2. MPPC

MPPC （硅光电倍增管）是 它是一种用多个工作在盖格模式下的APD进行光子计数的新型器件。尽管MPPC本质上是光半导体 器件，但是它光子计数能力出色，可用于多种光子计数量级的极弱光探测领域。

MPPC 低电压工作，具有高增益、高光子探测效率、快速响应、出色的时间分辨率和宽光谱响应范围的特点，是光子计数的高性能器件。同时，MPPC 抗磁场干扰、抗机械振动、不会被入射光饱和“烧坏”，这些与固体器件所独有的优势。因此，MPPC 有替代传统光子计数探测器的趋势。MPPC 是一种高性能、易于操作的器件，它在医疗诊断、学术研究和光学测量领域[1) 3)]具有广泛应用。

2-1 工作原理

光子计数

Light has a property in both a particle and a wave. When the light level becomes extremely low, light behaves as discrete particles (photons) allowing us to count the number of photons. Photon counting is a technique for measuring the number of individual photons.
The MPPC is suitable for phot on counting since it offers an excellent time resolution and a multiplication function having a high gain and low noise. Compared to ordinary light measurement techniques that measure the output current as analog signals, photon counting delivers a higher S/N and higher stability even in measurements at very low light levels.

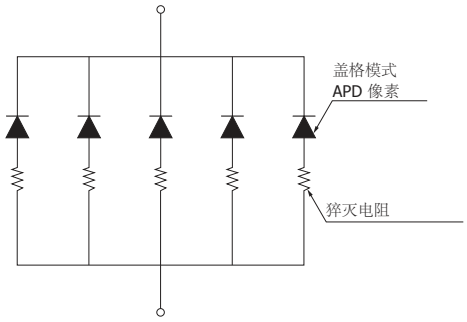
盖格模式和降压电阻

盖格模式是在反向电压高于击穿电压下操作 APD 的一种方法。在盖格模式下的 APD 内部产生高电场，即使输入光极弱，也会发生放电（盖格放电）。APD 在该电压下操作的条件称为盖格模式。即使检测单个光子时，盖格模式下也允许通过放电获得较大的输出。 一旦开始盖格放电，只要APD中的电场保持，就会进行持续放电。为停止盖格放电并检测下一个光子，需降低 APD的工作电压。停止盖格放电的一个方法是APD 串联猝灭电阻，则可以快速停止 APD 中的雪崩倍增。在该方法中，当由盖格放电引起的输出电流流经猝灭电阻时产生电压降，从而降低了串联的 APD 的工作电压。由盖格放电产生的输出电流是具有短上升时间的脉冲波形，而当猝灭电阻使得盖革放电停止时的输出电流是一个具有相对慢的下降时间的脉冲波形 [图2-4]。

结构

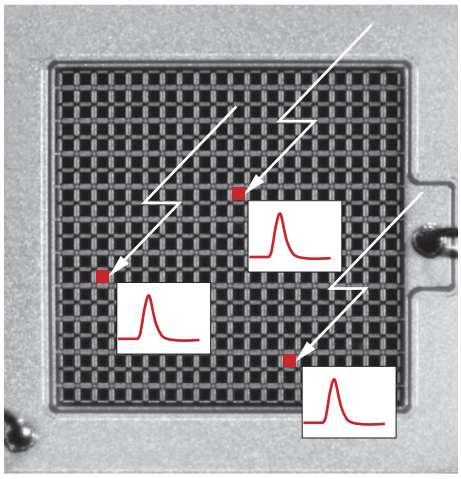
图2-1 是MPPC.的结构示意图。 MPPC 的基本元件（单像素）是盖格模式 APD 和猝熄电阻的串联，许多这些元素的电学并联组成了二维阵列。

[图 2-1] 结构



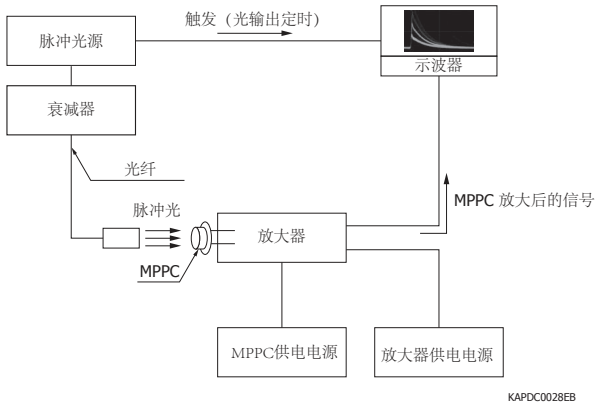
KAPDC0029EA

[图 2-2] MPPC 光子计数图片



KAPDC0049EA

[图 2-3] MPPC评估框图（带示波器）



基本操作

每个 APD 像素独立探测是否有光子进入。由多个像素产生的脉冲彼此叠加输出。例如，如果四个光子入射在不同的像素上并且同时被检测，则 MPPC 输出幅度等于四个叠加的脉冲的高度的信号。每个像素仅输出一个脉冲，并且这不随入射光子的数量而变化。因此，无论一个光子或两个或更多个光子同时进入像素，输出脉冲的数量总是一个。这意味着当两个或更多个光子进入一个像素时，越多光子入射在 MPPC 上，MPPC 的输出线性变得越差。即必须选择具有足够像素以匹配入射光子数目的MPPC。

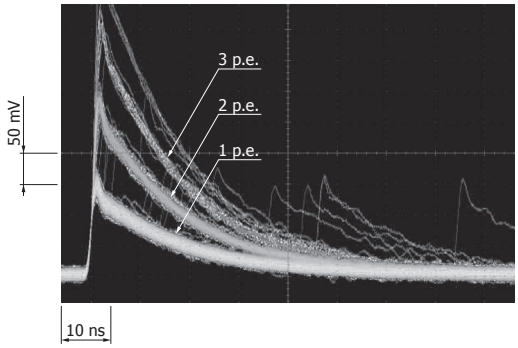
以下两种方法可用于估计MPPC检测到的光子数。

•观察脉冲
•测量输出电荷

(1) 观察脉冲

当光在特定时间进入 MPPC 时，其输出脉冲高度根据检测到的光子数而变化。图 2-4 给出了当用光子计数级别的脉冲光照射 MPPC 时获得的来自 MPPC 的输出脉冲，然后用线性放大器放大并在示波器上观察。从图中可以看出，根据探测到的光子的数量不同，例如探测一个、两个、三个光子等时的脉冲彼此分离。测量每个脉冲的高度可以估计检测到的光子的数量。

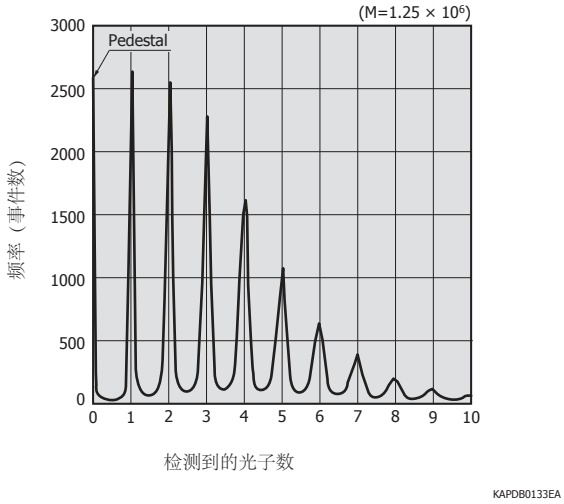
[图 2-4] 使用线性放大器的脉冲波形(120倍)
(S12571-050C, M=1.25 × 106)



(2) 测量输出电荷

在特定时间内探测到的光子数量的分布可以使用电荷放大器或类似装置测量到的 MPPC 输出电荷来估计。图 **2-5** 表示通过辨别累积电荷量而获得的脉冲分布。左起的每个峰对应基底、一个光子、两个光子、三个光子等的情况。

[图 2-5] 使用电荷放大器后的脉冲高度谱
(S12571-050C, M=1.25 × 10^6)



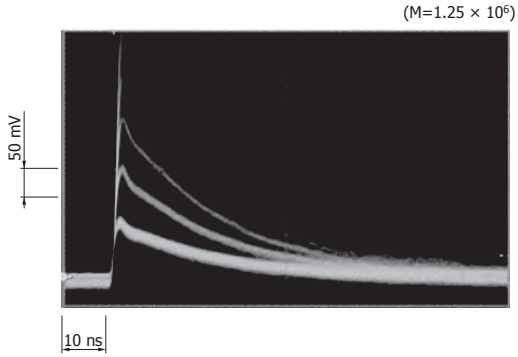
2-2 特点

低后脉冲

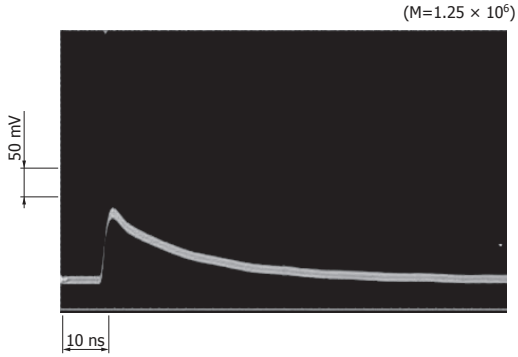
当使用 MPPC 检测光子时，比输出信号延迟的信号可能会出现，这些信号称为后脉冲。与以前销售的产品相比，新的MPPC 由于使用改进的材料和晶圆加工技术而大大减少了后脉冲。减少后脉冲具有许多优点，例如可以获得更好的信噪比、更宽的工作电压范围，以及改善的时间分辨率和光子探测效率（PDE）。

