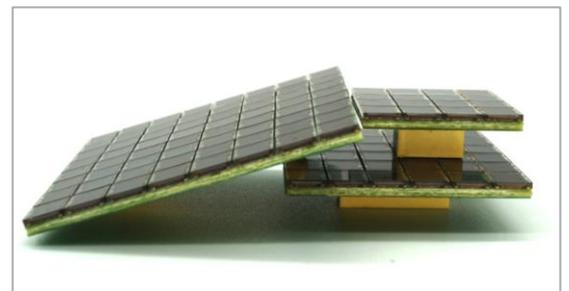
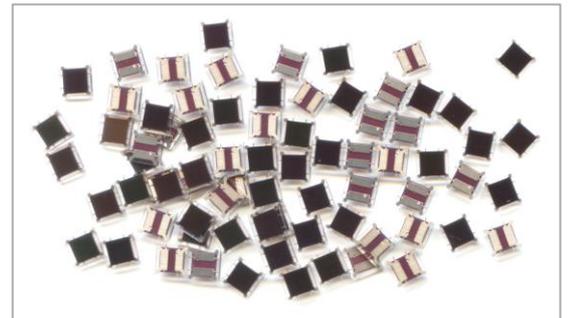


# 硅光电倍增器简介

—新型高性能光电探测器

## 什么是硅光电倍增器

硅光电倍增器 (silicon photomultiplier, SiPM) 是一种新型的高性能半导体光电探测器，它是由工作在盖革模式的多个像素相互并联的阵列构成，每个像素由雪崩光电二极管和淬灭电阻串联而成。SiPM 具有从近紫外到近红外的光谱响应范围、出色的光子计数能力、单光子级别灵敏度、皮秒级快速响应能力、出色的时间分辨率和较高的光子探测效率等优异特性，并兼具固体探测器对磁场不敏感，能够抵抗高强度机械冲击，且不会因为入射光饱和而老化的优点。由于集诸多优异特性于一身而且简单易用，SiPM 已被广泛认为是替代传统弱光探测器的最佳选择。目前 SiPM 已在医学成像、激光探测与测量、辐射探测和精密分析等领域取得广泛应用。



## 工作原理

### 光电效应

光具有波粒二相性，光线中携带能量的粒子称为光子。当光子携带的能量大于硅材料的禁带宽度时，入射到硅材料体内的光子便会被硅材料吸收，处于硅材料价带的电子由于吸收了光子的能量而从价带跃迁到导带，成为自由移动的电子，并在价带留下电子的空位（称为空穴），从而形成电子-空穴对。电子和空穴统称为载流子。在实际探测中，通过在硅材料中进行不同导电类型的掺杂来形成 PN 结，在 PN 结两端外加偏压形成定向电场，使载流子定向移动从而形成电流，进而通过检测该电流信号来实现光子探测。PN 结深度不同，吸收光的波长就不同。一般来说，硅材料对波长为 200nm-900nm 的光都有很好的吸收能力。

### 硅光电倍增器结构

SiPM 的基本结构单位（像素）是由工作在盖革模式的雪崩光电二

极管（Avalanche Photodiode, APD）串联淬灭电阻构成。多个这样的像素并联连接，构成二维的阵列式结构，并共用一个电源端和一个输出端，就形成了 SiPM，其结构示意图如图 1 所示。

## 盖革模式及其工作过程

盖革模式是指 SiPM 的反向偏压大于其击穿电压的工作状态。如果加到 PN 结两端的反向偏压能够使 PN 结的耗尽层内产生足够强的电场，则在耗尽层内产生的载流子就会在电场的作用下获得足够大的动能，这样，载流子便有一定的概率能与其它的硅原子发生碰撞电离，并产生新的电子-空穴对。这样的过程不断地持续下去，就会使载流子的数目急剧增加，这一过程称为雪崩倍增过程。雪崩倍增过程的示意图如图 2 图所示。

在盖革模式下，电子和空穴都具有很高的碰撞电离率，雪崩倍增过程一旦开始，就会一直持续下去，且处于该状态的雪崩光电二极管对外界的光子不再敏感。只有当耗尽层内的电场强度下降到不能再维持原雪崩过程所需的电场强度时该过程才会停止。通常的做法是加入一个与雪崩光电二极管相串联的淬灭电阻进行分压来实现降低耗尽层内的电场强度的目的。流过淬灭电阻的电流会在淬灭电阻两端产生电压降，从而导致二极管内 PN 结两端的电压也会随之急剧降低，进而导致耗尽层内电场强度迅速减弱，达到停止雪崩的作用，这个过程叫做淬灭。完成淬灭之后，淬灭电阻两端的电压降消失，PN 结两端的电压又达到外加偏压的水平，雪崩光电二极管恢复到对光敏感的状态，准备接收下一个光子，并重复以上过程。SiPM 的单个像素工作过程如图 3 所示。

