

## 1 Si APD

- 1-1 特長
- 1-2 アバランシェ増倍の原理
- 1-3 暗電流
- 1-4 増倍率-逆電圧特性
- 1-5 ノイズ特性
- 1-6 分光感度特性
- 1-7 応答特性
- 1-8 多素子タイプ
- 1-9 周辺回路との接続
- 1-10 新たな取り組み

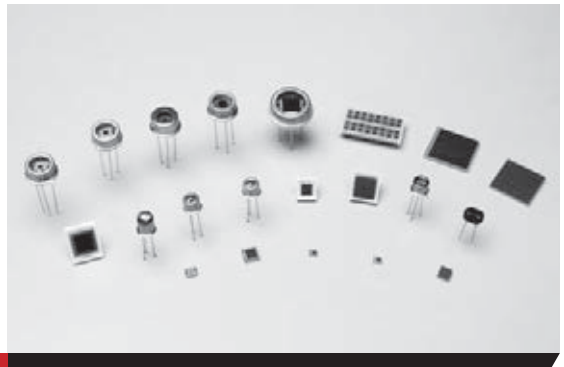
## 2 MPPC

- 2-1 動作原理
- 2-2 特長
- 2-3 特性
- 2-4 使い方
- 2-5 測定例
- 2-6 デジタル方式・アナログ方式からの選択

## 3 応用例

- 3-1 光波距離計
- 3-2 障害物検知
- 3-3 LIDAR (Light Detection and Ranging)
- 3-4 シンチレーション計測
- 3-5 蛍光計測
- 3-6 高エネルギー実験

# Si APD、MPPC



APD (アバランシェ・フォトダイオード)は、逆電圧を印加することにより光電流が増倍される高速・高感度のフォトダイオードです。アバランシェ増倍と呼ばれる内部増倍機能により、高い受光感度を実現し微弱な信号の測定が可能です。信号を増倍することによりノイズの影響を低減でき、PINフォトダイオードに比べ高いS/Nが得られ、優れた直線性もっています。

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)は、複数のガイガーモードAPDピクセルから成る光半導体素子です。MPPCはAPDと比べて増倍率が非常に高く、フォトンカウンティングが可能です。また、低電圧動作が可能という特長があります。

当社は、独自の技術を生かし、用途に合わせてさまざまなタイプのSi APD、MPPCを用意しています。また、カスタムデザインにも幅広く対応しています。

## || 浜松ホトニクスSi APD

タイプ		特長	用途
短波長タイプ	低バイアス動作	紫外～可視域の感度を向上させたタイプです。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●微弱光検出</li> <li>●分析機器</li> </ul>
	低端子間容量		
近赤外タイプ	低バイアス動作	近赤外域で感度が高く、バイアス電圧 (逆電圧)の低いタイプです。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●空間光伝送</li> <li>●光波距離計</li> <li>●光ファイバ通信</li> </ul>
		表面実装型セラミックパッケージを用い、メタルパッケージと同等の動作温度 (-20～+85 °C)を実現した安価で高信頼性のAPDです。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●光波距離計</li> <li>●レーザーダ</li> <li>●空間光伝送</li> </ul>
	低温度係数	逆電圧の温度係数が低く、増倍率の調整が容易です。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●空間光伝送</li> <li>●光波距離計</li> <li>●光ファイバ通信</li> </ul>
	900 nm帯	900 nm帯の感度を向上させたタイプです。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●光波距離計</li> <li>●レーザーダ</li> </ul>
	1000 nm帯	1000 nm帯の感度を向上させたタイプです。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●YAGレーザー検出</li> </ul>

## || 浜松ホトニクスのMPPC

タイプ	特長	用途
一般計測用	一般的な微弱光の検出に適しています。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●蛍光測定</li> <li>●フローサイトメトリ</li> <li>●DNAチップシーケンサ</li> <li>●環境分析</li> <li>●PET</li> <li>●高エネルギー物理実験</li> </ul>
高速計測・広ダイナミックレンジ	ピクセル数が多いため、背景光があり飽和しやすい使用条件に適しています。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●PET</li> <li>●高エネルギー物理実験</li> </ul>
極微弱光計測用	冷却により、さらにダークカウントを低減した計測が可能です。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●蛍光測定</li> </ul>
精密計測用	クロストークを低減し、低カウントレートの計測時において誤カウントを抑えることができます。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●蛍光測定</li> </ul>
バタブルタイプ (セミカスタム)	受光面外周の不感部分を削減した構造を採用しています。4辺バタブル構造のため、素子を2次元に狭ギャップで配列できます。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●PET</li> <li>●高エネルギー物理実験</li> </ul>
大面積アレイ	3 × 3 mmのMPPCを1つのチップに複数個形成したモノリシックアレイです。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●PET</li> <li>●高エネルギー物理実験</li> </ul>

## 1. Si APD

APDは、所定の逆電圧を印加することにより光電流が増倍される高速・高感度のフォトダイオードです。

素子内部に信号の増倍機能をもつため、PINフォトダイオードに比べ高いS/Nを得られ、高精度な光波距離計やシンチレータを用いた微弱光検出など幅広い用途で利用されます。PINフォトダイオードに比べ微弱な光を検出できる反面、高い逆電圧が必要なことや増倍率が温度に依存するなど、注意が必要な点もあります。

ここでは、Si APDの性能が十分引き出せるように、Si APDの特長などを解説していきます。

### 1-1 特長

- 高感度: 内部増倍機能をもつ
- 高速応答
- 高信頼性
- 個別仕様でセレクト納入が可能

### 1-2 アバランシェ増倍の原理

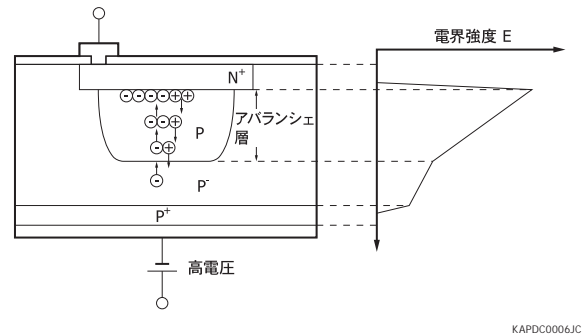
APDの光電流の発生機構は、通常のフォトダイオードと同じです。フォトダイオードに、バンドギャップ以上のエネルギーをもつ光が入射すると、その光エネルギーにより電子-正孔対が発生します。このとき入射光子数に対して発生した電子-正孔対の割合を量子効率QE(単位: %)と定義します。APDの内部でキャリアが発生する機構はフォトダイオードと変わりませんが、APDは発生したキャリアを増倍する機能をもっている点がフォトダイオードと異なります。

PN接合に逆電圧を印加すると、空乏層内部で発生した電子-正孔対のうち、電子はN<sup>+</sup>側に、正孔はP<sup>+</sup>側にそれぞれ電界によってドリフトします。このときのキャリアのドリフト速度は電界が高くなるほど速くなりますが、ある電界に達すると結晶格子との散乱頻度が増して、ある一定の速度に飽和するようになります。さらに電界が高くなると結晶格子との衝突を免れたキャリアは非常に大きなエネルギーをもつようになります。そして、このキャリアが結晶格子と衝突すると新たな電子-正孔対を発生させる現象が起こります。この現象をイオン化と呼びます。この電子-正孔対が新たに電子-正孔対を発生させるというように、イオン化は連鎖的に発生します。これがアバランシェ増倍といわれる現象です。

1つのキャリアが単位距離を走行するときに発生する電子-正孔対の数をイオン化率と呼び、電子のイオン化率( $\alpha$ )と正孔のイオン化率( $\beta$ )が定義されます。このイオン化率は、増倍機構を決定する重要なパラメータです。Siの場

合は、電子のイオン化率が正孔のイオン化率よりも大きく( $\alpha > \beta$ )、電子が増倍に寄与する割合が高くなります。このため当社のAPDでは、入射光により発生した電子-正孔対のうち、電子がアバランシェ層に入りやすい構造を採用しています。なお、入射光の波長によってキャリアが発生する深さは異なります。当社は、検出する波長に合わせて、異なる構造のAPDを用意しています。

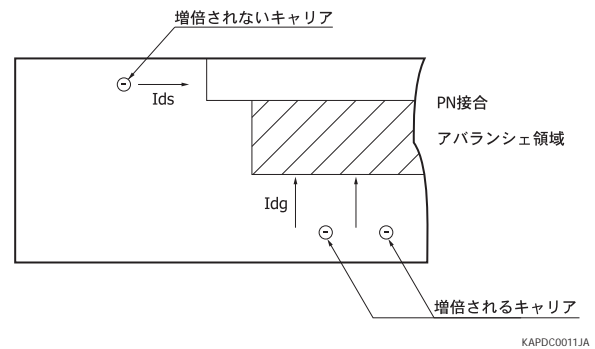
【図1-1】アバランシェ増倍の模式図(近赤外タイプ)



### 1-3 暗電流

APDの暗電流は、PN接合・酸化膜界面を流れる表面リーク電流( $I_{ds}$ )と基板内部の発生電流( $I_{dg}$ )に分かれます[図1-2]。

【図1-2】APDの暗電流



表面リーク電流はアバランシェ領域を通過しないため増倍されませんが、発生電流はアバランシェ領域を通過するため増倍されます。このため、トータルの暗電流( $I_D$ )は式(1)のようになります。

$$I_D = I_{ds} + M I_{dg} \quad \dots\dots\dots (1)$$

M: 増倍率

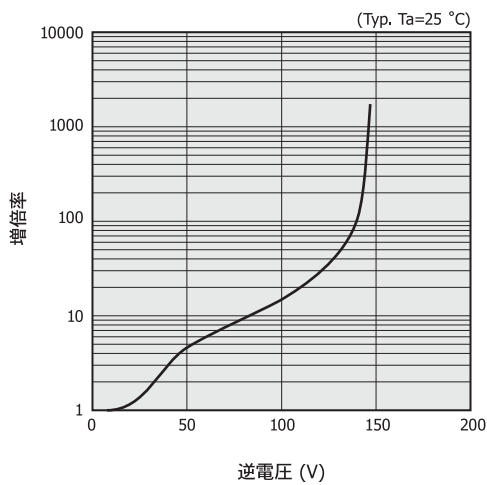
増倍される暗電流成分である $I_{dg}$ がノイズ特性に大きく影響します。

## 1-4 増倍率—逆電圧特性

APDの増倍率は、イオン化率によって決まります。イオン化率は、空乏層にかかる電界強度に強く依存します。通常の使用範囲では、APDの増倍率は逆電圧が高くなるほど大きくなります。逆電圧をさらに高くすると、APDと回路を含めた直列抵抗成分による電圧降下のためAPDのPN接合の逆電圧が低下し、増倍率が減少する現象が現れます。

PN接合に適切な逆電圧を印加すると、空乏層内の電界が上がりアバランシェ増倍が起こります。増倍率は、逆電圧の印加とともに増加しブレークダウンに至ります。図1-3に当社製Si APD S12023-05の増倍率と逆電圧の関係を示します。