[图 2-6] 脉冲波形

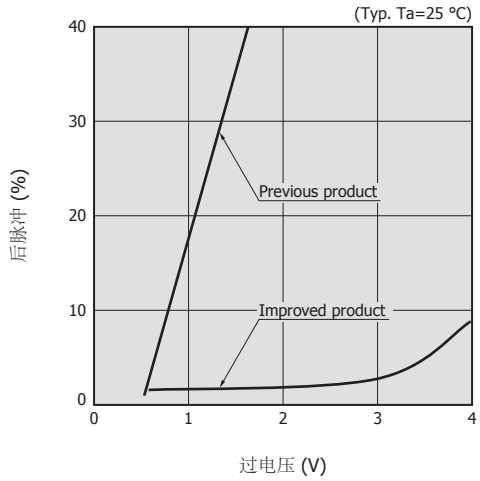
(a) S10362-11-050C (上一代产品)



(b) S12571-050C (改进产品)



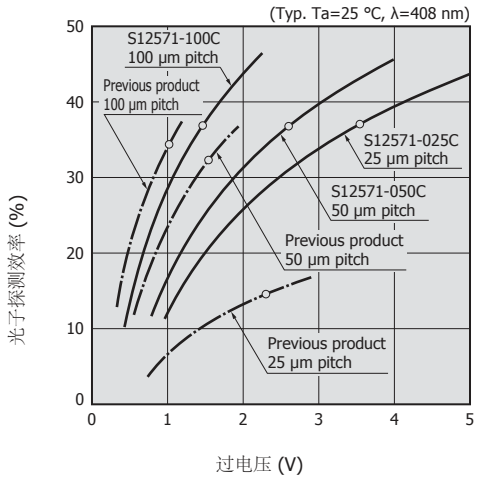
[图 2-7] 后脉冲 vs. 过电压



高光子探测效率

MPPC的峰值灵敏度在400-500nm之间。 MPPC的灵敏度称作光子探测效率（PDE），可以由量子效率、填充因子和雪崩概率的乘积来计算。其中，雪崩概率取决于工作电压。 25 μ m 像素尺寸的 MPPC 专为高填充因子设计，与我们以前的类型相比，这大大提高了光子探测效率。使用这种设计，我们还开发了 10 μ m 和 15 μ m 像素尺寸的 MPPC，以提供高速响应、宽动态范围和高光子检测效率。50 μ m像素尺寸类型 和100 μ m 像素尺寸类型的 MPPC 的填充因子与旧产品的填充因子相同，但是通过增加过电压的方法改善了光子探测效率。

[图 2-8] 光子探测效率 vs. 过电压



光子探测效率不包括串扰和后脉冲。

KAPDB0217EB

[表 2-1] 推荐过电压

像素间距 (μm)	推荐过电压 (V)	
	旧版产品	S12571 系列
25	2.3	3.5
50	1.5	2.6
100	1.0	1.4

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

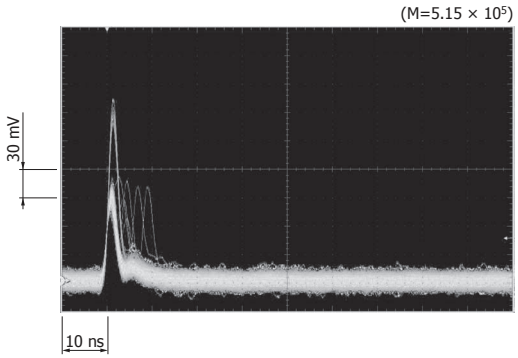
V_{ov}: 过电压
V_{op}: 工作电压
V_{BR} : 击穿电压

宽动态范围

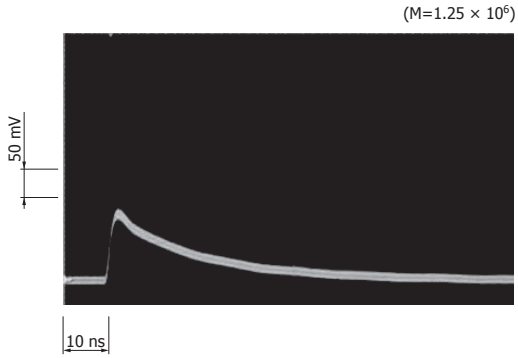
MPPC 的动态范围由像素数和像素的恢复时间决定。滨松已开发的 MPPC 产品最小像素尺寸为10 μm，这增加了单位面积的像素数的同时缩短了恢复时间，大大地扩展了MPPC 的动态范围。

[图 2-9] 脉冲波形

(a) 高速、宽动态范围类型 S12571-010C (像素间距: 10 μm)



(b) 一般测量型 S13360-3050C(像素尺寸: 50 μm)

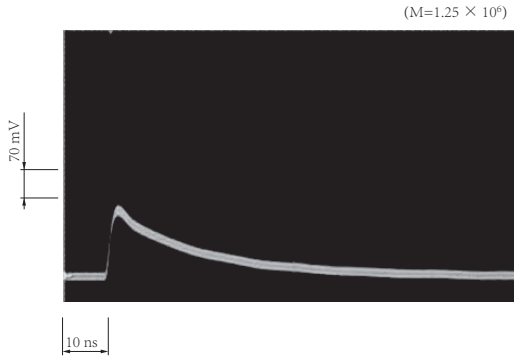


低串扰

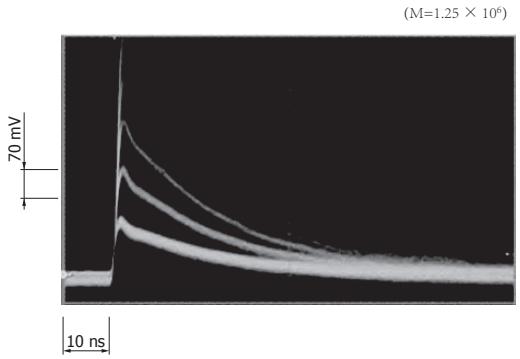
探测到光子的像素可能会影响其他像素，使其他像素产生额外的脉冲输出，这一现象叫做串扰。滨松已通过在像素间创建沟槽隔离的方法在精密测量用MPPC 中大幅度减小了串扰现象。

[图 2-10]脉冲波形

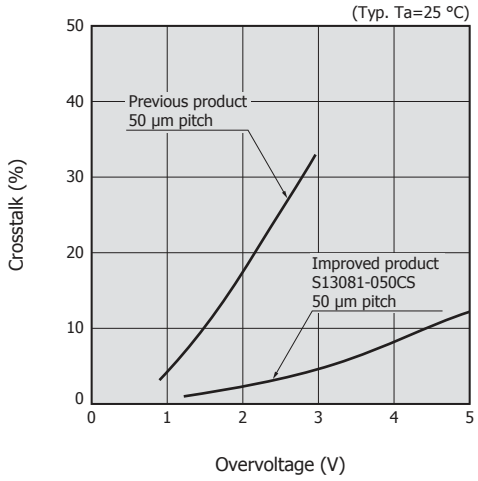
(a) 精密测量型 S12571-050C((像素间距: 50 μm)



(b) 一般测量型 S13081-050CS (像素间距: 50 μm)



[图 2-11] 串扰 vs. 过电压

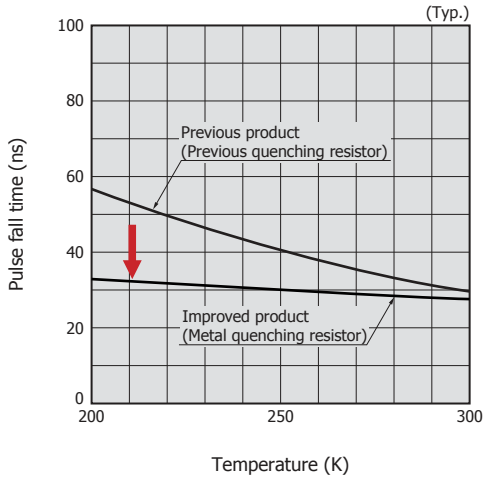


金属猝灭电阻

由于使用金属猝熄电阻，电阻的温度系数降低到旧产品类型的1/5。这抑制了下降沿脉冲边缘的变化，特别是低温情况时，因此改善了输出波形。

关于可用温度范围的信息，请参见产品数据表。

[图2-12] 脉冲下降时间vs. 温度 (感光区域: 1 mm sq, 像素尺寸: 50 μ m)



2-3 性能参考及影响因素

MPPC 产品系列和性能参考

为满足各种应用和需求，滨松提供不同的像素尺寸和光敏区域的了全系列MPPC 类型。MPPC封装类型包括金属、陶瓷、PWB（印刷线路板）和CSP（芯片尺寸封装）。对于多通道阵列探测器，滨松还提供像素间均匀特性好、死区窄的MPPC阵列产品。