雪崩光电二极管加淬灭电阻构成的微元像素结构可以实现光子的探测，但它的输出是一个个分立且幅值相同的窄脉冲信号，不能反映光照强度信息。硅光电倍增器是由大量紧密排列的二维像素构成的阵列式结构，每个微元像素均由一个工作于盖革模式的雪崩光电二极管和一个与之串联的淬灭电阻组成。如果两个像素点同时探测到光子，硅光电倍增器的输出就是两个脉冲的叠加，输出的幅值就是单个脉冲幅值的 2 倍。同理，N 个像素点（N 小于像素点总数）同时探测到光子的输出就是单个脉冲幅值的 N 倍，所有像素叠加输出的信号幅值可以表征光强度的不同。如果光强度使所有像素点同时发生雪崩，这时器件达到饱和状态，输出幅值不再随光照强度的增加而增大。

## 主要性能参数

### 击穿电压和过电压

根据其工作原理，SiPM 在进行光子探测时，一般工作在盖革模式。

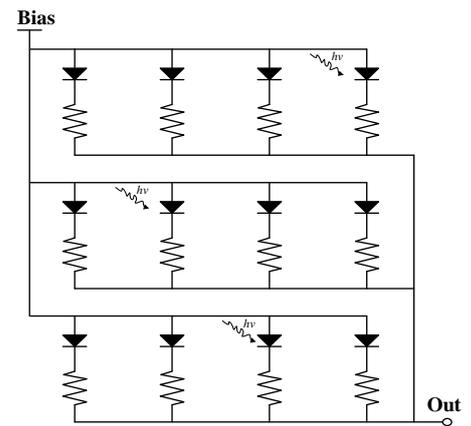


图 1 SiPM 结构示意图

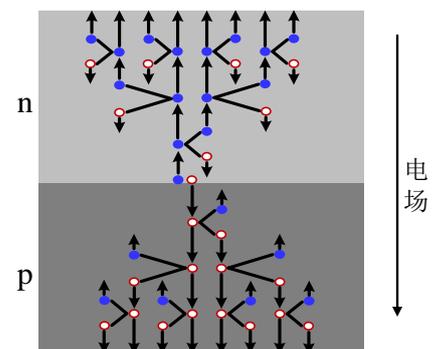


图 2 雪崩倍增过程示意图

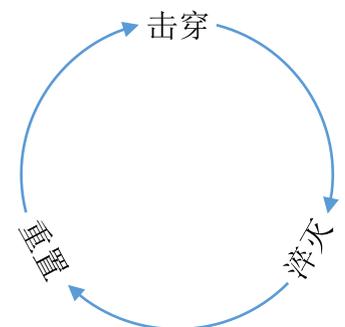


图 3 SiPM 像素工作过程示意图

盖革模式是指 SiPM 的反向偏压 (即其工作电压) 大于其击穿电压的工作状态。所谓击穿电压, 就是在耗尽区内产生的电场强度恰能够发生盖革放电时的外加反向偏压。在如图 4 所示的 I-V 曲线中, 可以清楚地读出击穿电压的值, 即电流发生陡增时的反向偏压就是击穿电压。反向偏压超出击穿电压的那部分电压值就被称为过电压, 即

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

其中  $V_{ov}$  是过电压,  $V_{op}$  是反向偏压, 也称工作电压,  $V_{br}$  是击穿电压。过电压与 SiPM 的其他性能参数有着重要的关系。

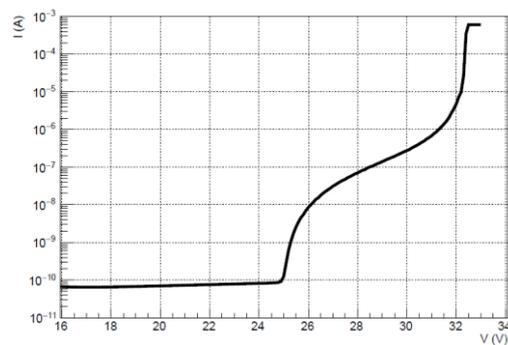


图 4 SiPM 典型的 I-V 曲线图

## 增益

当 SiPM 像素发生盖革击穿时, 每次都会产生数量均匀且可以具体量化的电荷, SiPM 的增益是指当像素探测到一个光子时, 其输出电荷量与单个电子电荷量的比值, 即