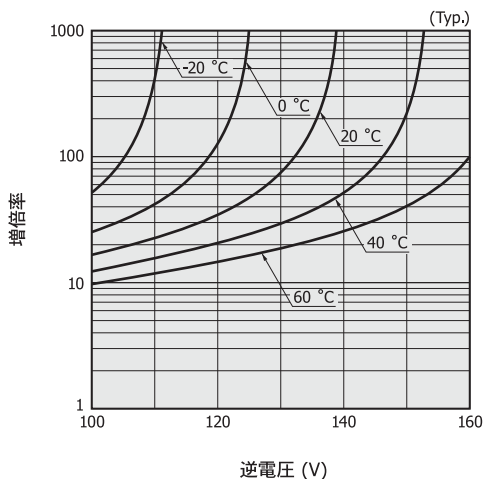
[図1-3] 増倍率—逆電圧 (S12023-05)



KAPD80088JA

APDの増倍率には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大きくなり、イオン化が起こりにくくなります。このため温度が上昇すると、特定の逆電圧における増倍率が小さくなります。一定の出力を得ようとする場合には、温度により逆電圧を変化させるか、素子の温度を一定に保つ必要があります。

[図1-4] 増倍率の温度特性 (S12023-05)



KAPD80089JA

APDを降伏電圧付近で使用すると、出力光電流が入射光量に比例しない現象が現れます。これは、光電流の増加に従い、素子内の直列抵抗と負荷抵抗を流れる電流により電圧降下が起こり、アバランシェ層にかかる電圧が減少するためです。

## 1-5 ノイズ特性

APDの増倍率は、逆電圧が一定であれば個々のキャリアの増倍率の平均値になります。個々のキャリアのイオン化率は均一ではなく、統計的な揺らぎをもちます。そのため、増倍過程において過剰雑音と呼ばれる増倍ノイズが加わります。APDのショットノイズ ( $I_n$ )は、PINフォトダイオードのショットノイズよりも大きくなり、式 (2)で表されます。

$$I_n^2 = 2q (I_L + I_{dg}) B M^2 F + 2q I_{ds} B \dots\dots\dots (2)$$

- q : 1電子当たりの電荷量
- $I_L$  :  $M=1$ のときの光電流
- $I_{dg}$  : 基板内部の発生電流 (増倍される暗電流成分)
- B : 帯域幅
- M : 増倍率
- F : 過剰雑音係数
- $I_{ds}$  : 表面リーク電流 (増倍されない暗電流成分)

電子のイオン化率 ( $\alpha$ )と正孔のイオン化率 ( $\beta$ )の比をイオン化率比 [ $k (= \beta/\alpha)$ ]と呼びます。過剰雑音係数 (F)はkを用いて、式 (3)で表されます。

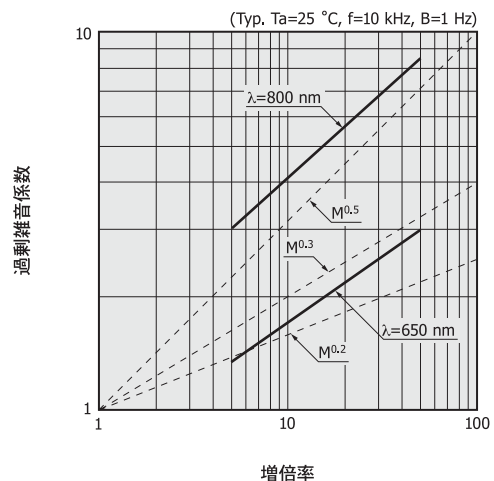
$$F = M k + (2 - \frac{1}{M}) (1 - k) \dots\dots\dots (3)$$

式 (3)は、電子がアバランシェ層に注入される場合の過剰雑音係数を表していますが、正孔がアバランシェ層に注入される場合にはkを $1/k$ で置き換えた形になります。

「1-6 分光感度特性」で示すように、増倍率には波長依存性があります。このため、過剰雑音も波長依存性を持ち、APDの種類により短波長で低ノイズのものや長波長で低ノイズのものがあります。図1-5に過剰雑音特性を示します。

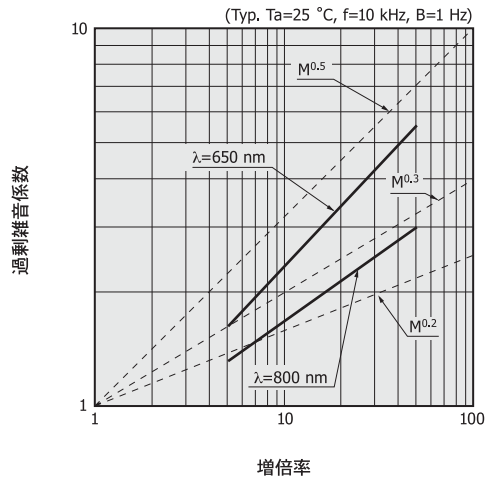
[図1-5] 過剰雑音係数—増倍率

(a) 短波長タイプ (低バイアス動作)



KAPD80013JA

(b) 近赤外タイプ (低バイアス動作)



KAPDB0022JA

过剩雑音係数 (F)は、近似的に $F=M^x$ と表す場合があります (x: 过剩雑音指数)。これは、ショットノイズの式を $In^2=2q I_L B M^{2+x}$ という形で表せるためです。

このようにAPDでは、増倍に伴うノイズが発生し、増倍率を大きくすると过剩雑音が増加します。一方、信号も増倍率に依存して大きくなり、S/Nが最大となる増倍率が存在します。APDのS/Nは、式 (4)で表されます。

$$S/N = \frac{I_L^2 M^2}{2q (I_L + Idg) B M^2 F + 2q B Ids + \frac{4k T B}{R_L}} \dots\dots (4)$$

- $2q (I_L + Idg) B M^2 F + 2q B Ids$ : ショットノイズ
- $\frac{4k T B}{R_L}$ : 熱雑音
- k : ボルツマン定数
- T : 絶対温度
- R<sub>L</sub> : 負荷抵抗

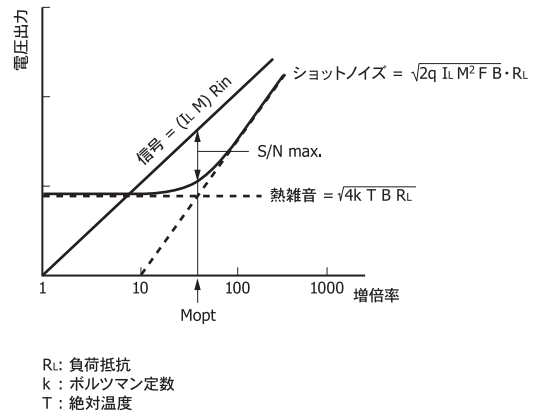
APDの雑音等価電力 (NEP: Noise Equivalent Power) は式 (5)で表されます。

$$NEP = In/(M S) \dots\dots (5)$$

- M: 増倍率
- S: 受光感度 [A/W]

PINフォトダイオードでは、熱雑音を下げのために負荷抵抗を大きくすると応答速度が遅くなります。このため熱雑音を小さくすることができず、最低受信レベルが熱雑音で支配される場合が多くなります。APDでは、ショットノイズが熱雑音と同じ程度になるまでは、トータルノイズを上げずに信号を増倍することができるため、高速応答を保ちながらS/Nを改善することができます。この様子を図1-6に示します。

[図1-6] APDのノイズ特性



- R<sub>L</sub>: 負荷抵抗
- k : ボルツマン定数
- T : 絶対温度

KAPDB0033JB

このときの最適な増倍率 (Mopt)は、式 (4)を最大にする条件より求められ、Idsを無視できるとすると式 (6)で表されます。

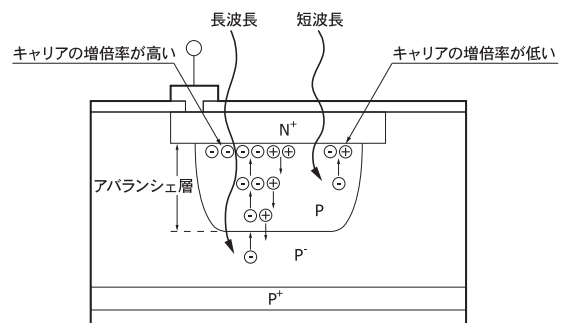
$$Mopt = \left[ \frac{4k T}{q (I_L + Idg) \times R_L} \right]^{\frac{1}{2+x}} \dots\dots (6)$$

1-6 分光感度特性

APDの分光感度特性は、逆電圧が印加されていない状態では、通常のフォトダイオードと変わりません。しかし逆電圧を印加すると、分光感度特性のグラフの形状が変化します。

光がSi中に到達する深さは波長により異なります。短い波長の光が到達する深さは浅く、キャリアの発生は表面に近い部分で起こります。これに対し長い波長の光では、深い位置でもキャリアの発生が起こります。アバランシェ増倍は、キャリアがPN接合近傍の高電界の部分を通る際に発生します。Siでは、電子のイオン化率が高いため、アバランシェ層に電子が注入されると効率のよい増倍を実現することができます。たとえば図1-7のタイプのAPDの場合、アバランシェ層は表面側のPN接合領域にあります。このタイプのAPDは、アバランシェ層よりも深くまで到達するような長波長の光が入射した場合に良好な増倍特性が実現できます。なお、APDの構造により、短波長・長波長のいずれが効率よく増倍されるかが異なります。

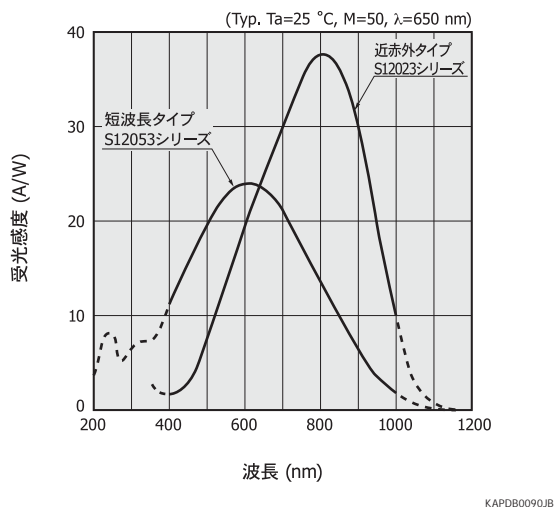
[図1-7] 断面構造 (近赤外タイプ)



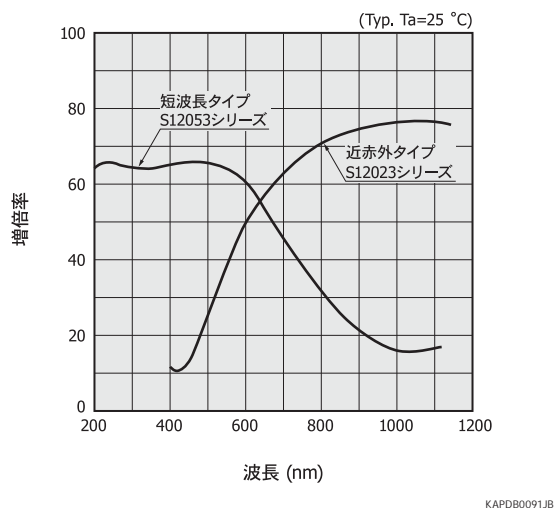
KAPDC0014JB

短波長タイプSi APDと近赤外タイプSi APDの分光感度特性、増倍率の波長依存性を以下に示します。

[図 1-8] 分光感度特性



[図 1-9] 増倍率-波長



## 1-7 応答特性

フォトダイオードの応答速度を決める要因には、CR時定数、空乏層内のキャリアの走行時間（ドリフト時間）、増倍にかかる時間（増倍時間）、空乏層外からのキャリアの拡散電流による時間遅れがあります。