具有较大像素尺寸的MPPC类型适用于需要高增益和高光子探测效率的应用，而较小像素尺寸的类型适用于需要高速响应和宽动态范围的应用。具有较大感光面积的类型适用于宽动态范围测量或探测入射面积较大的光，而具有较小感光面积的类型适用于需要高速度和低暗计数的应用。

MPPC 特性随工作电压而变化。为了适用于各种应用，MPPC工作电压可以在较宽的范围内根据需要进行调节。为使 MPPC 性能最优，应在需要高增益、高光子探测效率和高时间分辨率的应用中将工作电压设置得较高，而在需要低噪声（低暗电流、低串扰和低后脉冲）的应用中将工作电压设置较低水平。

[表2-2] MPPC 性能 vs. 像素尺寸

像素尺寸	小 ←→ 大
增益	
光子探测效率	
宽动态范围	
高速响应	

[表 2-3] MPPC 性能 vs. 感光区域

感光区域	小 ←→ 大
动态范围	
大面积探测光	
高速响应	
暗度	

[表2-4] MPPC 性能 vs. 工作电压

工作电压	低 ←→ 高
增益	
光子探测效率	
时间分辨率	
噪声	

增益

(1) 定义

MPPC的增益是根据APD探测到光子后产生的脉冲电荷量（Q），除以单电子电荷量（q：1.6×10^{-19}C）定义的。

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

M: 增益

方程（2）中的电荷 Q 取决于反向电压 VR 和击穿电压 VBR，可用方程（3）表示：

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

C: 单像素电容

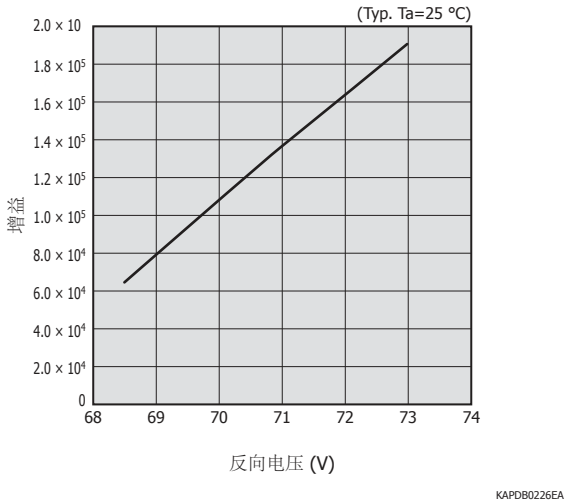
式（2）和（3）表示像素电容越大或反向电压越高，MPPC 的增益越高。但是另一方面，增大反向电压也会增加暗电流和后脉冲。所以应根据应用要求确定所需的反向电压。

(2) 线性度

随着反向电压的增加，MPPC的增益会线性的增加。图 2-13 是一个典型示例。

[图 2-13] 增益vs 反向电压

(感光区域: 1 mm sq, 像素尺寸: 10μm)



(3) 温度特性

和 APD 一样，MPPC 的增益也受温度影响。温度升高，晶格震动强烈，载流子在获得足够大的加速能量之前撞击晶格的概率越大，电离发生的难度越高。因此，反向电压不变，温度升高导致增益降低。为了维持稳定输出，有必要根据温度变化调节反向电压，或者保持器件温度恒定。

图 2-14 是环境温度变化时，维持增益不变所需的反向电压。

[图 2-14] 反向电压 vs. 环境温度 (感光面积: 1 mm sq, 像素尺寸: 10 μm)

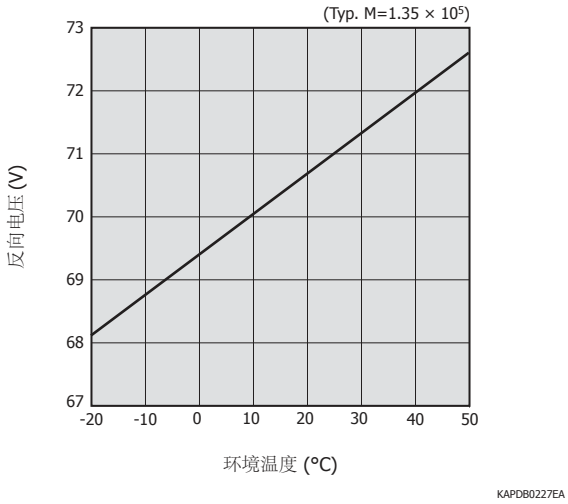
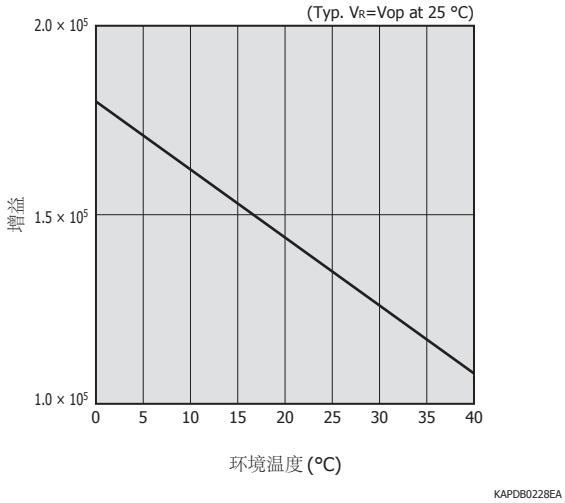


图 2-15 显示了当反向电压为固定值时增益和环境温度的关系。

[图 2-15] 增益 vs. 环境温度
(感光面积: 1 mm sq, 像素尺寸: 10 μm)

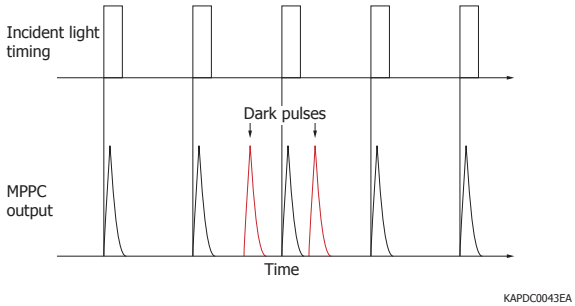


暗计数

(1) 定义

与 APD 类似，在 MPPC 的操作中，脉冲不仅由光生载流子产生，而且由热产生载流子也可产生脉冲信号，由后者产生的脉冲称为暗脉冲。观察到的信号脉冲包括信号脉冲和暗脉冲，因此可能会引起探测误差。热生成载流子也会倍增成为以恒定的信号电平（1p.e.），通过脉冲形状无法区分暗脉冲和光子产生的信号脉冲 [图2-16]。

[图 2-16] 暗脉冲



观察到的暗脉冲的数量称为暗计数，并且每秒暗脉冲的数量称作暗计数率 [单位：cps（每秒计数）]。将滨松 MPPC 的暗计数率定义为在暗环境中产生并超过阈值 0.5p.e 的脉冲数，表示为 $N_{0.5\,p.e.}$。

(2) 温度特性

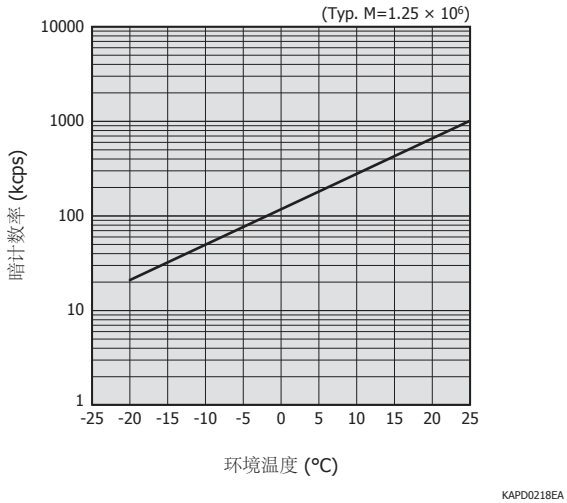
由于暗脉冲由热生成的载流子产生，所以暗计数率随环境温度变化而变化。在工作温度范围内，暗计数率由式（4）给出。

$$N_{0.5\,p.e.}(T) \approx AT^{\frac{3}{2}} \exp\left[\frac{Eg}{2k\,T}\right] \cdots\cdots\cdots (4)$$

T ：绝对温度 [K]
A ：任意常数
Eg：带隙能量 [eV]
k ：玻尔兹曼常数 [eV/K]

图 2-17 给出了增益设为常数时暗计数率和环境温度的关系。

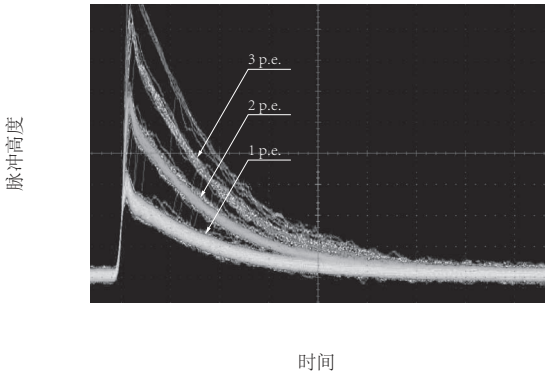
[图 2-17] 暗计数率 vs. 环境温度
(感光面积: 3 mm sq, 像素尺寸: 50 μm)