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

其中,  $G$  是增益,  $Q$  是输出电荷量,  $q$  为单位电荷量。输出电荷量  $Q$  依赖于过电压, 即有

$$Q = C \cdot V_{ov} \quad (3)$$

其中,  $C$  是指像素的电容。根据 (2) 式和 (3) 式可以看出, 增大像素的电容或提高 SiPM 的工作电压, 可以提高增益。随着过电压的增加, SiPM 的增益呈现出线性增加的趋势, 如图 5 所示。但暗电流、后脉冲也会随着工作电压的提高而增大, 所以 SiPM 需要选择合适的工作电压。

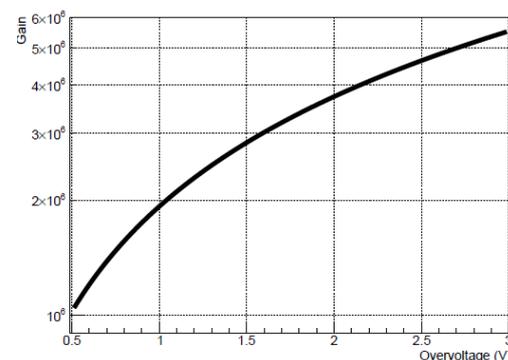


图 5 增益随过电压变化曲线

除了电压之外, SiPM 的增益还依赖于工作环境的温度。随着温度的升高, 硅材料的晶格震动加剧, 载流子与晶格发生碰撞的几率增大, 载流子通过电场加速积累动能以达到能发生碰撞电离的过程变得更加困难。为了使碰撞电离更加容易, 就必须增大反向偏压以提高耗尽区内的电场强度。这也就是说, 击穿电压会随着温度的升高而增大。图 6 给出了在恒定增益下, 工作电压随温度变化的关系曲线。可以看出, 为了保持恒定的增益, 工作电压必须调整以保证其与环境温度相匹配, 当工作电压固定时, 增益则随环境温度的增加而降低。

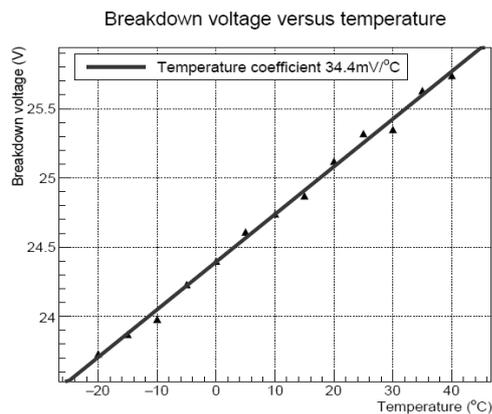


图 6 工作电压随温度变化曲线

## 光子探测效率

光子探测效率是指一个入射到 SiPM 表面的光子能够产生盖革脉冲的统计概率, 可以用式 (4) 表示

$$PDE = \frac{N_{\text{dete}}}{N_{\text{inci}}} \quad (4)$$

式中 PDE 表示探测效率， $N_{\text{dete}}$  表示探测到的光子数目， $N_{\text{inci}}$  表示入射的光子数目。另外，探测效率作为波长和偏置电压的函数，也可以用量子效率、雪崩倍增概率和填充因子的乘积来表示，即

$$PDE(\lambda, V) = \eta(\lambda) \cdot P_b(V) \cdot F \quad (5)$$

其中， $\eta(\lambda)$  是硅材料的量子效率， $P_b(V)$  是雪崩倍增概率， $F$  是填充因子。雪崩倍增概率的存在表明，并不是每一个光生载流子均能发生雪崩倍增效应。此外，因为 SiPM 的表面上各微元相互独立，且有电阻和电极的存在，所以并不是所有的表面区域均能探测到光子。填充因子作为 SiPM 的光敏面积与总面积的比值，就是用来表征其可探测光子的光敏面积大小的。

