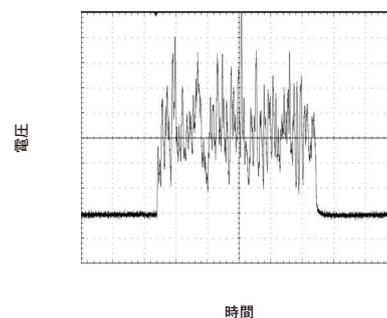
(a) 光量…小の場合 (極微弱光)



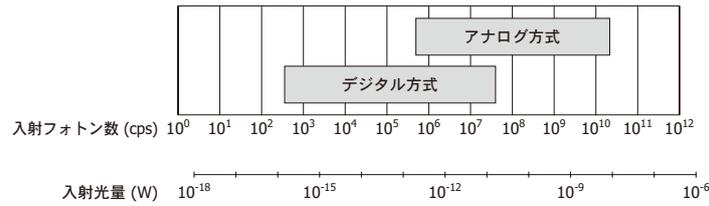
(b) 光量…中の場合



(c) 光量…大の場合



[図5-3] デジタル方式・アナログ方式に適した入射光量範囲 (冷却タイプ, 受光面サイズ: □3 mm, ピクセルピッチ: 50 μm)



KAPDC0688JB

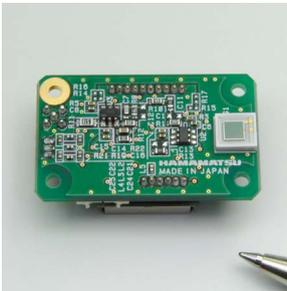
5-3 MPPCモジュール

MPPCモジュールは、MPPCを内蔵した微弱光検出モジュールです。フォトンカウンティングレベル～nWレベルの広い光量範囲の計測が可能なラインアップを用意しています。MPPCの動作に必要なアンプと高圧電源回路を搭載しており、電源（±5 Vなど）を供給するだけで測定が可能です。比較的入射光量が多い用途向けの、温度補償機能を搭載し安定した計測が可能なアナログ出力タイプの非冷却型、フォトンカウンティング用に低ダークカウントを実現したデジタル出力タイプの電子冷却型などを用意しています。お客様の要望する仕様に合わせてカスタム対応も可能です。詳細は、「MPPCモジュール」技術資料を参照してください。

[図5-4] MPPCモジュール

(a) アナログ出力タイプ
非冷却型 C13365シリーズ

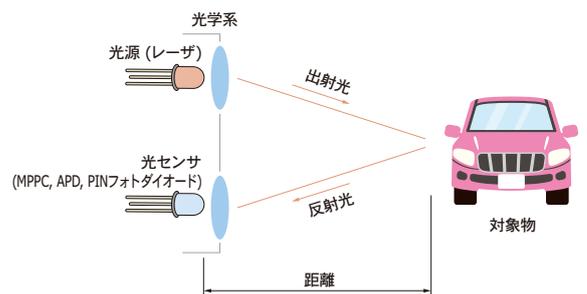
(b) デジタル出力タイプ
電子冷却型 C13366-GDシリーズ



6. 応用例

6-1 LiDAR (Light Detection and Ranging)

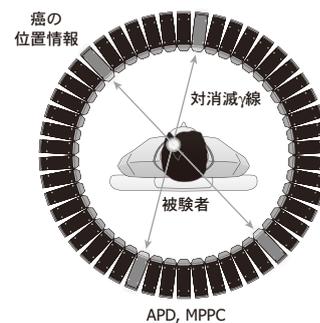
対象物にレーザ光を照射し、その反射光を光センサでとらえて距離を測定します。自動車の自動運転化に向けた取り組みが進む近年、LiDARは高度運転支援システム (ADAS: Advanced Driver Assistance System)、無人搬送車 (AGV: Automatic Guided Vehicle)などに利用されています。