串扰

当光入射到 MPPC 像素上时，可能存在2p.e.或更高的脉冲的情况，这是因为在 MPPC 像素的雪崩倍增过程中产生次生光子，并且这些光子被其他像素探测，这种现象叫做光学串扰。

[图 2-18] 串扰示例

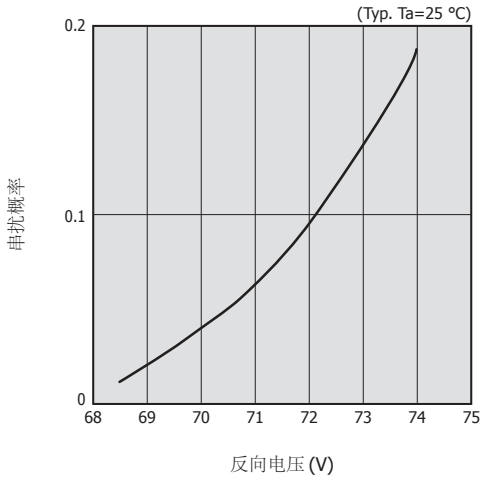


由式(5)定义串扰概率 (Pcrosstalk) 。

$$\text{Pcrosstalk} = \frac{N_{1.5\,\text{p.e.}}}{N_{0.5\,\text{p.e.}}} \quad \cdots\cdots (5)$$

在额定工作温度范围内，串扰概率几乎不取决于温度。随着反向电压的增加，串扰发生的概率增大 [图 2-19]。

[图 2-19] 串扰概率 vs. 反向电压
(感光面积: 1 mm sq, 像素尺寸: 50 μm)

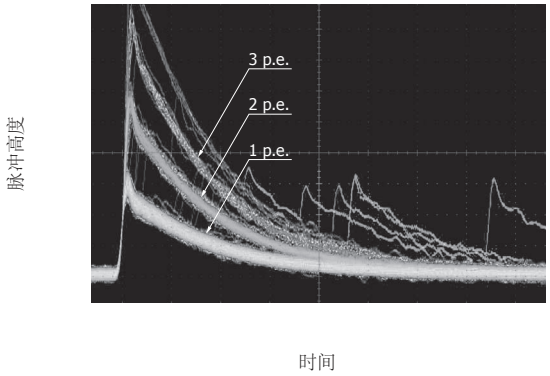


KAPDB0229EA

后脉冲

在 MPPC 像素中的雪崩倍增过程期间，所产生的载流子可能被晶格缺陷捕获。当这些载流子被释放时，它们与光子产生的载流子一起在雪崩过程中被倍增，形成后脉冲。仅从脉冲形状上，无法区分光子产生的脉冲和后脉冲。

[图 2-20] 观察到的后脉冲



暗电流

在暗背景下工作时产生的输出电流称作暗电流。MPPC 暗电流（ID）由等式（6）表示。

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

Is: 表面漏电流
Ij: 复合电流
Ib: 体电流

当 MPPC 工作在盖格模式下时，体电流由式(7)表示，假设单位时间发生雪崩倍增的数量为 Nfired。

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

q: 电子电荷
M: 增益

由于 MPPC 增益通常为 10^5 - 10^6，体电流 Ib 在式 (6) 中占主导地位，且通过式 (7) 可以大致得到式 (8)。

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

暗环境下，发生雪崩倍增的像素数与暗计数率相等，所以暗电流 ID 可以根据 $N_{0.5\,\text{p.e.}}$ 和 Pcrosstalk 大小由式 (9) 估计。如果特定反向电压下的增益和串扰概率已知，则暗电流可以由暗计数率大致估计，反之亦然。

$$I_D \approx q\ M\ N_{0.5\,\text{p.e.}} \frac{1}{1 - \text{Pcrosstalk}} \quad \cdots\cdots\cdots (9)$$

光灵敏度和光子探测效率PDE

光灵敏度和光子探测效率用于表示 MPPC 光探测灵敏度。光敏感度表示为 MPPC 输出电流（模拟值）与入射在 MPPC 上的连续光光量的比值。光子探测效率是探测到的光子的数量与入射光子的数量的比值。光灵敏度和光子探测效率都与填充因子、量子效率和雪崩概率的参数相关。

填充因子是可探测光区域与 MPPC 的整个像素区域的比值。与光电二极管和 APD不同，MPPC 感光区域包括不能探测光的像素间布线部分，因此感光区域上的有些入射光子未被探测到。大体上讲，像素尺寸越小，填充因子越小。

量子效率定义为一个像素上入射光产生载流子的概率。正如其它类型的光电半导体一样，MPPC 的量子效率取决于入射光波长。雪崩概率是像素上产生的载流子可能发生雪崩倍增的概率。施加在 MPPC 上的反向电压越大，雪崩概率越大。

(1) 光灵敏度

光敏感度 (S; unit: A/W) 是 MPPC 产生的光电流与入射到 MPPC 的光量 (单位: W) 的比值，由式 (10)表示。

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

I_{MPPC}: 光电流 [A]

光敏正比于增益大小，因此施加到 MPPC上的反向电压越大，光敏越大。注意光敏是包括串扰和后脉冲的。

(2) 光子探测效率

光子探测效率（PDE）是入射光子探测百分比的量度，由式 (11)给出。

$$PDE = \frac{\text{探测到的光子数}}{\text{入射光子数}} \quad \cdots\cdots\cdots (11)$$

PDE 可由填充因子、量子效率和雪崩概率表示。

$$PDE = Fg \times QE \times Pa \quad \cdots\cdots\cdots (12)$$

Fg : 填充因子
QE: 量子效率
Pa : 雪崩概率

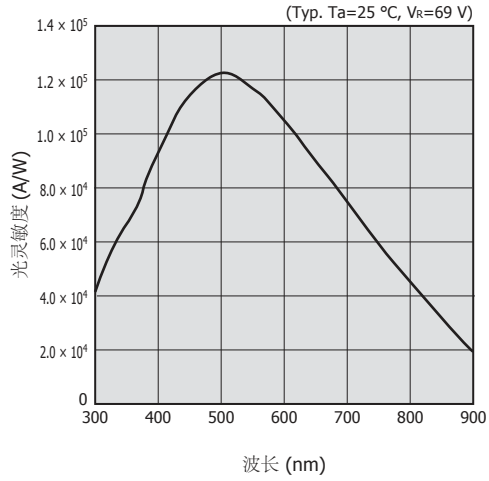
由光敏感度决定的 PDEcurrent 由式(13)表示。

$$PDEcurrent = \frac{1240}{\lambda} \times \frac{S}{M} \quad \cdots\cdots\cdots (13)$$

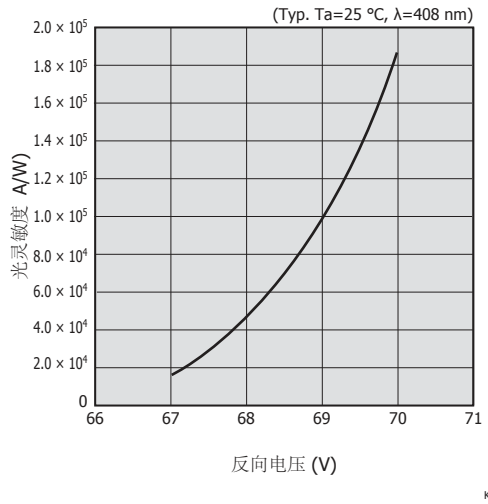
λ: 入射光波长 [nm]

PDEcurrent包括串扰和后脉冲，因此 PDEcurrent 比 PDE 大。

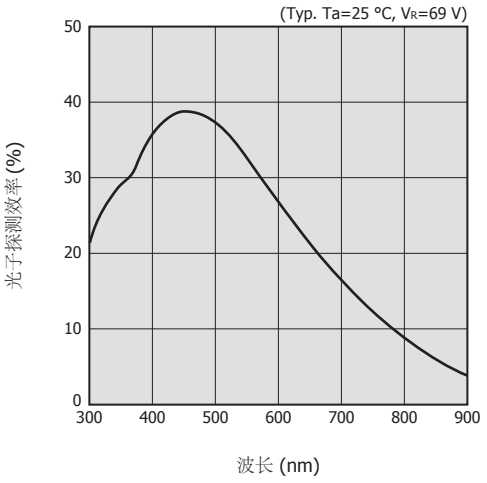
[图 2-21] 光谱响应 (像素间距: 25 μm)



[图 2-22] 光灵敏度 vs. 反向电压
(像素间距: 25 μm)



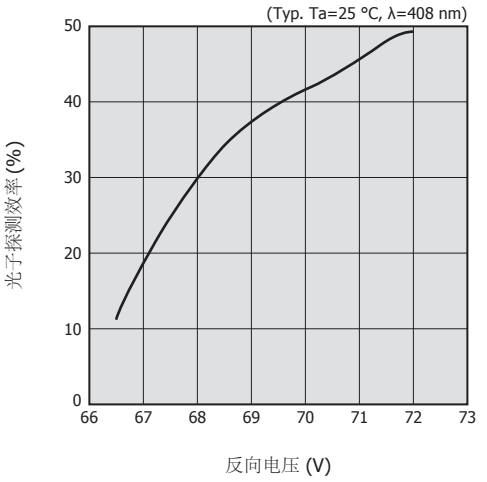
[图 2-23] 光子探测效率 vs. 波长
(像素尺寸: 25 μm)