光子探测效率通常根据 SiPM 的光敏响应度和增益来进行计算。光敏响应度定义为单位光功率下的平均光电流大小，即

$$R = \frac{I_p}{P_{\text{op}}} \quad (6)$$

其中， $R$  是光敏响应度， $I_p$  是测得的光电流， $P_{\text{op}}$  是指入射到 SiPM 光敏面上的某一特定波长的光功率。光敏响应度的单位一般为 A/W。根据光敏响应度，结合式 (7) 即可计算出探测效率：

$$PDE = \frac{R}{G} \cdot \frac{1.24}{\lambda} \quad (7)$$

式中， $G$  表示增益， $\lambda$  表示入射光的波长（以  $\mu\text{m}$  为单位）。采用这种方法计算探测效率，必须先准确得到 SiPM 的增益，而且 SiPM 必须工作在其线性区。值得注意的是，采用该方法得到的探测效率没有排除光学串扰和后脉冲的影响，所以得到的探测效率要比其实际值偏高。探测效率随波长的变化关系如图 7 所示。

## 噪声

噪声是指叠加在有用信号上的一类起干扰作用的信号，SiPM 的噪声由暗计数、光学串扰、后脉冲组成。

## 暗计数率

暗计数率是限制 SiPM 性能和微元尺寸大小的主要因素，也是 SiPM 的主要的噪声源。SiPM 的暗计数是指光敏区内由热激发的载流子发生雪崩倍增效应产生的，并且同单光子信号具有相同幅度的信号，暗计数率用于表征该信号的频率。无论是由热激发的载流子，还是由

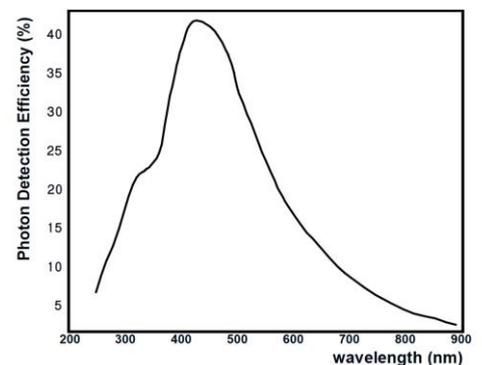


图 7 探测效率随波长变化关系曲线，即光谱响应曲线

入射的光子引起的像素雪崩击穿都会输出信号脉冲，导致无法区分是否有入射光子被探测到。这些热激发的载流子就是单光子级别的噪声源。如果设置一个高于单光子信号幅度的阈值，则由这些噪声源所产生的错误触发脉冲可以被消除。值得注意的是，暗计数对测量的信号幅度始终都有贡献。

暗计数率可以通过采用简单的计数系统，并设置 0.5 个光子信号幅度的阈值来进行测量。SiPM 的暗计数率的典型值为 0.1-1 MHz/mm<sup>2</sup>。图 8 为暗计数率与过电压之间的关系曲线。除了电压，暗计数率还与温度、像素的尺寸以及 SiPM 的总面积都有关系，随着温度的升高，暗计数率急剧增大。反过来，随着温度的降低，SiPM 的暗计数率也会大幅减小。因此，SiPM 结合热电冷却器，可以应用在需要探测器具有极低噪声的弱光探测领域。

### 光学串扰

像素之间的光学串扰是 SiPM 的另外一个噪声来源。当 SiPM 的某一像素探测到一个入射光子时，其内部发生雪崩倍增的过程中产生的光子可能入射到相邻像素，从而引起相邻像素也产生盖革脉冲，这样在输出脉冲上就能观测到 2 个或 2 个以上光子信号幅度的脉冲。SiPM 探测到的次级光子数目与探测到的入射光子数目的比值就是 SiPM 的光学串扰概率。通过设定不同的阈值，测量出输出信号幅度大于 0.5 个光子信号幅度的暗计数率与输出信号幅度大于 1.5 个光子信号幅度的暗计数率，便可计算出 SiPM 的光学串扰概率，即

$$P_{crosstalk} = \frac{N_{1.5p.e.}}{N_{0.5p.e.}} \quad (8)$$

式中， $P_{crosstalk}$  表示光学串扰概率， $N_{1.5p.e.}$  表示输出信号幅度大于 1.5 个光子信号幅度时的暗计数率， $N_{0.5p.e.}$  表示输出信号幅度大于 0.5 个光子信号幅度时的暗计数率。光学串扰概率会随着过电压的增加而增大，如图 9 所示。另外，光学串扰概率与相邻像素之间的距离也有关系，增大像素之间的间距可以降低光学串扰概率，但也会降低填充因子，从而降低探测效率。可以通过在像素之间设置光学隔离沟槽，并在沟槽中填充隔光材料的方式来降低光学串扰概率。