KACCC1067JA

6-2 シンチレーション計測

360°に配置されたAPDまたはMPPCが対消滅γ線を検出し、癌などのターゲットの位置をとらえます。APDとMPPCは磁場の影響を受けないため、MRIと組み合わせて使用することも可能です。



KACCC0745JA

6-3 蛍光計測

試薬の微弱な蛍光発光をMPPCで検出することができます。



KACCC07493B

6-4 高エネルギー実験

究極の物質構造を解明するための高エネルギー加速器実験において、MPPCが使用されています。欧州原子核研究機構（CERN）は、次世代線形加速器実験 ILC（International Linear Collider）の粒子エネルギーを検出するカロリメータ部にMPPCを採用することを検討しています。また、高エネルギー加速器研究機構（KEK）と日本原子力研究開発機構（JAEA）が共同で東海村（茨城県）に建設を進めている大強度陽子加速器施設（J-PARC）においては、ニュートリノが質量をもつかどうかを検証するため、スーパーカミオカンデ（岐阜県）へ向けてニュートリノビームを送って観測するT2K（Tokai to Kamioka）実験が行われています。この実験では、ニュートリノビームのモニタ用にMPPC（62000個）が採用されています。

■参考文献

- 1) 山村和久, 里健一, 鎌倉正吾, 大須賀慎二 "MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY Vol.27 No.1 January 2009" MPPC の製品紹介と開発状況 (2009)
- 2) K. Sato, K. Yamamoto, K. Yamamura, S. Kamakura, S. Ohsuka et al., Application Oriented Development of Multi-Pixel Photon Counter (MPPC), 2010 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (2010)
- 3) T. Nagano, K. Yamamoto, K. Sato, N. Hosokawa, A. Ishida, T. Baba et al., Improvement of Multi-Pixel Photon Counter (MPPC), 2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (2011)
- 4) Patrick Eckert, Hans-Christian Schultz-Coulon, Wei Shen, Rainer Stamen, Alexander Tadday et al., Characterisation Studies of Silicon Photomultipliers, <http://arxiv.org/abs/1003.6071v2>

MPPCは、浜松ホトニクス株式会社の登録商標です。

本資料の記載内容は、令和7年2月現在のものです。

製品の仕様は、改良などのため予告なく変更することがあります。本資料は正確を期するため慎重に作成されたものですが、まれに誤記などによる誤りがある場合があります。本製品を使用する際には、必ず納入仕様書をご用命の上、最新の仕様をご確認ください。

本製品の保証は、納入後1年以内に瑕疵が発見され、かつ弊社に通知された場合、本製品の修理または製品の納入を限度とします。ただし、保証期間内であっても、天災および不適切な使用に起因する損害については、弊社はその責を負いません。

本資料の記載内容について、弊社の許諾なしに転載または複製することを禁じます。

浜松ホトニクス株式会社

www.hamamatsu.com

仙台営業所	〒980-0021 仙台市青葉区中央3-2-1 (青葉通プラザ11階)	TEL (022) 267-0121 FAX (022) 267-0135
東京営業所	〒100-0004 東京都千代田区大手町2-6-4 (常盤橋タワー11階)	TEL (03) 6757-4994 FAX (03) 6757-4997
中部営業所	〒430-8587 浜松市中央区砂山町325-6 (日本生命浜松駅前ビル)	TEL (053) 459-1112 FAX (053) 459-1114
大阪営業所	〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13 (大阪国際ビル10階)	TEL (06) 6271-0441 FAX (06) 6271-0450
西日本営業所	〒812-0013 福岡市博多区博多駅東1-13-6 (いちご博多イーストビル5階)	TEL (092) 482-0390 FAX (092) 482-0550

固体営業推進部 〒435-8558 浜松市中央区市野町1126-1 TEL (053) 434-3311 FAX (053) 434-5184

Cat. No. KAPD9008J05 Feb. 2025 DN