光子探测效率不包括串扰和后脉冲。

KAPDB0259EA

[图 2-24] 光子探测效率 vs. 反向电压
(像素尺寸: 25 μm)



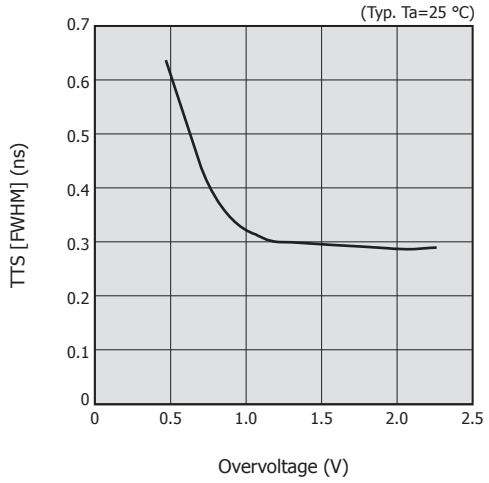
光子探测效率不包括串扰和后脉冲。

KAPDB0233EA

时间分辨率

光入射到MPPC时，每个像素输出信号所需的时间取决于布线长度等因素，（因为MPPC只有一个输出端，每个像素到输出端的距离不同）这种变化称作TTS （渡越时间分散）。另外，在相同感光面的条件下，相像尺寸越大，则TTS越小，时间分辨率越好。增大施加到 MPPC 上的反向电压可以降低并改善TTS。

[图 2-25] TTS vs. 过电压
(感光面积: 1 mm sq, 像素尺寸: 50 μm)



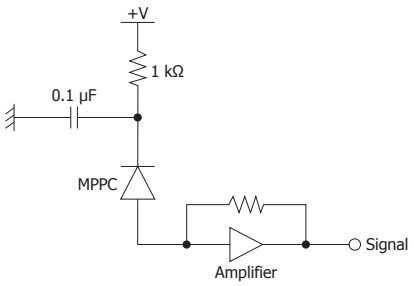
KAPDB0232EA

2-4 使用方法

MPPC 性能随工作电压和环境温度不同改变较大。大致上说，加大工作电压加强了 MPPC 内部电场，因而提高了增益、光子探测效率和时间分辨率，另一方面，也增加了我们不希望看到的现象如会降低信噪比的暗计数、后脉冲和串扰。

MPPC 可根据应用的不同，以不同方法使用。以下我们介绍一种典型的观察光脉冲的方法。为测量方便，使用较大宽带的放大器和示波器。图 2-26 给出了一个宽带放大器的连接示例。供电电源部分的1 kΩ 电阻和 0.1μF 电容用作消除电源高频噪声的低通滤波器。1 kΩ 电阻也是防止过大电流的保护电阻。 MPPC 自身是一种弱光探测器，但是当强光入射MPPC 时，比如当它耦合到闪烁体以用作辐射测量时，会有大电流流入MPPC，这可能会导致保护电阻上有一个显著的电压降，因此必须根据应用仔细选择保护电阻值。放大器应尽可能靠近 MPPC 连接。

[图 2-26] 连接示例



KAPDC0024EB

在使用的 MPPC 输出脉冲具有尖锐上升沿的测量中，必须选择适当的宽带放大器和示波器。由于 MPPC 输出脉冲上升沿通常在几纳秒内，因此强烈建议使用采样频率在1GHz左右的放大器和示波器。使用窄带放大器和示波器可能使输出脉冲失真，以致于获得不准确的值。

2-5 测量示例

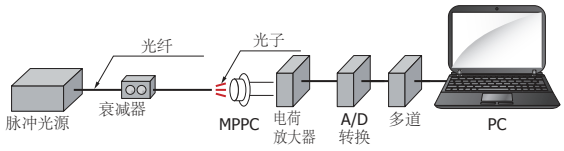
以下是测量 MPPC性能的示例。

增益

(1) 使用电荷灵敏放大器测量

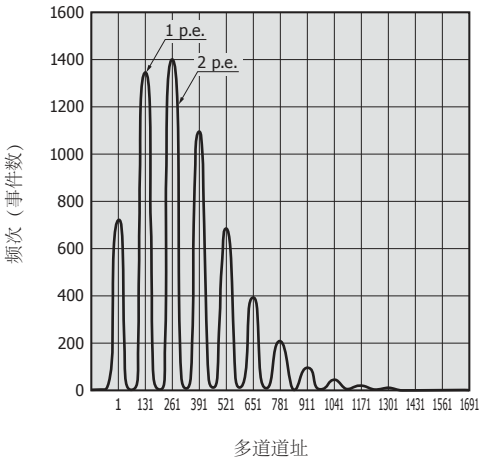
增益可以从MPPC 的输出电荷测算。图 2-27 给出了使用电荷放大器的增益测量的连接设置示例。

[图 2-27] 增益测量连接示例（使用电荷灵敏放大器）



当用光量被衰减器充分减小的脉冲光照射 MPPC 时，小，可绘制输出电荷的数量，获得如图 2-28 所示的频率分布。

[图 2-28] 输出电荷频次分布示例



在图 2-28中，曲线上的峰，左起分别表示基底、一个光子，两个光子等。基底是输出的基础。本例示出 MPPC 主要检测到一个光子和两个光子的情况。相邻峰之间的间隔对应于通过检测一个光子产生的电荷量。增益（M）由式（14）给出。

$$M = \frac{\text{相邻峰间的电荷差}}{q} \quad \cdots\cdots\cdots (14)$$

q: 电荷

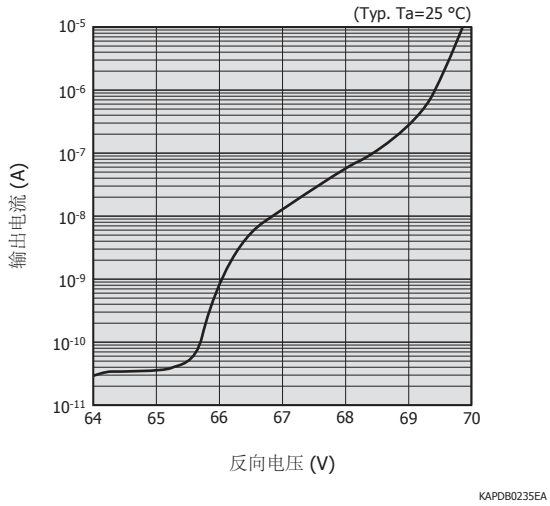
此外，式（14）可以用于创建和推算如图 2-13 所示的增益 vs. 反向电压图，以确定增益为1时的反向电压，即击穿电压 V_{BR}。

(2) dI/dV 测量

图2-29给出了MPPC 的输出电流 vs. 反向电压特性。设定输出电流与反向电压微分的最大值的反向电压值为Vpeak，即Vmax [dI/dv]=Vpeak。则Vpeak-V_{BR}对于每个不同型号的MPPC号近似相等，但是对于同一型号的不同个体产品，Vpeak和V_{BR}不同。对于给定型号的MPPC，通过预先设定Vpeak - V_{BR} ，可以通过测Vpeak进而估计V_{BR}。

[图 2-29] 输出电流 vs. 反向电压

(感光面积: 1 mm sq, 像素间距: 50 μm)

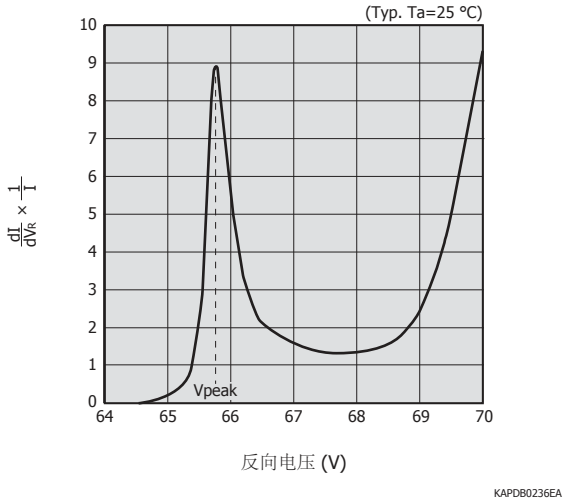


$$\frac{d}{dV_R}\log(I) = \frac{dI}{dV_R} \times \frac{1}{I} \quad \cdots\cdots\cdots (15)$$

I ：输出电流一 [A]
V_R: 反向电压 [V]

图2-29给出了MPPC的输出电流Vs反向电压特性。通过测试可以得到dI/ dv的最大值，设定dI/ dv最大值处于对应的反向电压为Vpeak，则对于任一种型号的MPPC，Vpeak-V_{BR} 都近似相等。但是对于不同个体产品的Vpeak值和V_{BR}值都不同。为了得到一个产品的V_{BR}，我们通过确定的Vpeak-VBR，然后在测试该产品的Vpeak，得到V_{BR} 。