### 后脉冲

在雪崩击穿过程中，大量的载流子会穿过 PN 结，这些载流子会有一定的概率被能隙中的某一陷阱能级所俘获，俘获的载流子随后会被释放，然后产生新的雪崩倍增过程。后脉冲就是由于被陷阱俘获的载流子释放后随即产生雪崩倍增效应所引起的。图 10 中蓝色曲线即为

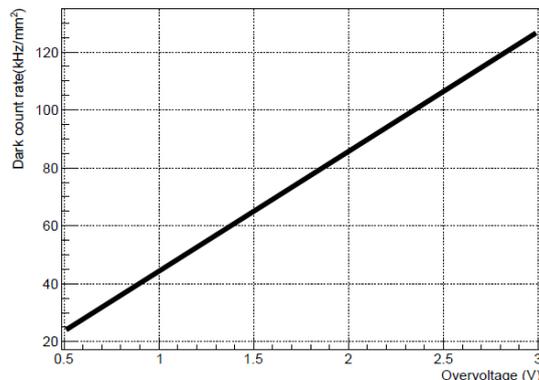


图 8 暗计数率与过电压关系曲线

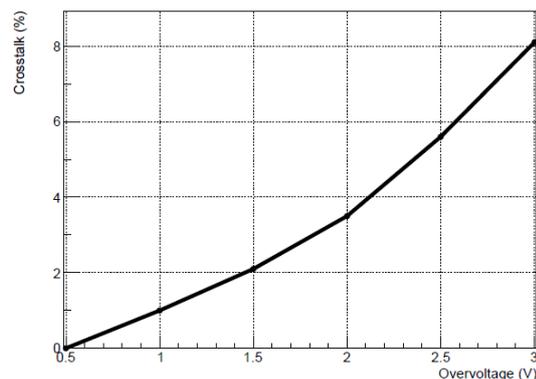


图 9 光学串扰随过电压变化曲线

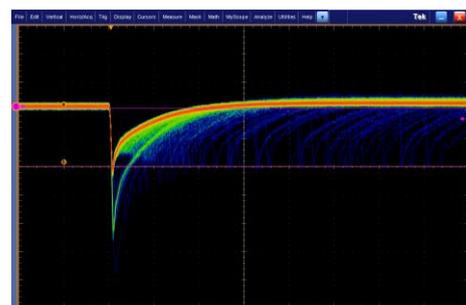


图 10 后脉冲示波器观测图（主脉冲后方的蓝色脉冲信号即为后脉冲）

观测到的后脉冲图。后脉冲通常也用概率来表示。后脉冲与过电压以及陷阱中的载流子的寿命有关。

## 时间特性

SiPM 的典型输出信号脉冲如图 11 所示。SiPM 的上升时间是指像素的放电时间，它依赖于 SiPM 的总电容。工程测量时，上升时间用输出信号的幅度由峰值幅度的 10% 上升到峰值幅度的 90% 所需要的时间来标定。SiPM 的恢复时间是指微元的充电时间，它可以简单表示为

$$t_r = R_Q \cdot C \quad (9)$$

式中， $t_r$  表示恢复时间， $C$  表示微元的有效电容， $R_Q$  表示淬灭电阻的阻值。工程测量时，恢复时间用输出信号的幅度由峰值幅度的 90% 下降到峰值幅度的 10% 所需要的时间来标定。

## 动态范围

动态范围是指使探测器可以提供有用输出的光信号电平范围。对 SiPM 而言，动态范围在可探测到的最小光信号电平到所有像素均同时探测到光子的光信号电平之间。当所有的像素都同时探测到光子时，SiPM 的输出信号将会饱和，即没有更多的像素可以用来探测其他入射的光子，直到某些微元恢复到其可探测阶段。因此，SiPM 的动态范围是像素总数及探测效率的函数。同时，由于探测效率又与偏置电压及入射光的波长相关，所以 SiPM 的动态范围也是偏置电压与波长的函数。当单位时间内入射的光子数目远小于像素数目时，SiPM 的响应是线性的；随着单位时间内入射的光子数目增加，SiPM 的响应逐渐趋于饱和。即在弱光信号级别，SiPM 的输出光电流正比于入射的光功率，SiPM 呈现线性响应；随着入射光功率的增加，由于 SiPM 像素数目的限制，其输出光电流开始偏离线性响应区域，并最终出现饱和。