CR時定数により決められる遮断周波数  $f_c(\text{CR})$  は、式 (7) で求められます。

$$f_c(\text{CR}) = \frac{1}{2\pi C_t R_L} \dots\dots\dots (7)$$

Ct: 端子間容量  
RL: 負荷抵抗

フォトダイオードを高速化するためには、端子間容量を小さくする必要があります。そのためには、受光面積を小さくし空乏層を広くすることが必要です。遮断周波数  $f_c(\text{CR})$  と上昇時間  $t_r$  との関係は、式 (8) で表されます。

$$t_r = \frac{0.35}{f_c(\text{CR})} \dots\dots\dots (8)$$

空乏層を広くした場合、ドリフト時間が無視できなくなってきます。空乏層を走行する速度（ドリフト速度）は、電界強度が  $10^4$  V/cm位から飽和し、そのときのドリフト速度は約  $10^7$  cm/sになります。アバランシェ層まで移動したキャリアによりイオン化が起こり電子-正孔対が発生しますが、正孔は電子とは逆の方向へ移動するため、APDの場合のドリフト時間はPINフォトダイオードよりも長くなります。ドリフト時間を  $t_{\text{rd}}$  とすると、ドリフト時間から決められる遮断周波数  $f_c(t_{\text{rd}})$  は式 (9) で表されます。

$$f_c(t_{\text{rd}}) = \frac{0.44}{t_{\text{rd}}} \dots\dots\dots (9)$$

容量を下げるために空乏層を広くすると、ドリフト時間が長くなるため、CR時定数から決められる遮断周波数  $f_c(\text{CR})$  と走行時間で決められる遮断周波数  $f_c(t_{\text{rd}})$  の両方を考慮する必要があります。

アバランシェ層を通過するキャリアは、結晶格子と衝突を繰り返しながら進みます。そのためアバランシェ層の単位距離を通過するのに要する時間は、アバランシェ層外の単位距離を通過する時間より長かかります。アバランシェ層を通過する時間は、増倍率が高いほど長かかります。数百倍の増倍率で使用する場合、増倍時間が問題になることがあります。

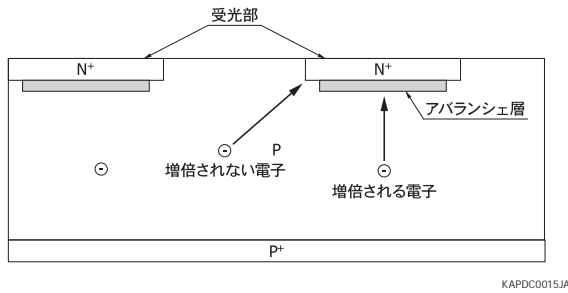
空乏層外からのキャリアの拡散電流による時間遅れは、数  $\mu\text{s}$  オーダーとなる場合があります。これは、入射光がSi中へ到達する深さに対して、空乏層が十分に広がっていない場合に顕著に現れます。高速応答を実現するためには、使用波長を考慮して、空乏層を十分広げられる逆電圧を印加する必要があります。

入射光量が多く光電流が大きい場合、空乏層内の電子と正孔の吸引力が電界を打ち消す方向に働くため、キャリアのドリフト速度が遅くなり、応答の低下をもたらす現象が起こります。これは空間電荷効果と呼ばれる現象で、特に入射光が遮断されるときに現れやすくなります。

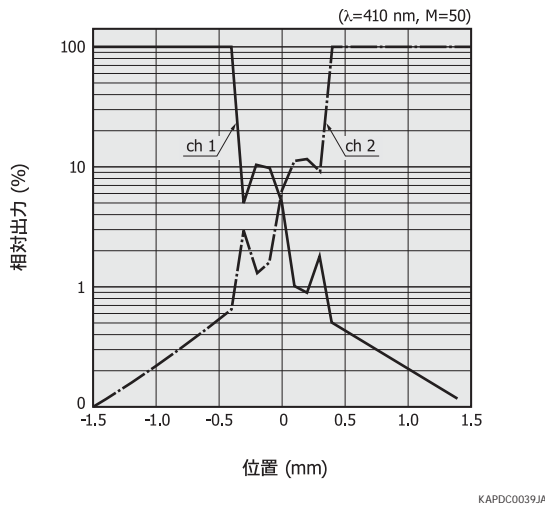
## 1-8 多素子タイプ

多素子タイプSi APDは、受光面をアレイ状に配置した素子です。APDは、受光面下にアバランシェ層をもつため、受光面内に入射した光に対しては良好な増倍作用をもちますが、受光面外で発生したキャリアはアバランシェ層を通過しないため信号が小さいという特徴があります。そのためAPDアレイは、フォトダイオードアレイに比べ、増倍率の分、クロストークが少なくなります。

[図1-10] 内部構造 (多素子タイプ)



[図1-11] クロストーク (S8550-02, 素子間ギャップ 0.7 μm, 代表例)



## 1-9 周辺回路との接続

APDは、高い逆電圧の印加を必要とする以外は、通常のPINフォトダイオードと同様に扱うことができます。しかし、高電圧を印加する必要があることや、周囲温度により増倍率が変化することなど、使用する際に注意が必要な点があります。

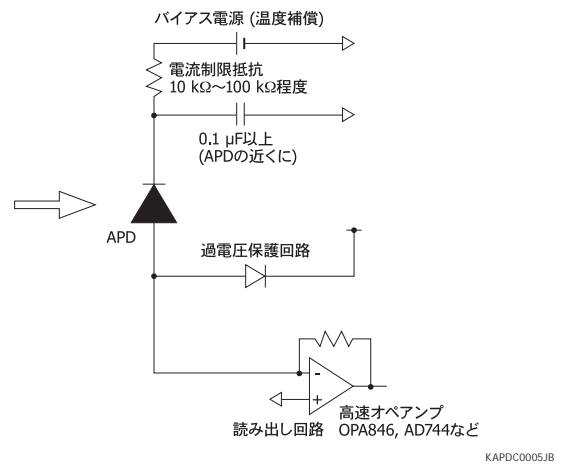
- ① APDの消費電力は、入射光量 × 感度 (M=1) × 増倍率 × 逆電圧となり、PINフォトダイオードに比べ消費電力が非常に大きくなります。そのため、APDとバイアス電源の間に保護抵抗を付加した上で、電流制限回路を組み込むといった対策が必要です。ただし、出力電流が大きい場合、保護抵抗における電圧降下が大きくなりAPDの逆電圧が低下します。この場合、保護抵抗の値を下げる必要があります。

[表1-1] 浜松ホトニクス製のAPDモジュール

タイプ	特徴
標準タイプ	近赤外タイプ・短波長タイプのAPDを内蔵、FC/SMAファイバアダプタも用意
高感度タイプ	低照度光検出用の高ゲインタイプ
高速タイプ	広帯域周波数 (~1 GHz) において使用可能
電子冷却型	微弱光検出用の高感度タイプ。電子冷却により安定度を大幅に向上

- ② 通常、低ノイズの読み出し回路は、過大電圧に対して初段部の損傷を招く恐れがあります。この対策として、過大電圧の入力を電源電圧に逃がす保護回路を接続してください。
- ③ APDの増倍率は温度により変化するため、広い温度範囲で使用するためには、温度変化に合わせて逆電圧を制御する温度補償方式を用いるか、APDの温度を一定に保つ温度制御方式を用いるなどの対策が必要です。温度補償方式は、APDの近くに温度センサを配置し、APDの温度係数に合うように逆電圧を変化させる方式です。温度制御方式は、電子冷却素子などを用いてAPDの温度を一定に制御する方式です。
- ④ 微弱な信号光を検出する場合、背景光がAPDに入射すると、そのショットノイズのためにS/Nが低くなる場合があります。このような場合は、光学フィルタを使用する、レーザの変調度を向上させる、視野角を制御するなど、背景光の影響を低減する必要があります。

[図1-12] 接続例



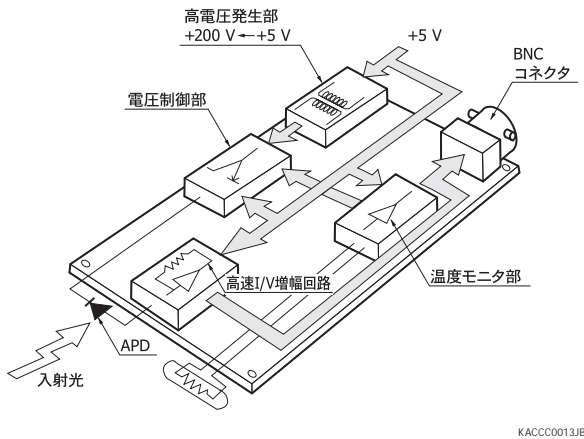
## APDモジュール

APDモジュールは、APDを用いた高速・高感度な光検出器です。APD・低ノイズI/V増幅回路・バイアス電源をコンパクトな外形にまとめており、低電圧直流電源を接続するだけで、PINフォトダイオードに比べて数十倍も高S/Nの光検出が可能になります。APDモジュールを用いることによって、APDを使用した高性能なシステムの評価および製作が容易になります。

APDモジュール C12702シリーズのブロック図を図1-13に示します。周辺回路は、「1-9 周辺回路との接続」で取り上げている注意点が考慮されているため、精度の高い測光が可能となります。

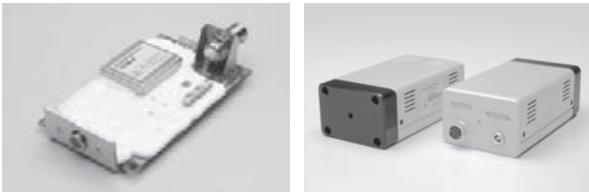
APDモジュールの詳細については、「11章 モジュール／3. APDモジュール」を参照してください。

[図1-13] ブロック図 (C12702シリーズ)



[図1-14] APDモジュール

(a) 標準タイプ C12702シリーズ (b) 電子冷却型 C4777-01



(c) 高速タイプ C5658



## 1-10 新たな取り組み

APDには高い逆電圧が必要、増倍率に温度依存性があるといった使いにくい面がありますが、少しでも使いやすいものにするために低逆電圧で動作するタイプなどの開発を行っています。その他、表面実装型のCSP (Chip Size Package)タイプ、外乱光の影響を抑制するためにチップ上に直接フィルタを形成したタイプを開発しています。

また、APDの増倍率には受光面内でバラツキがあるため、大面積アレイを実現するためには高い技術が必要とされます。当社は、受光面内で増倍率の高い均一性をもった大面積アレイを開発中です。

## 2. MPPC

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ち、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ちます。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。<sup>1) 2) 4)</sup>