[图2-30] $\frac{dI}{dV_R} \times \frac{1}{I}$ 的电压特性



增益 (M) 由式 (16)给出。

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

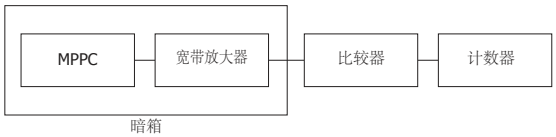
C ：像素电容 [F]
V_{BR}：击穿电压 [V]
q ：电荷量 [C]

由于像素电容是恒定的，因此可以通过测量dI / dV获得的击穿电压和反向电压值得到增益值大小。然而，如果加到MPPC 上的工作电压显著高于推荐工作电压，则如后脉冲和串扰的噪声成分会增加，无法实现精确测量。

暗计数

MPPC 在暗箱中安装和操作，输出脉冲输入到脉冲计数器。对输出脉冲超过预定阈值（0.5p.e. 等）的数量进行计数，以确定暗计数率。 在这种情况下，必须使用带宽较宽的放大器，因为 MPPC 输出脉冲宽度非常短，低至几十纳秒。

[图 2-31] 暗测量框图

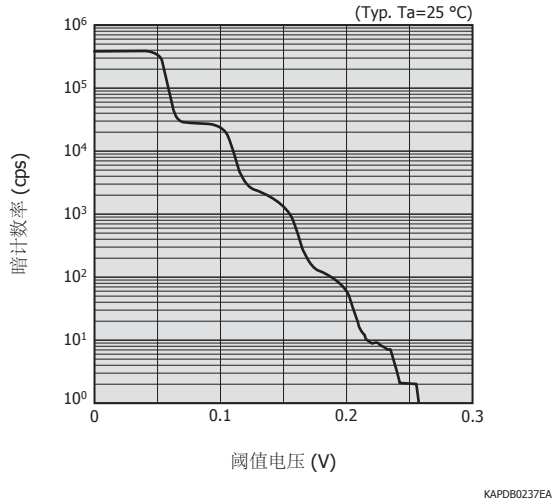


串扰

当设置好阈值，例如设为 0.5 p.e. 和 1.5 p.e.， 然后测量超过阈值的暗脉冲计数率，则可以测得每种阈值下的暗脉冲计数率 $N_{0.5\ p.e.}$ 和 $N_{1.5\ p.e.}$ 。串扰概率 Pcrosstalk 可由式(5)表示。

如果逐渐改变，改变一次，统计一次的暗计效率阈值电压图，则将得到如图 2-32 所示的暗计数率。暗计数率突然降低的阈值电压左起分别对应于一个光子、两个光子等的电平。 暗计数率 $N_{0.5\ p.e.}$, $N_{1.5\ p.e.}$, $N_{2.5\ p.e.}$ 等等可以从该图中获得。

[图 2-32] 暗计数率 vs. 阈值电压



后脉冲

暗脉冲是随机产生的，并且暗脉冲产生的时间间隔遵循指数分布。暗脉冲产生时间间隔 Δt_{dark} (单位：秒) 由式(17)表示。

$$\Delta t_{dark} \propto \exp\left(\frac{\Delta t}{\tau_{dark}}\right) \quad \cdots\cdots\cdots (17)$$

τ_{dark}: 暗脉冲产生时间常数 [s]

后脉冲产生时间间隔由几个指数分布的总和表示。后脉冲产生时间间隔 Δt_{AP} (单位: 秒) 由式 (18)表示。

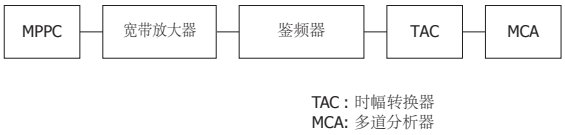
$$\Delta t_{AP} \propto \sum_k A_k \times \exp\left(\frac{\Delta t}{\tau_k}\right) \quad \cdots\cdots\cdots (18)$$

k : ΔtAP对应的时间常数
Ak: 常数
τk : 后脉冲产生的时间常数 [s]

这里 τ_{dark} 与 τ_k 具有很大差别 ($\tau_{dark} >> \tau_k$)。因此有必要在生成给定脉冲之后直到观察到下一个脉冲为止创建经过时间 Δt的直方图，并估计不包括后脉冲的时间区域中的暗脉冲分量。然后从整个直方图中减去拟合的分量，得到后脉冲分量。
测量期间使用甄别器、TAC 和 多道分析器来获得上述直方图。光子进入 MPPC，探测到的信号由放大器放大并且传到甄别器。当鉴频器接收到超过光子检测阈值的幅度的信号时，它将该信号发送到TAC。当从MPPC输出下一个信号时，该信号也被发送到TAC。

然后 TAC 输出幅度与 MPPC 接收的第一个信号和 MPPC 接收的下一个信号之间的时间间隔成比例的脉冲。 MCA 根据脉冲高度将从 TAC 接收的脉冲分类到不同的道址。存储在 MCA中的数据显示在Δt的直方图上。

[图 2-33] 后脉冲测量连接示例



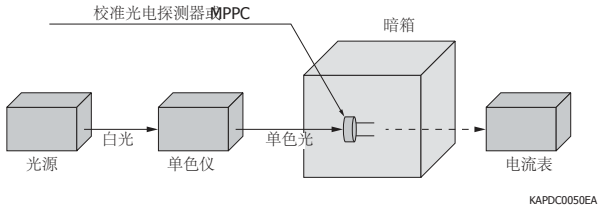
光灵敏度

为测量 MPPC 的光灵敏度，从单色光源发射的入射光首先由暗箱中的校准光电探测器探测，并且从输出中得到入射在光电检测器上的光量（单位：W）。然后，将暗盒中的光电探测器替换为 MPPC，进行相同的测量，并且测得 MPPC 光电流（单位：A）。基于这些测量结果，MPPC 的光灵敏度 (S) 由式(19)计算。

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

I_{MPPC}: 光电流 [A]

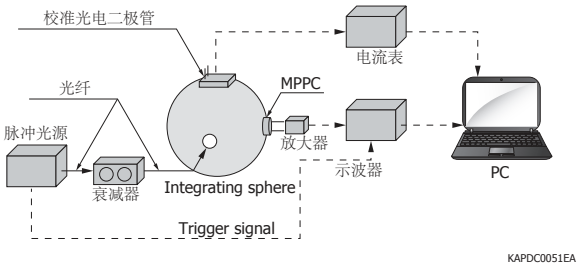
[图 2-34] 光敏感度测量连接示例



光子探测效率（PDE）

为测量 MPPC 的光子探测效率，如图 2-35 所示，使用一脉冲光源。从脉冲光源发射的单色脉冲光通过一个衰减器，并被引导到积分球内。接下来光进入校准过的光电二极管和MPPC中。校准光电二极管的输出电流由电流表测量，基于此值可以得到 MPPC 的入射光子数。[2)]

[图 2-35] 光子探测效率测量连接示例



MPPC 输出信号与来自脉冲光源的触发信号同步发送到示波器，然后从脉冲波形获得 MPPC 输出电荷信息。输出电荷通过如图2-28 所示的输出电荷的频率分布获得。在理想情况下，当脉冲光弱到每个脉冲仅发射几个光子时，该频率分布遵循泊松分布，平均值为 MPPC 探测到的光子数。然而，部分事件包含暗脉冲，并且1p.e. 或更高的事件受串扰和后脉冲影响，将实际测量的分布扭曲，不再是泊松分布。另一方面，由于基线处的事件不受串扰和后脉冲于基线处的事件不受串扰和后脉冲的影响，所以可以基于的影响，并且由此可以找到泊松分布的平均值。

泊松分布由式(20)定义。

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

n: MPPC 的平均光子探测数
x: MPPC 探测到的光子数

如果式(20)中 **x=0**，则泊松分布由式**(21)**表示。

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

当对暗脉冲进行校正时，式（**21**）的左侧由式（**22**）表示。

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

N_{ped} : 脉冲光测量中0 p.e. 时的事件数
N_{tot} : 脉冲光测量中所有事件数
N_{ped}^{dark} : 暗态下 0 p.e. 时的事件数
N_{tot}^{dark} : 暗态下所有事件数

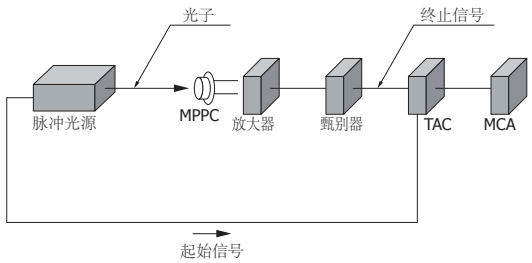
由 MPPC 探测到的光子的平均数量 n 由式（23）给出。然后可以将 n 除以入射光子的数量得到光子探测效率。