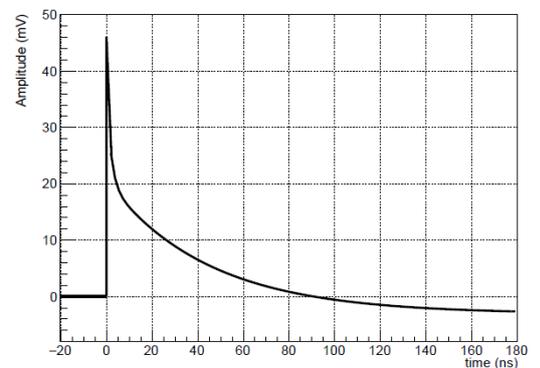
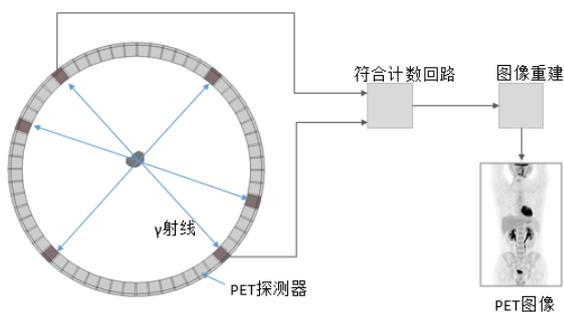
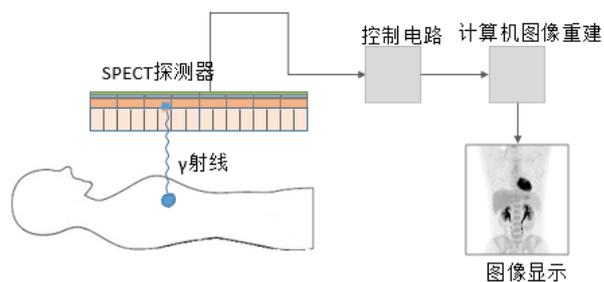


图 11 SiPM 典型脉冲响应曲线

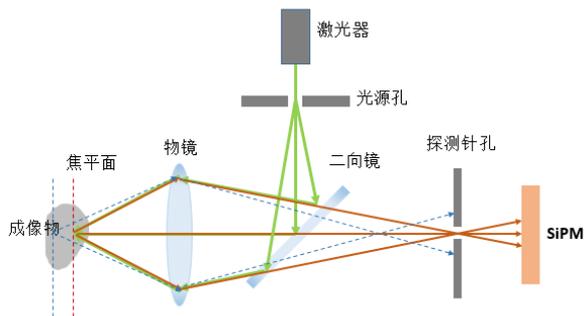
## 应用举例



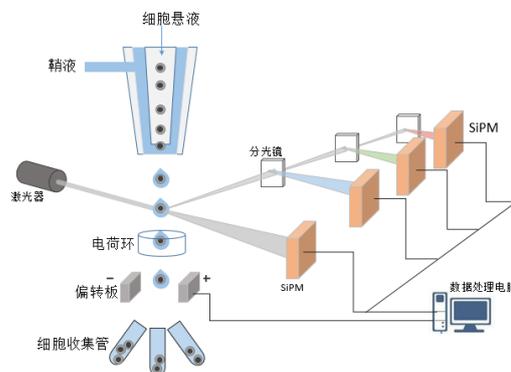
应用 1 正电子发射断层成像



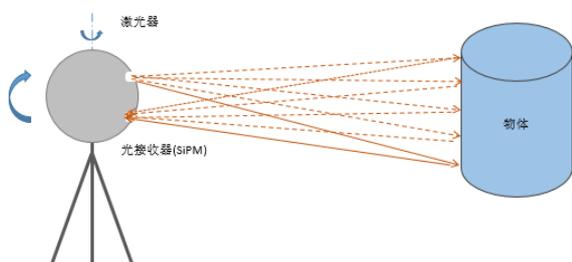
应用 2 单光子发射断层成像



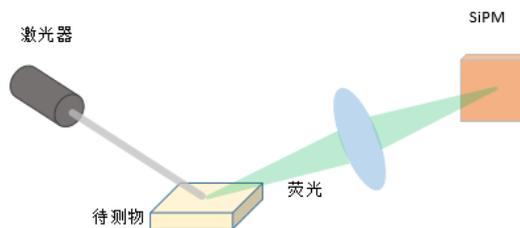
应用 3 激光共聚焦显微镜



应用 4 流式细胞仪



应用 5 激光探测与测量



应用 6 荧光分析仪

访问京邦科技官方网站应用板块 ([点击进入](#)) 获取更多详细应用信息。