### 2-1 動作原理

#### □ 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。

#### □ 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フォト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

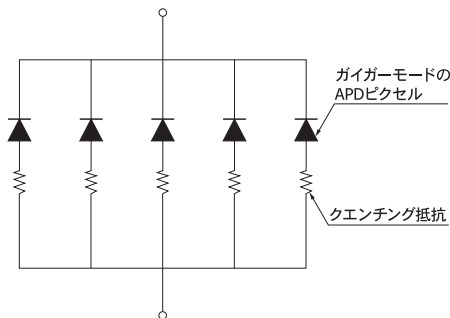


ガーモードで動作するAPDにクエンチング抵抗を直列に接続し、APDのアバランシェ増倍を短時間で停止する方法があります。この方法では、ガイガー放電による出力電流がクエンチング抵抗を流れる際に電圧降下を起こし、直列に接続されたAPDの動作電圧が下がります。ガイガー放電による出力電流は鋭い立ち上がりのパルス形状で、クエンチング抵抗によるガイガー放電停止時の出力電流の立ち下りは、比較的なだらかなパルス形状となります [図2-4]。

**構造**

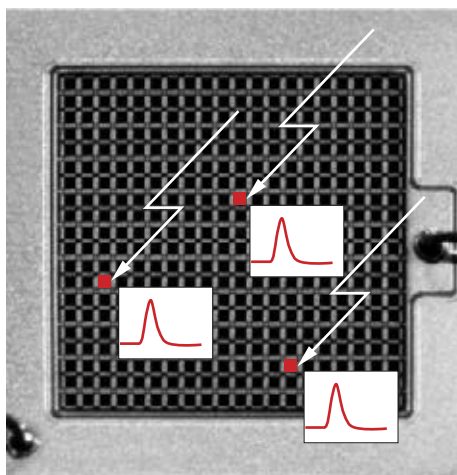
MPPCの構成を図2-1に示します。MPPCは、ガイガーモードAPDとクエンチング抵抗を組み合わせたものを基本単位 (1ピクセル) とし、多数のピクセルを二次元に電気的接続をした構造をもっています。

[図2-1] 構成



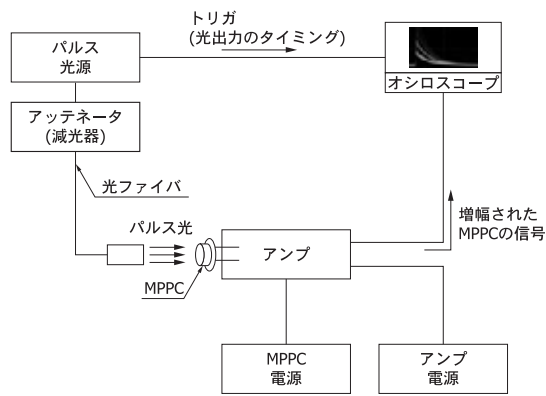
KAPDC0029JA

[図2-2] MPPCによるフォトンカウンティングのイメージ



KAPDC0049JA

[図2-3] MPPC評価用のブロック図 (オシロスコープを使用)



KAPDC0028JB

**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力します。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。

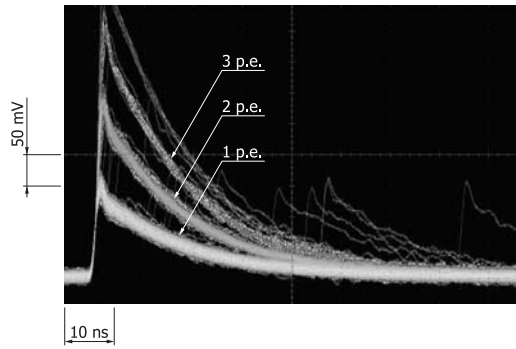
MPPCが検出したフォンの数を見積もるために、以下の2つの方法があります。

- ・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、検出したフォトン数に応じて出力パルスの高さが変わります。図2-4は、MPPCにフォトン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フォトン、2フォトン、3フォトン〜と検出したフォトン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、検出したフォンの数を見積もることができます。

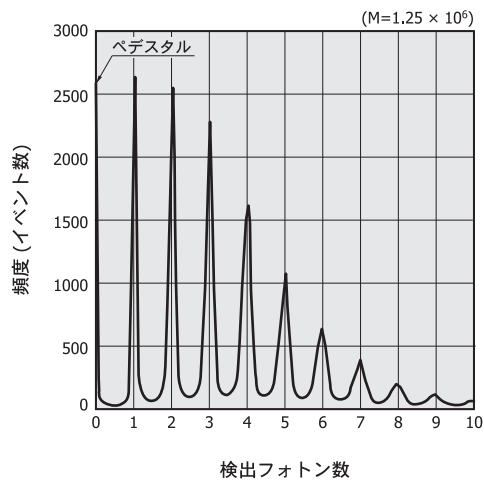
[図2-4] リニアアンプ (120倍)を用いたパルス波形 (S12571-050C,  $M=1.25 \times 10^6$ )



(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2-5のような分布が得られます。ピーク値は、左からベ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2-5] チャージアンプを用いたパルス波高スペクトル (S12571-050C,  $M=1.25 \times 10^6$ )



KAPDB0133JA

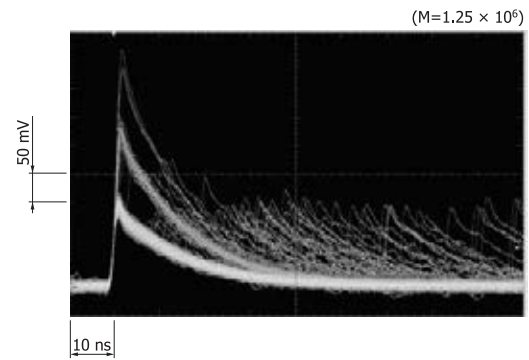
2-2 特長

低アフターパルス

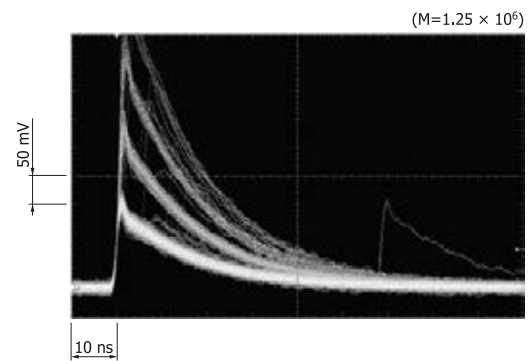
MPPCによる光子検出時に、出力パルスとは別に遅れて再び信号が出力されることがあります。これをアフターパルスと呼んでいます。最新のMPPCは、材料やウエハプロセス技術を改善することによって、従来品に比べてアフターパルスの大幅な低減を実現しました。アフターパルスの低減はS/N向上だけでなく、動作電圧範囲の拡大、高電圧領域での時間分解能特性や検出効率の向上など、さまざまなメリットをもたらします。

[図2-6] パルス波形

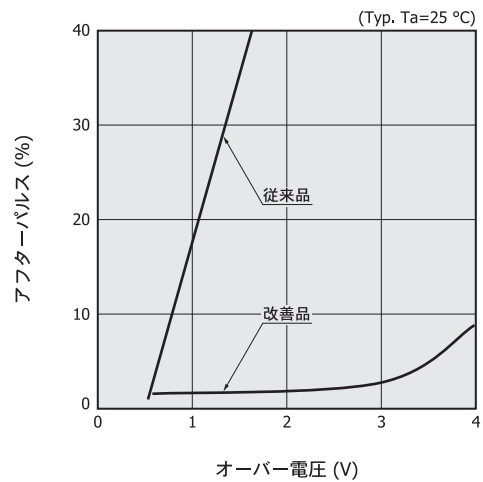
(a) S10362-11-050C (従来品)



(b) S12571-050C (改善品)



[図2-7] アフターパルス - オーバー電圧



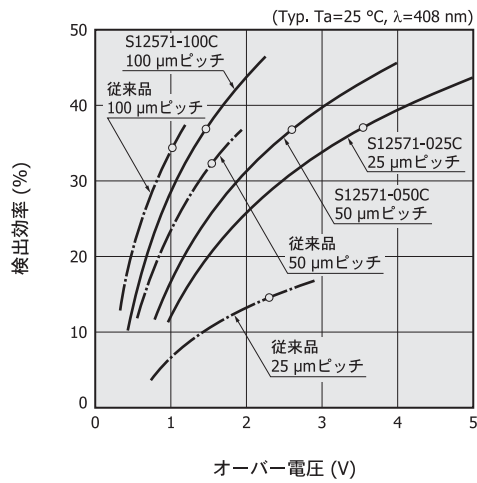
KAPDB0256JA

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もちます。25  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$ ・15  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$ ・100  $\mu\text{m}$ 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率は改善されます。

[図2-8] 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。

KAPDB0217JB

[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シリーズ
25	2.3	3.5
50	1.5	2.6
100	1.0	1.4

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

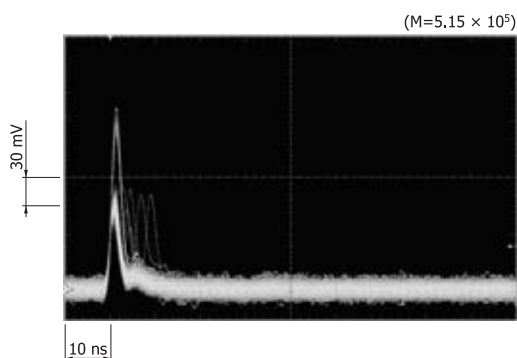
V<sub>ov</sub>: オーバー電圧  
V<sub>op</sub>: 動作電圧  
V<sub>BR</sub>: 降伏電圧

### □ 広いダイナミックレンジ

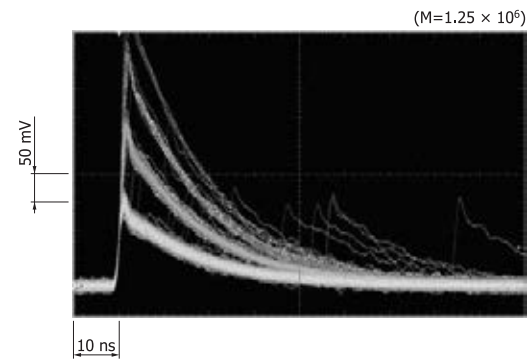
MPPC のダイナミックレンジは、ピクセル数とピクセルの回復時間によって決定されます。最小10 μmのピクセルピッチを実現することで、単位面積当たりのピクセル数を増すとともに、回復時間の短縮を実現して、ダイナミックレンジの飛躍的な拡大を実現しました。

[図2-9] パルス波形

(a) 高速計測・広ダイナミックレンジタイプ  
S12571-010C (ピクセルピッチ: 10 μm)



(b) 一般計測用 S12571-050C (ピクセルピッチ: 50 μm)

