硅光电倍增管

硅光电倍增管（Silicon photomultiplier，国际上简称 SiPM），HAMAMATSU 根据原理叫作 MPPC(multi-pixel photon counter)是一种新型的光电探测器件，由工作在盖革模式的雪崩二极管阵列组成，具有增益高、灵敏度高、偏置电压低、对磁场不敏感、结构紧凑等特点。它发明于二十世纪九十年代末，广泛应用于高能物理及核医学（PET）等领域，最近几年来在核医学领域发展迅速，被广泛认为是可以未来极微弱光探测器的发展方向。

中文名
硅光电倍增管

外文名
multi-pixel photon counter (MPPC), Silicon photomultiplier (SiPM)

生产厂家
Hamamatsu，SENSL，NBTech, Joinbon，

广泛应用
核医学，高能物理，精密分析等

其他别名
SiPM，MPPC，GAPD，SPM，硅 PM

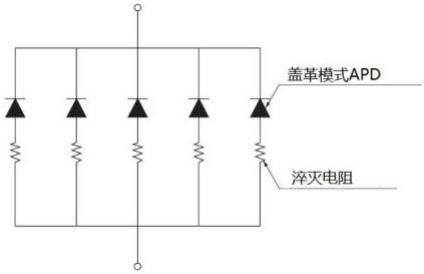
【目录】

1. 原理
2. 结构
3. 工作过程
4. 主要参数
5. 信号读出电路设计
6. 应用领域
   - 核医学
   - 高能物理
   - 精密分析
   - 激光探测与测量

【原理】
每个硅光电倍增管由大量的（几百到几千个）雪崩二极管（APD）单元组成，每一个单元由一个 APD 和一个大阻值淬灭电阻串联而成，这些微元并联成一个面阵列。为硅光电倍增管加上反向偏压

（一般是几十伏）后，每个微元的 APD 耗尽层有很高的电场，此时若外界有光子打进来，会和半导体中的电子空穴对发生康普顿散射，打出电子或空穴（这句话不精确，只为方便理解），高能的电子和空穴随即在电场中加速，打出大量的次级电子和空穴，即雪崩。此时每个微元电路中电流突然变大，在淬灭电阻 R 上降落的电压也变大，APD 中的电场瞬间变小，即 APD 输出一个瞬时电流脉冲后雪崩停止，不同微元的淬灭电阻阻值相同，所以理论上讲每个微元会输出等大的脉冲。APD 是模拟器件，但宏观来看每个微元都是逻辑单元，有信号输出是“1”，没有信号就是“0”。在硅光电倍增管的动态范围内，它输出电流的大小就和发生雪崩的微元数成正比。

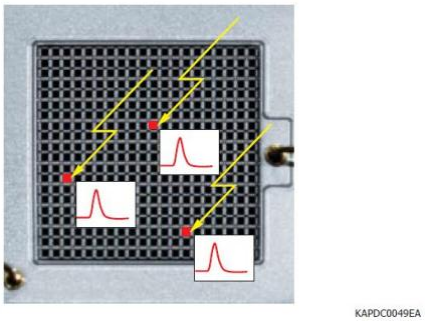
【结构】



结构原理图

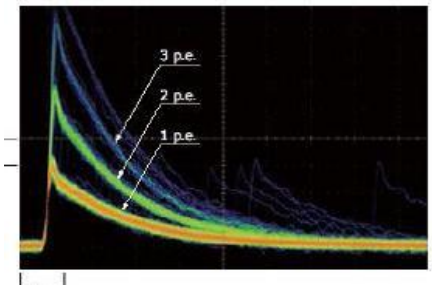
硅光电倍增管（MPPC；SiPM）内部结构详见图示，MPPC 的最基础的单元是由盖革模式下的 APD 和串联的淬灭电阻构成，这两者合并构成了一个像素（Pixel）。硅光电倍增管就是有大量的这种像素在二维方向上排列组成的。

【工作过程】



三个光子入射到不同像素后分别形成一个脉冲[1]

当硅光电倍增管（MPPC；SiPM）中的一个像素接收到一个入射光子时，就会输出一个幅度一定的脉冲，多个像素如果都接收到入射的光子，那么每一个像素都会输出一个脉冲，这几个脉冲最终会叠加在一起，由一个公共输出端输出。例如，如果三个光子同时入射在不同的像素上并在同一时间被检测到，硅光电倍增管会输出一个信号幅度等于三个脉冲叠加的高度。



三个像素形成的脉冲会叠加在一起输出[1]