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

时间分辨率

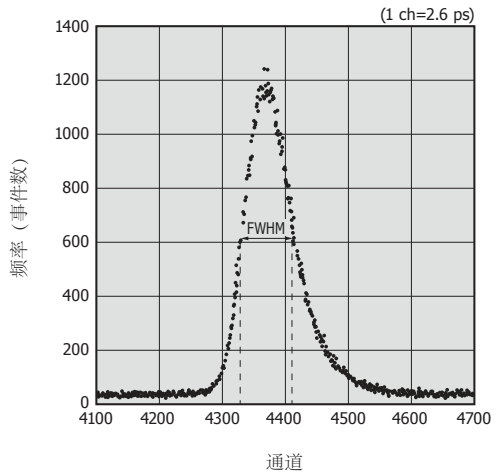
图 2-36 是 TTS (渡越时间分散)测量的器件连接示例。脉冲光源发射光子的同时给发出起始信号。TAC 收到起始信号后开始同时，光子进入 MPPC，探测到的信号用放大器放大后输入甄别器。当鉴频器接收到幅度超过光子探测阈值的信号以后，会给发出信号。TAC 接收到该终止信号，停止时间测量。此时，TAC还会输出一个脉冲，和从光子入射到MPPC 至信号输出时间差的成正比。MCA 分析从 TAC 接收到的脉冲，根据脉冲高度归类到不同通道。存储在 MCA 中的数据是 MPPC 响应的直方图，并且时间分辨率表示为该图形的半高全宽（FWHM）。

[图 2-36] 时间分辨率测量的连接示例



KAPDC0030EA

[图 2-37] TTS (典型示例)



KAPDB0137EA

动态范围

(1) 同步入射光子时的动态范围

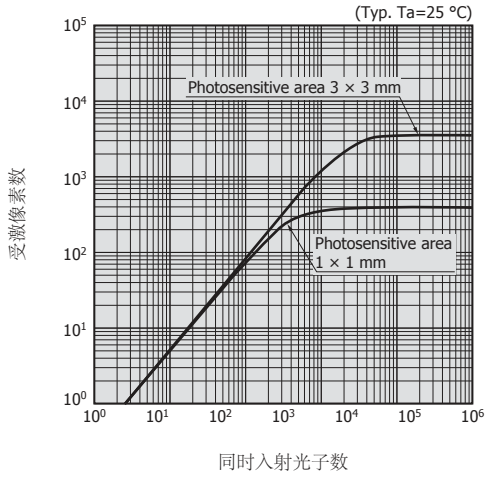
同步入射光子的动态范围由像素数和 MPPC 的光子探测效率决定。当入射光子数增加时，入射同一像素的光子数增加为2个或更多。即使当2个或更多光子入射同一像素，每个像素也只能探测是否有光子入射 MPPC。这意味着随着入射光子增加，输出线性度降低。

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

Nfired : 受激像素数
Ntotal : 总像素数
Nphoton: 入射光子数
PDE : 光子探测效率

想增加动态范围需要使用一个像素数与同时入射光子数相比足够大的 MPPC (也就是说一个大感光面积或窄像素尺寸的 MPPC)。

[图 2-38] 动态范围 (像素尺寸: 50 μm)



KAPDB0238EA

(2) 光子计数状态时的动态范围

MPPC 的受激像素数由式(25)给出。

$$N_{fired} = N_{photon} \times PDE \cdots\cdots\cdots (25)$$

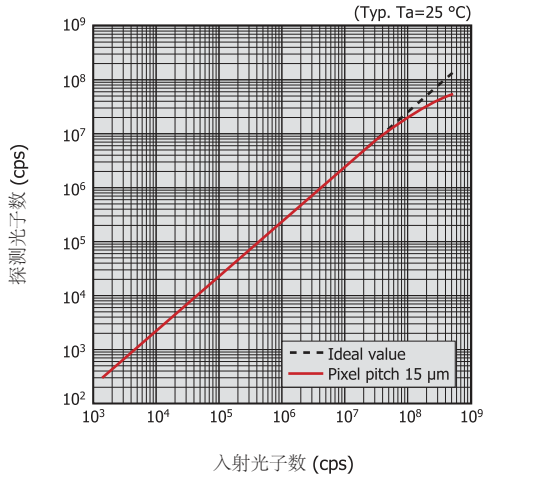
当入射光子数增多，两个或更多输出脉冲与彼此重叠，这导致了计数错误，同时降低了输出线性度。此处的线性度由脉冲对分辨率决定，脉冲对分辨率由 MPPC 的恢复时间（参见2-5节“测量示例”中的“恢复时间”）和读出电路特性所决定。式 (26) 表示了考虑脉冲渡分辨率在内的 MPPC 受激像素数。

$$Nfired = \frac{Nphoton \times PDE}{1 + Nphoton \times PDE \times Tresolution} \cdots\cdots\cdots (26)$$

Tresolution: 脉冲对分辨率

为增加动态范围，应选择恢复时间短的 MPPC 。

[图 2-39] 光子计数状态下的动态范围 (像素尺寸: 15 μm)



(3) 电流测量状态时的动态范围

MPPC 光电流 (I_{MPPC}) 由式 (27)表示。

$$I_{MPPC} = Nphoton \times PDEcurrent \times M \times q \cdots\cdots\cdots (27)$$

PDEcurrent: 光敏感度所决定的 PDE
M : 增益
q : 电子电务

根据入射光量（单位：W），入射光子数由式 (28) 表示。

$$Nphoton = \frac{Incident\ light\ level \times \lambda}{h \times c} \cdots\cdots\cdots (28)$$

λ: 波长 [m]
h: 普朗克常数
c: 光速

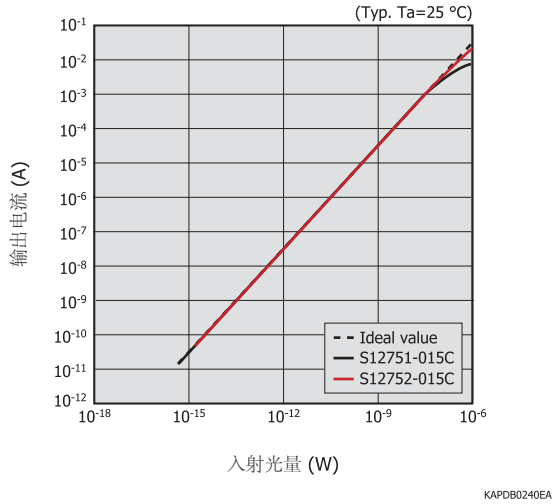
当入射光增强，一个像素上会入射两个或多个光子，在恢复时间之内，后面的光子也有可能入射到同一像素上，这都会降低线性度。式(29) 表示了考虑这些情况时 MPPC 的输出电流 I_{MPPC} 。

$$I_{MPPC} = \frac{Nphoton \times PDEcurrent}{1 + \frac{Nphoton \times PDEcurrent \times T_R}{Ntotal}} \times M \times q \cdots\cdots (29)$$

T_R: 恢复时间 [s]

当大量光入射 MPPC 时，由于 MPPC 元件发热且增益降低，输出线性度可能恶化。且同时输出电流大，这可能会降低施加到 MPPC 上的反向电压，具体取决于所使用的保护电阻的值。 因此，必须选择适当的保护电阻，以防止出现此类问题。

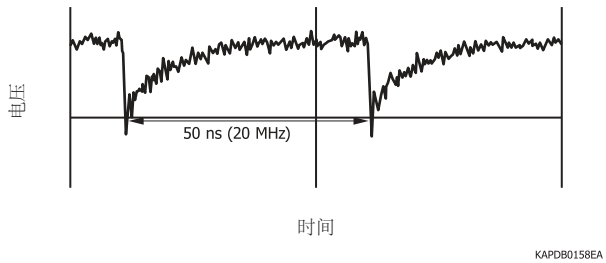
[图 2-40] 输出电流 vs. 入射光量 (像素间距: 15 μm)



恢复时间

像素恢复100%增益所需的时间（恢复时间）取决于感光面积和像素尺寸。对于具有1 mm²的感光面积的 MPPC而言，25 μm像素尺寸时恢复时间为约 20 ns，50 μm像素大小时恢复时间约为50 ns，100 μm像素大小时恢复时间约为100至200 ns。图 2-41 显示了当光进入一个感光面积为1mm²、像素大小为50 μm的 MPPC 像素时的测量输出结辨率表与脉冲恢复时间相等。可以看出脉冲恢复到100%的水平再进行输出。

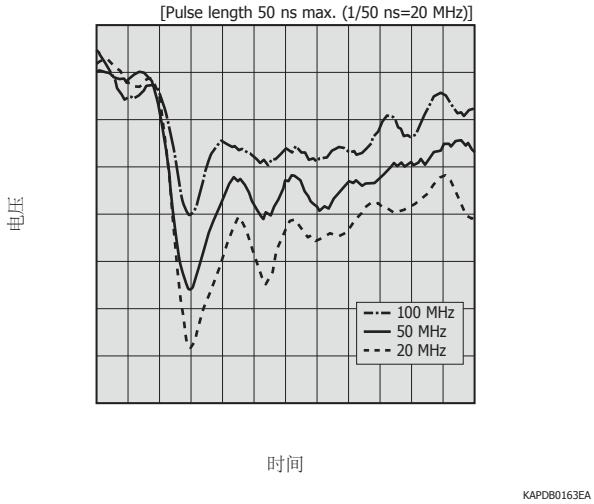
[图 2-41] 脉冲电平恢复(感光面积: 1 mm sq, 像素间距: 50 m)



如果下一输入脉冲在输出脉冲完全恢复之前入射，会输出一个达不到工作电压设置的增益的小脉冲。在图 2-41 中，脉冲的上升区域表示了对像素充电的过程。当下一光子在像素被完全充电之前被探测，则输出脉冲幅度会根据充入电量而变化。