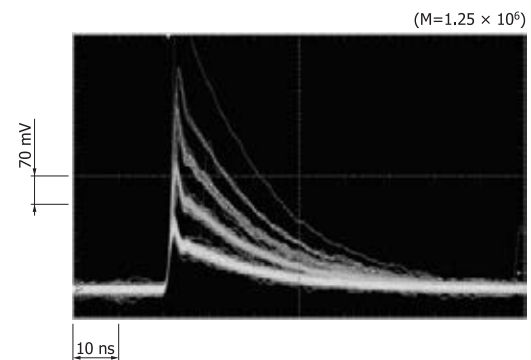


### □ 低クロストーク

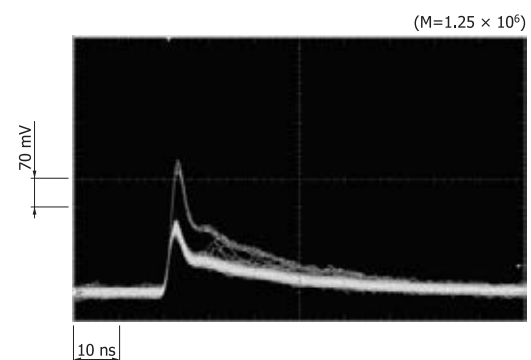
フォトンを検出したピクセルが他のピクセルに影響し、出力パルスとは別のパルスを同時に発生させることがあります。これをクロストークと呼んでいます。精密計測用のMPPCでは、ピクセル間に障壁を設けることで、クロストークの大幅な低減を実現しました。

[図2-10] パルス波形

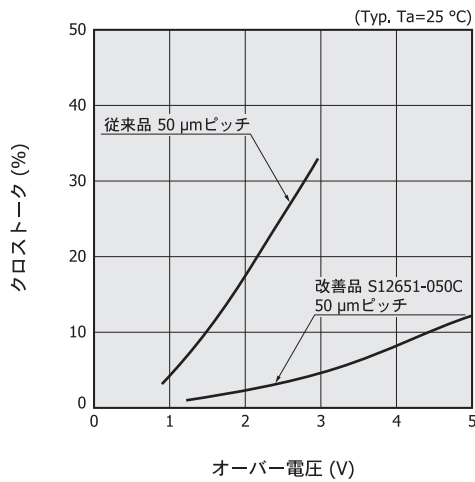
(a) 一般計測用 S12571-050C (ピクセルピッチ: 50 μm)



(b) 精密計測用 S12651-050C (ピクセルピッチ: 50 μm)



[図2-11] クロストーク - オーバー電圧



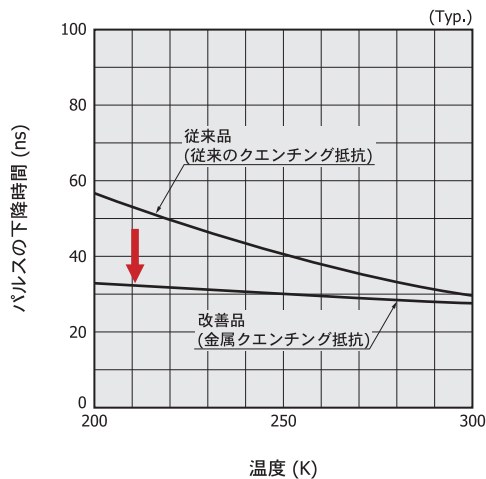
KAPDB0257JB

### 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2-12] 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)



KAPDB0258JA

## 2-3 特性

### 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。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用に適しており、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。

MPPCは、動作電圧によって特性が変化します。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2-2] 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	→ (increases with size)
検出効率	→ (increases with size)
ダイナミックレンジ	← (decreases with size)
高速応答性	← (decreases with size)

[表2-3] 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	→ (increases with size)
大面積の光検出	→ (increases with size)
高速応答性	← (decreases with size)
ダーク	← (decreases with size)

[表2-4] 動作電圧の異なるMPPCの特性

動作電圧	低 ← → 高
増倍率	→ (increases with voltage)
検出効率	→ (increases with voltage)
時間分解能	← (decreases with voltage)
ノイズ	← (decreases with voltage)

### 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:  $1.602 \times 10^{-19}$  C)で割った値で定義されます。

$$M = \frac{Q}{q} \dots\dots\dots (2)$$

M: 増倍率

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

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

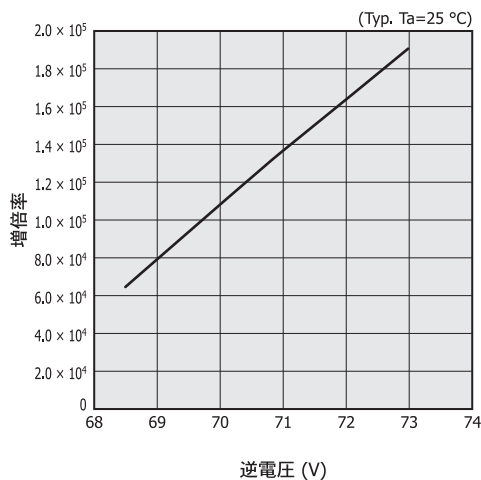
C: 1ピクセルの容量

式 (2)(3)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、逆電圧を上げると、ほぼ直線的に上昇します。図2-13に代表例を示します。

**[図2-13] 増倍率—逆電圧**  
(受光面サイズ:  $\square 1 \text{ mm}$ , ピクセルピッチ:  $10 \mu\text{m}$ )



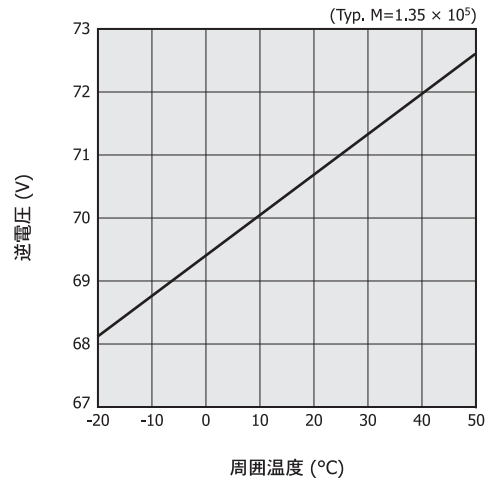
KAPDB0226JA

### (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る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れにくくなります。イオン化が起これ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2-14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。

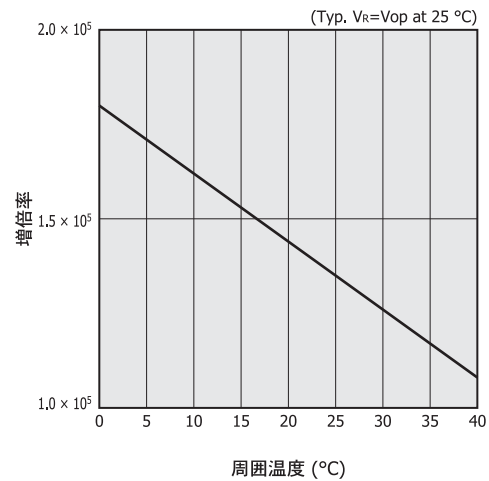
**[図2-14] 逆電圧—周囲温度**  
(受光面サイズ:  $\square 1 \text{ mm}$ , ピクセルピッチ:  $10 \mu\text{m}$ )



KAPDB0227JA

図2-15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2-15] 増倍率—周囲温度**  
(受光面サイズ:  $\square 1 \text{ mm}$ , ピクセルピッチ:  $10 \mu\text{m}$ )



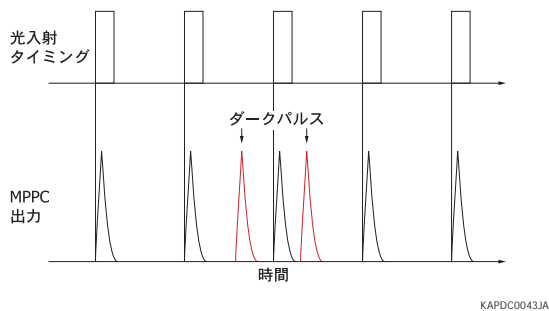
KAPDB0228JA

## □ ダークカウント

### (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。このパルス进行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つかません [図2-16]。

**[図2-16] 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**

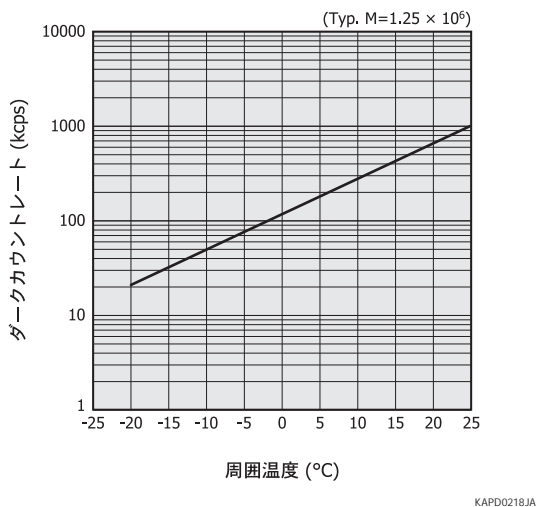
熱的に発生するキャリアによってダークパルスが発生するため、ダークカウントレートは周囲温度によって変化します。ダークカウントレートは、動作温度範囲において式 (4) のように表されます。

$$N_{0.5 \text{ p.e.}}(T) \approx AT^{\frac{3}{2}} \exp\left[\frac{E_g}{2kT}\right] \dots\dots\dots (4)$$

- 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2-17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2-17] ダークカウントレート-周囲温度**  
(受光面サイズ:  $\square 3 \text{ mm}$ , ピクセルピッチ:  $50 \mu\text{m}$ )

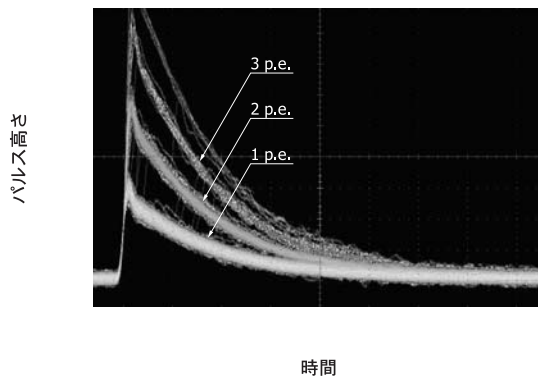


**□ クロストーク**

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次光子が

発生し、この光子を他のピクセルが検出することにより発生します。この現象を光学的クロストークと呼びます。

**[図2-18] クロストークの観測例**

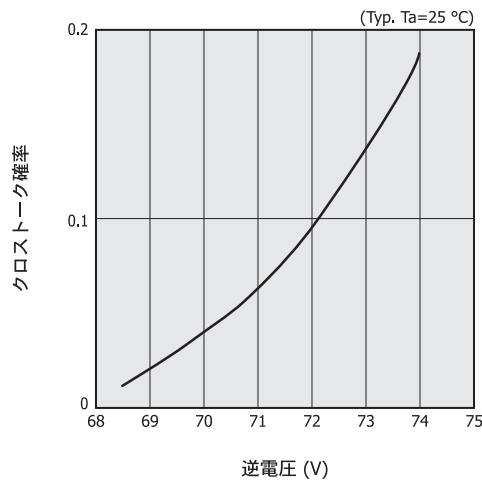


当社は、クロストーク確率 (Pcrosstalk)を式 (5)のように定義しています。

$$P_{\text{crosstalk}} = \frac{N_{1.5 \text{ p.e.}}}{N_{0.5 \text{ p.e.}}} \dots\dots\dots (5)$$

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、逆電圧が高いほど、クロストークの発生頻度は高くなります [図2-19]。