【主要参数】

击穿电压：加载到 SiPM 上的电压在耗尽层区域产生的电场强度恰好能够使盖革放电发生，这时的电压值叫击穿电压。

过电压：加载到 SiPM 的工作电压超过击穿电压的部分叫过电压，即过电压=工作电压-击穿电压，过电压和 SiPM 的性能直接相关。

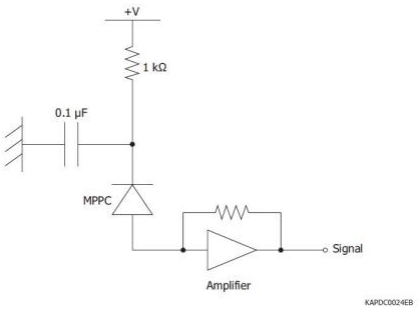
增益：SiPM 增益定义为像素探测到光子后产生的电荷量除以单个电子电荷量的值，该值表征了 SiPM 的信号放大能力。

光子探测效率（PDE，photondetectionefficiency）：指探测到的光子数量与入射光子数量的比值。

暗计数率：SiPM 内部的热生载流子可以触发雪崩从而产生脉冲输出，这样的脉冲称为暗脉冲，一般用每秒发生的暗脉冲次数来表征暗脉冲水平，被称为暗计数率。
光学串扰：SiPM 像素在雪崩过程中产生的光子进入其他像素并被探测到，这种现象叫光学串扰，光学串扰是 SiPM 噪声的一部分，通常用光学串扰发生的概率来表示。

后脉冲：在雪崩击穿过程中，大量的载流子在 PN 结附近形成，这些载流子会有一定的概率被能 SiPM 晶格中的缺陷所俘获，俘获的载流子释放并激发新的雪崩倍增过程，因此产生的脉冲叫后脉冲。

【信号读出电路设计】



典型信号读出电路设计[1]

对于硅光电倍增管（MPPC；SiPM）的信号读出电路，跟以往的光电半导体一样可以使用 I-V 变换

的放大器。由于其自身带有很高的增益，因此在信号读出电路不需要额外增加很高的增益，这也是它在电路设计上变得非常简单。图示是一个典型硅光电倍增管的信号读出电路设计。

【应用领域】

核医学

PET 是惟一可在活体上显示生物分子代谢、受体及神经介质活动的新型影像技术，现已广泛用于多种疾病的诊断与鉴别诊断、病情判断、疗效评价、脏器功能研究和新药开发等方面。[2]

磁共振成像是一种生物磁自旋成像技术，它可以直接作出横断面、矢状面、冠状面和各种斜面的体层图像，不会产生 CT 检测中的伪影，无电离辐射，对机体没有不良影响。MR 对检测脑内血肿、脑外血肿、脑肿瘤、颅内动脉瘤、动静脉血管畸形、脑缺血、椎管内肿瘤、脊髓空洞症和脊髓积水等颅脑常见疾病非常有效，同时对腰椎椎间盘后突、原发性肝癌等疾病的诊断也很有效。

如果 PET 和 MR 能够统一在一起共同成像，将会对各种肿瘤、乳腺癌等疾病的诊断发挥巨大的效果。但是由于 PET 中使用的光电探测器光电倍增管（PMT）不能在 MR 的强磁场中工作，阻碍了 PET 和 MR 的结合。如果将 PMT 换为硅光电倍增管，这个问题就会迎刃而解，一大批中外科学家都在积极研制基于硅光电倍增管的 PET，成果指日可待。

高能物理

欧洲核子中心的 Muon G-2 Experiment 项目使用硅光电倍增管探测 μ 介子衰变过程中产生的正电子。[3]在这个项目中，需要光探测器在极高的磁场环境中工作，并且， 对于探测器的 PDE（探测效率）和暗噪声提出了极高的要求。

精密分析

精密分析领域主要解决极弱光通量甚至单光子级别光通量的探测、分析、计量问题，比如荧光检测、流式细胞术等生物传感设备[4]。SiPM 在可见光范围内具有较高的探测效率，反应速度快，且相比 PMT 等电子管探测器具有更低的价格，是精密分析领域常用的光电探测器之一。

激光探测与测量

激光探测与测量（LiDAR，Light Detection And Ranging）是一种激光扫描技术，该技术集成激光测距技术、计算机技术、惯性测量单元等技术于一体，是三维空间信息实时获取的重要手段之一[5]。LiDAR 主要基于飞行时间技术（TOF，Time of Flight），对探测器的时间性能和探测效率提出极高要求，SiPM 是少数能够满足该领域要求的探测器之一。

资料整理 by
上海恩弼科技有限公司
www.nbfamily.com