图 2-42 给出了当不同光以不同频率射入像素时获得的输出脉冲形状。当入射光频率增加时，由于像素未被完全充电，脉冲高度减小。

[图 2-42] 光以不同频率入射时获得的输出脉冲 (感光面积: 1 mm sq, 像素尺寸: 50 μm)



2-6 选择数字模式或模拟模式

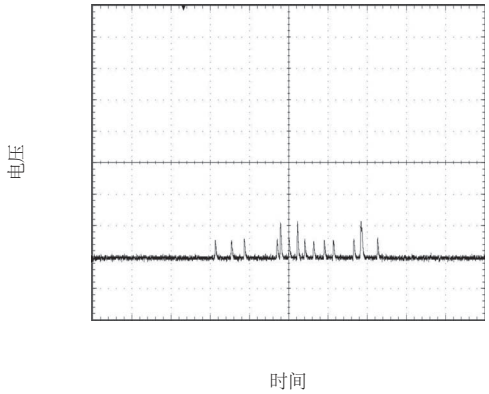
应根据入射到 MPPC 上的光量选择读出电路模式（数字模式或模拟模式）。

图 2-43 (a)(b)(c) 显示了不同入射光量下测量的 MPPC 的输出波形，并采用示波器观察波形。入射光量以(a)(b) (c)的顺序增加，(a)图中入射光量很低。可以看出(a)图中的输出信号由离散脉冲组成。这种状态下，选择数字模式可以在更高的信噪比下测量，这里信号被二值化并且脉冲数被数字计数。由于数字模式可以从信号中减去暗计数，因此探测的下限由暗计数波动决定。

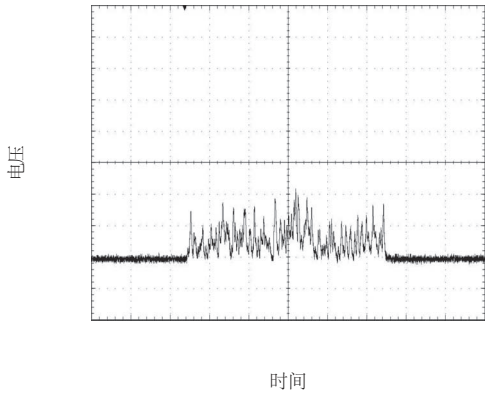
当光量增加，输出波形由彼此重叠的脉冲组成 [(b), (c)]。在这种状态下无法对脉冲数计数，应选择模拟模式测量模拟输出并找到平均值。模拟模式中的探测阈值由暗电流散粒噪声和读出电路的截止频率决定。图 2-44 给出了适合数字模式和模拟模式的入射光量（MPPC 感光面积: 3 × 3 mm, 像素尺寸: 50 μm)。

[图 2-43] 输出波形

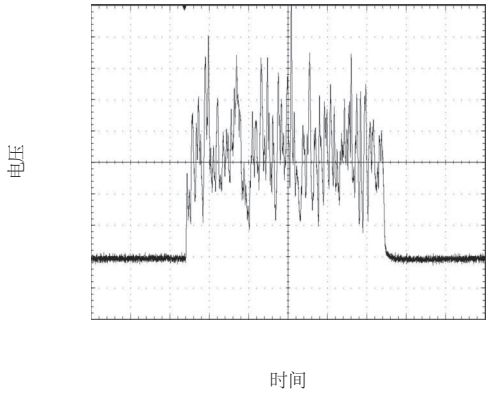
(a) 弱光 (光量很低)



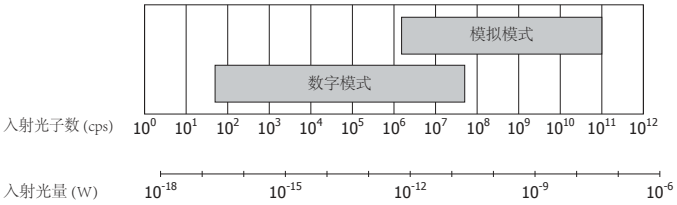
(b) 光量适中



(c) 强光



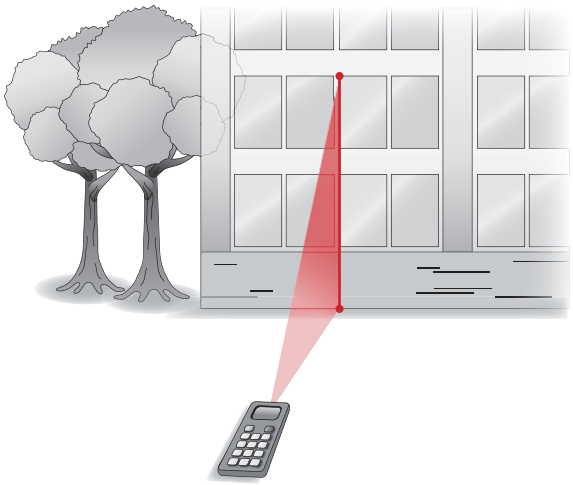
[图 2-44] 适合数字模式和模拟模式的入射光量 (感光面积: 3 × 3 mm, 像素尺寸: 50 μm)



3. 应用

3-1 光学测距仪

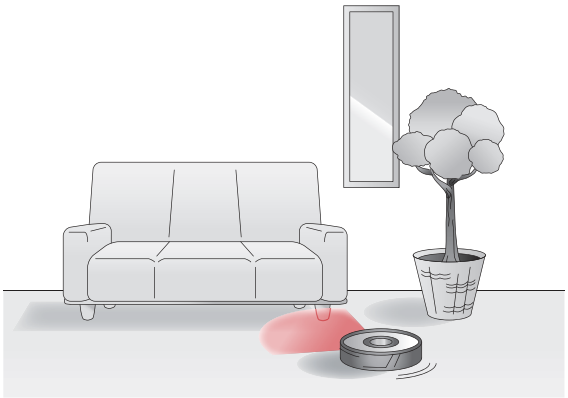
待测距离可以直接由激光光源发射的激光经目标反射到 APD 或 MPPC 的时间或相位差测得。



KACCC0746EA

3-2 障碍物检测

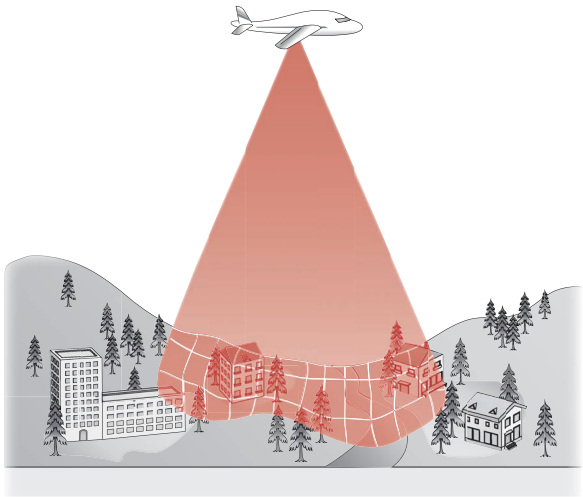
APD 或 MPPC 用于检测障碍物的应用如扫地机器人等。也可用于检测特定区域的人群移动。



KACCC0747EA

3-3 激光雷达(LIDAR)，光探测和测距

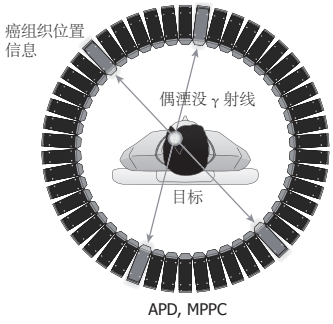
用激光照射到空气或云层的颗粒上，然后通过 APD 或 MPPC 探测反射光或散射光，来测定云层高度、厚度等信息，或用激光照射地表，通过测反射光，得知地貌信信。



KACCC0748EA

3-4 闪烁测量

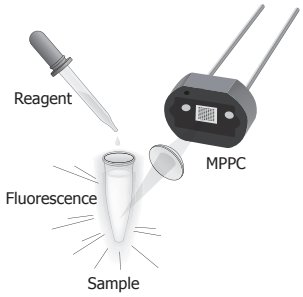
使用APD 或 MPPC 围绕360° 排列检测正负电子对湮灭产生的 γ 射线以捕获目标位置，例如癌组织位置。APD 和 MPPC 可以与 核磁共振成像设备 一起使用，因其不受磁场影响。



KACCC0745EA

3-5 荧光测量

MPPC 可以检测试剂发射的微弱荧光。



KACCC0749EB

3-6 高能物理实验

在使用高能加速器以探究物质的最终成分的实验中，可以使用MPPC。欧洲核字研究中心（CERN）目前正在评估将 MPPC 用于在下一代国际线性碰撞器（ILC）中作为

检测颗粒能量的探测器。此外，日本高能加速器研究机构KEK）和日本原子能机构（JAEA）正在东海村（茨城县）建立的日本质子加速器研究中心（J-PARC）进行合作实验，此实验称作“T2K”（okaΓ - Kamioka），将中微子束发送到超级神冈探测器（super-kamiokande)（岐阜县，离东海村约300公里）来验证中微子是否有质量。该实验中使用大量MPPC（62000只）监测中微子束。

■ 参考文献

1) 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)

2) 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

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)