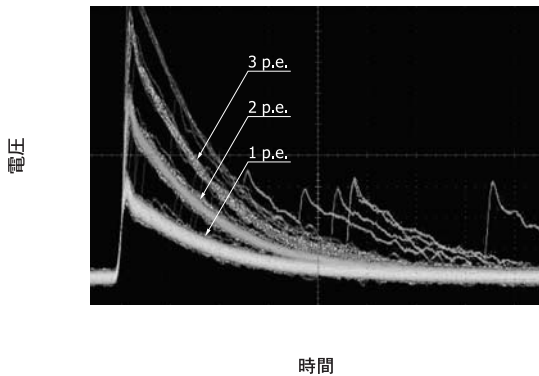
**[図2-19] クロストーク確率-逆電圧**  
(受光面サイズ:  $\square 1 \text{ mm}$ , ピクセルピッチ:  $50 \mu\text{m}$ )



**□ 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、結晶欠陥など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2-20] アフターパルスの観測例



### □ 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 (6)のように表されます。

$$I_D = I_s + I_j + I_b \quad \dots\dots (6)$$

$I_s$ : 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  $N_{\text{fired}}$  とすると式 (7)で表されます。

$$I_b = q M N_{\text{fired}} \quad \dots\dots (7)$$

$q$ : 1素子当たりの電荷量  
 $M$ : 増倍率

MPPCの増倍率は $10^5 \sim 10^6$ 倍のため、式 (6)では $I_b$ が支配的となり、式 (6)は式 (8)のように近似することができます。

$$I_D \approx I_b = q M N_{\text{fired}} \quad \dots\dots (8)$$

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 (9)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。

$$I_D \approx q M N_{0.5 \text{ p.e.}} \frac{1}{1 - P_{\text{crosstalk}}} \quad \dots\dots (9)$$

### □ 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に入射してフォトンカウンティングを行ったときに、入

射フォトン数に対して検出できるフォトン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、受光面に入射したフォトン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 (10)で表されます。

$$S = \frac{I_{\text{MPPC}}}{\text{入射光量}} \quad \dots\dots (10)$$

$I_{\text{MPPC}}$ : 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、入射したフォトンのうち何%を検出できるかを示す特性であり、式 (11)で表されます。

$$\text{PDE} = \frac{\text{検出フォトン数}}{\text{入射フォトン数}} \quad \dots\dots (11)$$

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。

$$\text{PDE} = F_g \times \text{QE} \times P_a \quad \dots\dots (12)$$

$F_g$ : 開口率  
 $\text{QE}$ : 量子効率  
 $P_a$ : アバランシェ確率

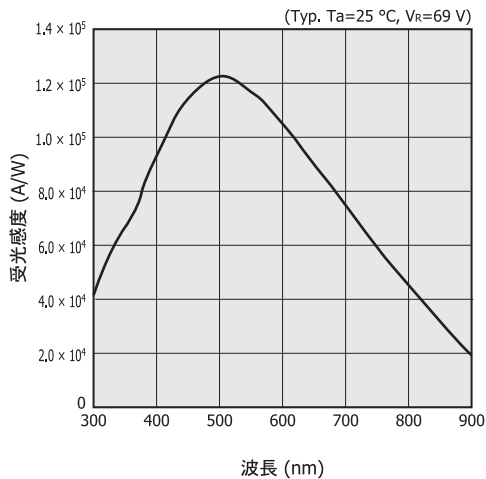
受光感度から求める検出効率 ( $\text{PDE}_{\text{current}}$ )は式 (13)で表されます。

$$\text{PDE}_{\text{current}} = \frac{1240}{\lambda} \times \frac{S}{M} \quad \dots\dots (13)$$

$\lambda$ : 入射光の波長 [nm]

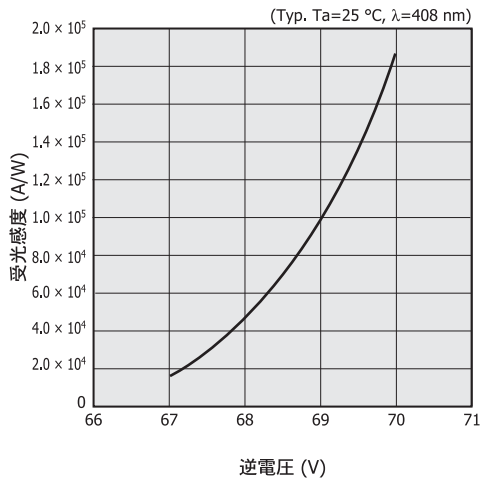
$\text{PDE}_{\text{current}}$ にはクロストークやアフターパルスが含まれているため、PDEよりも高くなります。

[図2-21] 受光感度-波長 (ピクセルピッチ: 25  $\mu\text{m}$ )



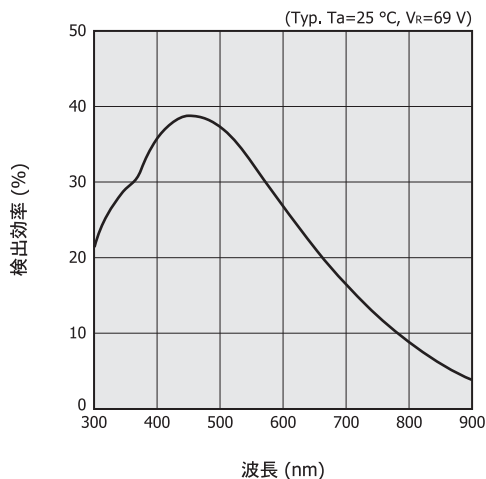
KAPDB0230JA

[図2-22] 受光感度-逆電圧 (ピクセルピッチ: 25  $\mu\text{m}$ )



KAPDB0231JA

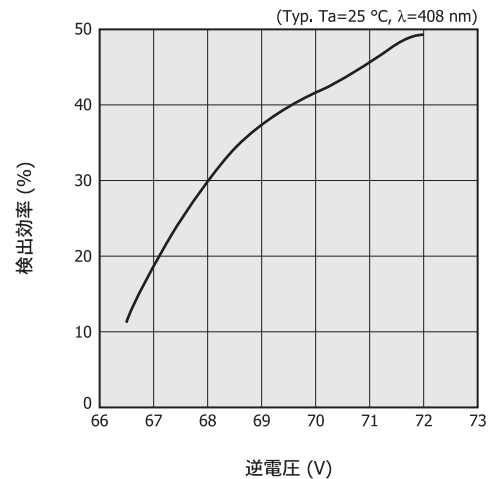
[図2-23] 検出効率-波長 (ピクセルピッチ: 25  $\mu\text{m}$ )



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。

KAPDB0259JA

[図2-24] 検出効率-逆電圧 (ピクセルピッチ: 25  $\mu\text{m}$ )



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。

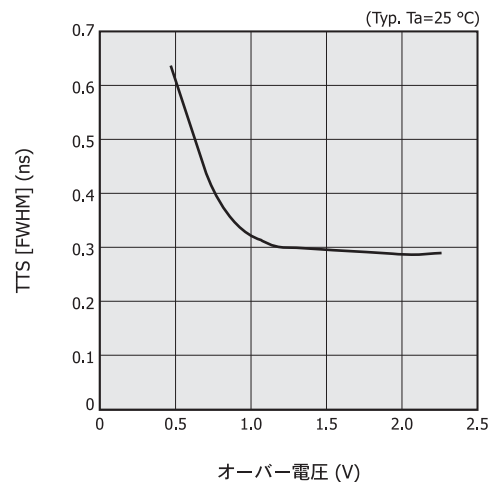
KAPDB0233JA

### □ 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2-25] TTS-オーバー電圧

(受光面サイズ:  $\square 1 \text{ mm}$ , ピクセルピッチ: 50  $\mu\text{m}$ )



KAPDB0232JA

## 2-4 使い方

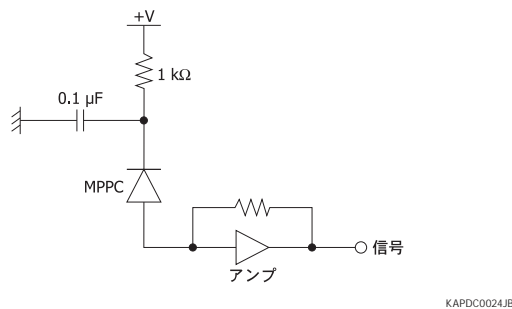
MPPCの特性は、動作電圧や周囲温度によって大きく変わります。一般に動作電圧を上げることによって素子内部の電界強度が上がり、増倍率、検出効率、時間分解能が向上しますが、一方でダークカウント、アフターパルス、クロストークなどS/Nを低下させる成分が増加します。優先すべき特性に合わせて、動作電圧を設定する必要があります。

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2-26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 kΩ抵抗・0.1 μF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 kΩ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2-26] 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。

## 2-5 測定例

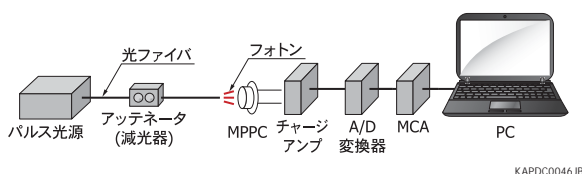
MPPCの特性の測定例について、以下に示します。

### □ 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2-27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2-27] 増倍率測定用の接続例 (チャージアンプを使用)



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2-28のような出力結果が得られます。

[図2-28] 出力電荷量の度数分布例

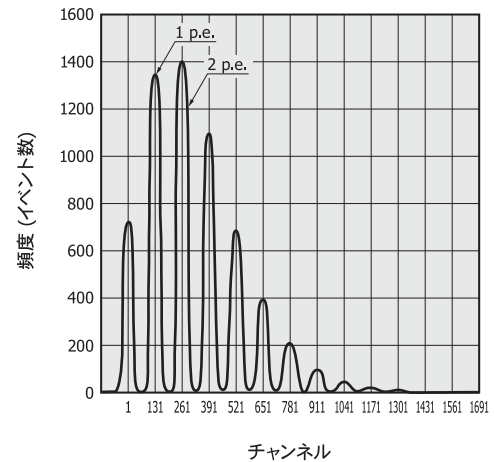


図2-28において、曲線のピークは左からペDESTAL、1光子、2光子～を示します。ペDESTALは、出力の基準となります。この例は、MPPCが1光子、2光子を中心として検出していることを表しています。隣り合うピークの間隔は、1光子検出分の電荷量に相当します。増倍率(M)は式(14)で表されます。

$$M = \frac{\text{隣り合うピーク間の電荷量差}}{q} \dots\dots (14)$$

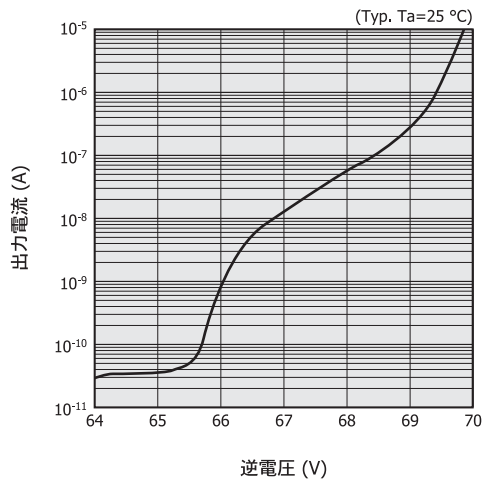
q: 1電子当たりの電荷量

また、式(14)を用いて図2-13のような増倍率-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2-29に示します。出力電流を逆電圧で微分した関数[式(15)]に極大値を与える電圧を $V_{peak}$ とすると、 $V_{peak} - V_{BR}$ は型名ごとにほぼ一定ですが、 $V_{peak}$ と $V_{BR}$ 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 $V_{peak} - V_{BR}$ を求めておくと、特定の素子について $V_{peak}$ を測定することによって $V_{BR}$ を推定することができます。

**[図2-29] 出力電流-逆電圧**  
(受光面サイズ: □1 mm, ピクセルピッチ: 50 μm)

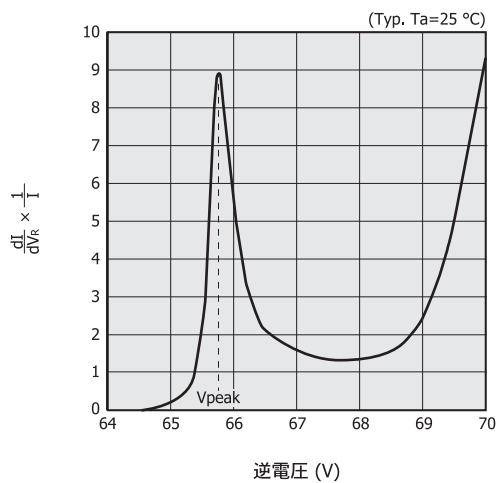


KAPDB0235JA

$$\frac{d}{dV_R} \log(I) = \frac{dI}{dV_R} \times \frac{1}{I} \dots\dots (15)$$

I : 出力電流 [A]  
V<sub>R</sub> : 逆電圧 [V]

**[図2-30]  $\frac{dI}{dV_R} \times \frac{1}{I}$  の逆電圧特性**



KAPDB0236JA

増倍率 (M)は、式 (16)で表すことができます。

$$M = \frac{C \times (V_R - V_{BR})}{q} \dots\dots (16)$$

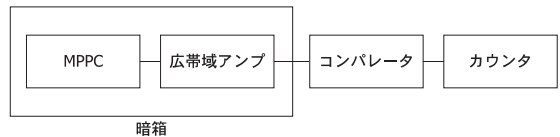
C : ピクセル容量 [F]  
V<sub>BR</sub> : 降伏電圧 [V]  
q : 1電子当たりの電荷量 [C]

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。

### □ ダーク

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2-31] ダーク測定用のブロック図**



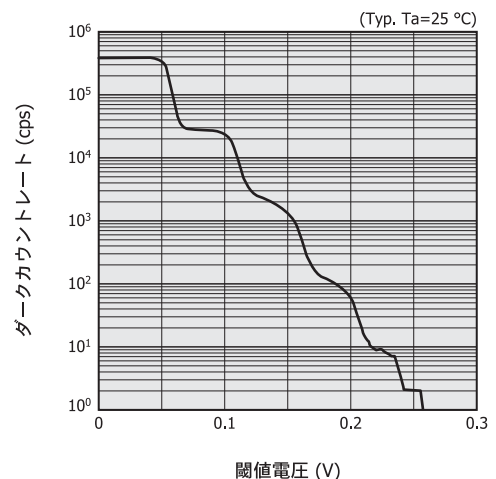
KAPDC0044JA

### □ 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<sub>0.5 p.e.</sub>、N<sub>1.5 p.e.</sub>を求めることができます。クロストーク確率 P<sub>crossstalk</sub>は、式 (5)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2-32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光子、2光子～のパルス高さに対応します。このグラフからN<sub>0.5 p.e.</sub>、N<sub>1.5 p.e.</sub>、N<sub>2.5 p.e.</sub>～を求められます。

**[図2-32] ダークカウントレート-閾値電圧**



KAPDB0237JA

### □ 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<sub>dark</sub> (単位: s)は式 (17)で表されます。

$$\Delta t_{\text{dark}} \propto \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{dark}}}\right) \dots\dots (17)$$

$\tau_{\text{dark}}$ : 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  $\Delta t_{\text{AP}}$  (単位: s)は式 (18)で表されます。

$$\Delta t_{\text{AP}} \propto \sum_k A_k \times \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_k}\right) \dots\dots (18)$$

k :  $\Delta t_{\text{AP}}$ を構成する特定数の数

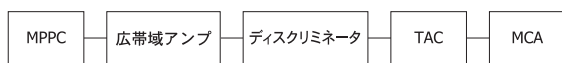
$A_k$ : 定数

$\tau_k$ : アフターパルス発生の特定数 [s]

$\tau_{\text{dark}}$ と $\tau_k$ 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  $\Delta t$ 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 $\Delta t$ のヒストグラムとなります。

[図2-33] アフターパルスの測定装置例



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

KAPDC0045JB

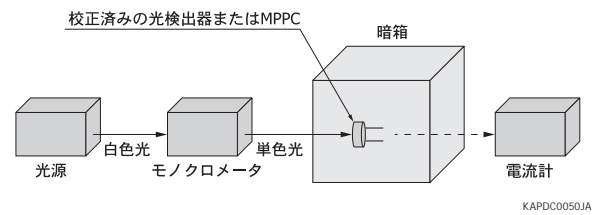
## □ 受光感度

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 (19)より求めます。

$$S = \frac{I_{\text{MPPC}}}{\text{入射光量}} \dots\dots (19)$$

$I_{\text{MPPC}}$ : 光電流 [A]

[図2-34] 受光感度の測定装置例

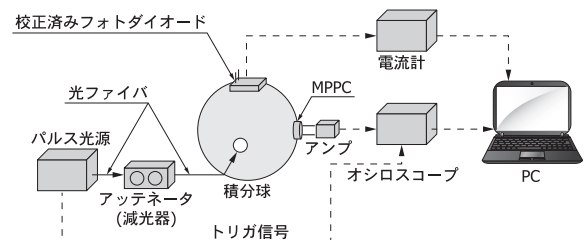


KAPDC0050JA

## □ 検出効率

検出効率を測定するには、図2-35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。<sup>3)</sup>

[図2-35] 検出効率の測定装置例



KAPDC0051JA

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2-28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。ベ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 (20)で定義されます。

$$P(n, x) = \frac{n^x e^{-n}}{x!} \dots\dots (20)$$

n: MPPCの検出光子数 (平均)

x: MPPCの検出光子数

式 (20)で $x=0$ の場合、ポアソン分布は式 (21)で表されます。

$$P(n, 0) = e^{-n} \dots\dots (21)$$

式 (21)の左辺は、ダークパルス分の補正も含めると式 (22)で表されます。

$$P(n, 0) = \frac{\left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}}\right)}{\left(\frac{N_{ped}^{dark}}{N_{tot}^{dark}}\right)} \dots\dots (22)$$

$N_{ped}$  : 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

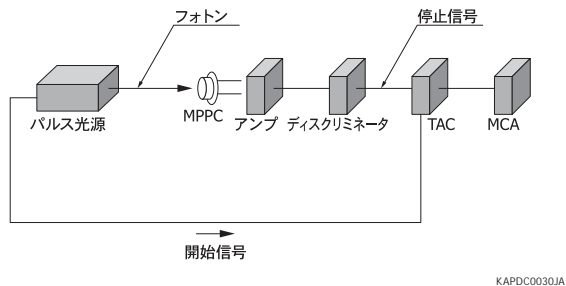
MPPCの検出光子数 (平均)  $n$ は式 (23)で表されます。 $n$ を入射光子数で割ることによって、検出効率を求めることができます。

$$n = -\ln\left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}}\right) = -\ln\left(\frac{N_{ped}}{N_{tot}}\right) + \ln\left(\frac{N_{ped}^{dark}}{N_{tot}^{dark}}\right) \dots\dots (23)$$

**時間分解能**

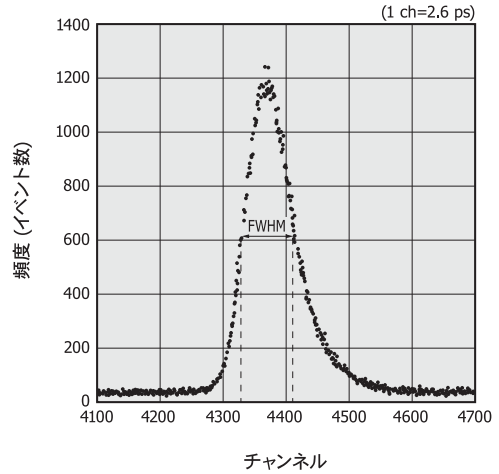
図2-36はTTS法による時間分解能の測定装置例です。パルス光源は光子を出すと同時にTACへ開始信号を送ります。開始信号を受け取ったTACは、時間測定を開始します。一方、MPPCへの光子入射により得られる出力信号はアンプで増倍されディスクリミネータへ送られます。ディスクリミネータは光子検出の閾値に達したレベルの信号を受け取るとTACへ信号を送ります。TACはディスクリミネータからの信号を時間計測の停止信号として受け取ります。ここでTACは光子が入射してから出力するまでの時間に比例したパルスを出力します。MCAはTACから受け取ったパルスをその高さに応じて分類し、チャンネルに分けていきます。MCA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2-36] 時間分解能の測定装置例



KAPDC0030JA

[図2-37] TTS (代表例)



KAPDB0137JA

**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

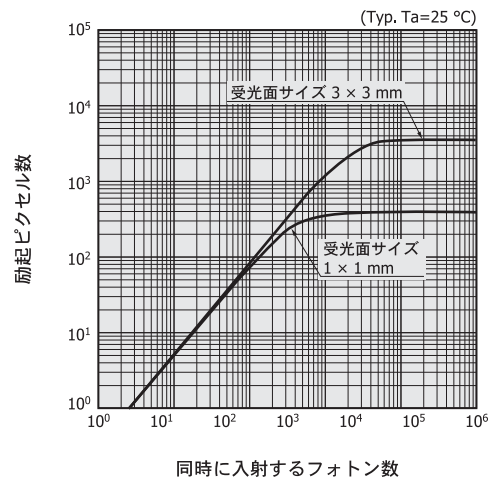
同時に入射した光子についてのダイナミックレンジは、MPPCのピクセル数と検出効率によって決まります。入射光子数が多くなると、1ピクセルに2個以上の光子が入り始めます。1ピクセルに2個以上の光子が入射しても、光子入射のオン・オフ判定しかできません。そのため、入射光子数が多くなると直線性が悪化します。

$$N_{fired} = N_{total} \times \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-N_{photon} \times PDE}{N_{total}}\right) \right\} \dots\dots (24)$$

$N_{fired}$  : 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2-38] 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: 50  $\mu$ m)



KAPDB0238JA

## (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(25)で表されます。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{photon}} \times \text{PDE} \quad \dots\dots (25)$$

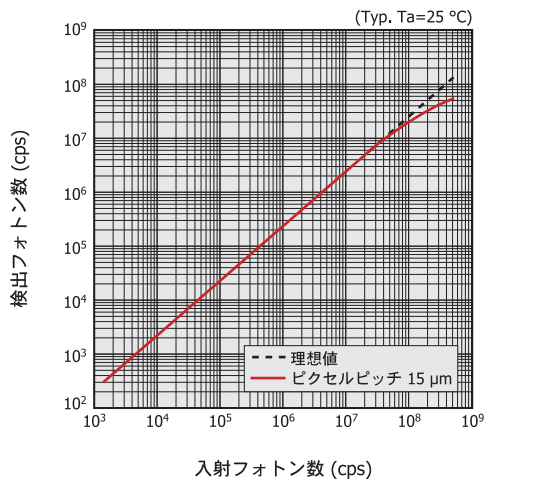
入射光子数が多くなると、複数の出力パルスが重なるためカウント数に誤差が生じ、直線性が悪化します。直線性は、パルスペア分解能と呼ばれるパラメータで決定されます。パルスペア分解能は、MPPCの回復時間(「2-5 測定例/回復時間」参照)と読み出し回路の特性によって決まります。パルスペア分解能を考慮したMPPCの励起ピクセル数は、式(26)で表されます。

$$N_{\text{fired}} = \frac{N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{1 + N_{\text{photon}} \times \text{PDE} \times T_{\text{resolution}}} \quad \dots\dots (26)$$

Tresolution: 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2-39] フォトンカウンティングのダイナミックレンジ  
(ピクセルピッチ: 15 μm)



## (3) 電流測定時のダイナミックレンジ

MPPCの光電流 (IMPPC)は、式(27)で表されます。

$$I_{\text{MPPC}} = N_{\text{photon}} \times \text{PDE}_{\text{current}} \times M \times q \quad \dots\dots (27)$$

PDEcurrent: 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(28)で表されます。

$$N_{\text{photon}} = \frac{\text{入射光量} \times \lambda}{h \times c} \quad \dots\dots (28)$$

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

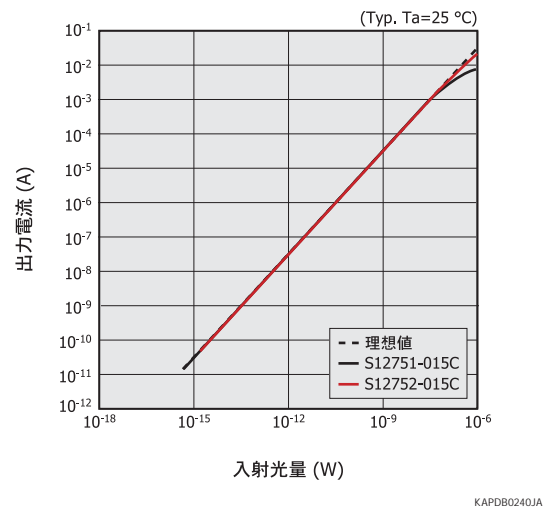
射することが増えてきます。これが直線性の低下を招きます。これらを考慮したMPPCの出力電流 IMPPCは式(29)で表されます。

$$I_{\text{MPPC}} = \frac{N_{\text{photon}} \times \text{PDE}_{\text{current}}}{1 + \frac{N_{\text{photon}} \times \text{PDE}_{\text{current}} \times T_{\text{R}}}{N_{\text{total}}}} \times M \times q \quad \dots\dots (29)$$

TR: 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。

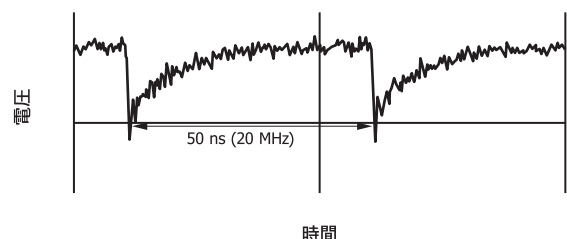
[図2-40] 出力電流-入射光量 (ピクセルピッチ: 15 μm)



## □ 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。受光面サイズ □1 mmの場合、ピクセルピッチ 25 μmの回復時間は約20 ns、50 μmは約50 ns、100 μmは約100~200 nsです。図2-41に受光面サイズ □1 mm・ピクセルピッチ 50 μm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2-41] パルスレベルの回復  
(受光面サイズ: □1 mm, ピクセルピッチ: 50 μm)

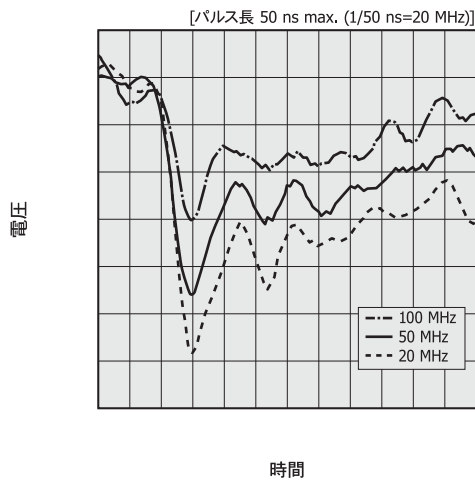


KAPD0158JA

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2-41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2-42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。

**[図2-42] 異なる周波数のパルス光を入射したときの出力パルス (受光面サイズ: □1 mm, ピクセルピッチ: 50 μm, 代表例)**



KAPD0163JA

## 2-6 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2-43 (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。

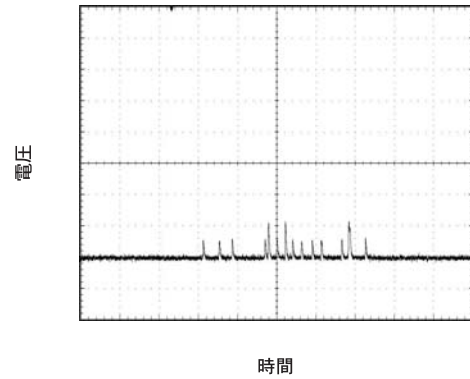
入射光量が多くなると、出力波形はパルスが重なり合った形状になります [(b)(c)]。この状態ではパルス数をカウ

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。

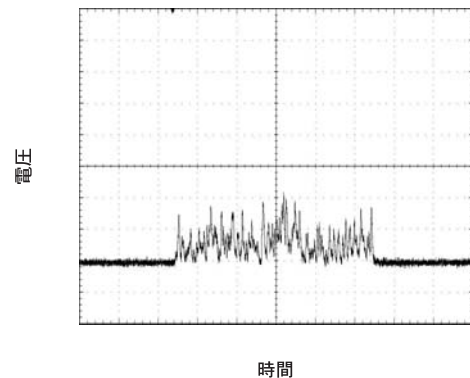
図2-44は、デジタル方式・アナログ方式のそれぞれに適した入射光量範囲 (受光面サイズ: □3 mm, ピクセルピッチ: 50 μmの場合)を示します。

**[図2-43] 出力波形**

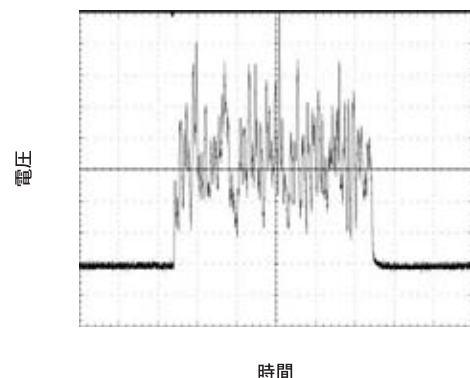
(a) 光量…小の場合 (極微弱光)



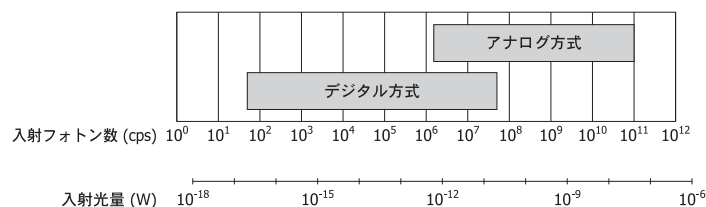
(b) 光量…中の場合



(c) 光量…大の場合



**[図2-44] デジタル方式・アナログ方式に適した入射光量範囲 (受光面サイズ: □3 mm, ピクセルピッチ: 50 μm)**

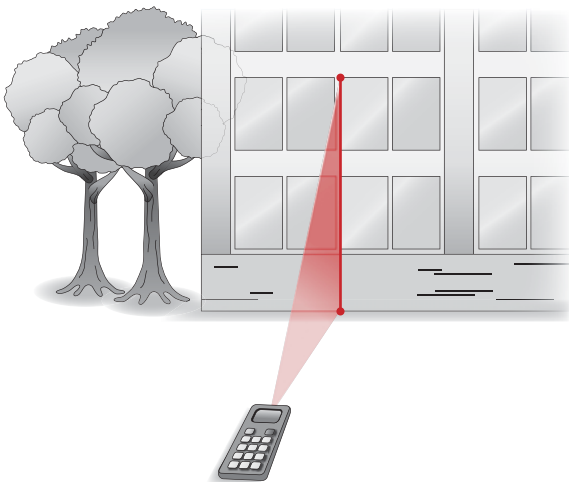


KAPDC0688JA

### 3. 応用例

#### 3-1 光波距離計

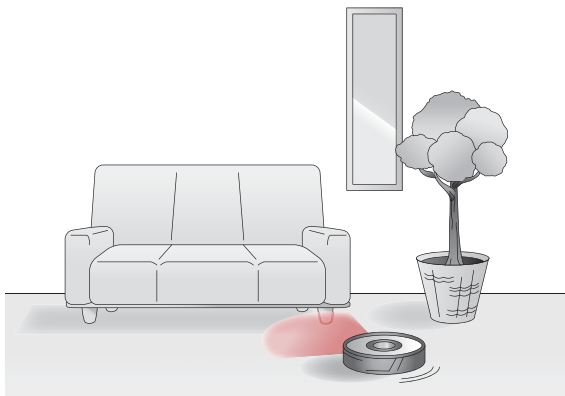
レーザ光を対象物に照射して、反射してくるまでの時間、または光の位相差をAPDが検出することで対象物との距離を計測できます。



KACCC0746JA

#### 3-2 障害物検知

APDは無人ロボットなどにおける障害物検知に利用することができます。また、特定エリアにおける人の動きの検知も行うことができます。



KACCC0747JA

#### 3-3 LIDAR (Light Detection and Ranging)

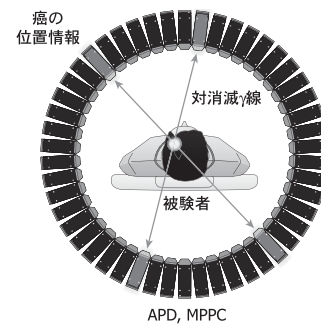
レーザを照射して物体からの反射光や散乱光をAPDが検出することにより、地表の状態、大気中の粒子、雲の測定が可能です。



KACCC0748JA

#### 3-4 シンチレーション計測

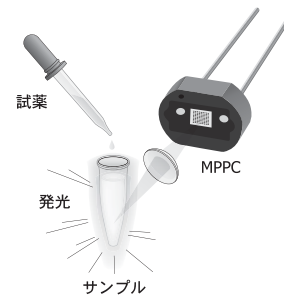
360°に配置されたAPDまたはMPPCが対消滅 $\gamma$ 線を検出し、癌などのターゲットの位置をとらえます。APDとMPPCは磁場の影響を受けないため、MRIと組み合わせて使用することも可能です。



KACCC0745JA

#### 3-5 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。



KACCC0749JB

## 3-6 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の採用が検討されています。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) 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>
- 4) 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)