

# 提高 PMT 光子计数系统 探测灵敏度的方法

王挺峰

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 光电倍增管 (PMT) 光子计数是光子计数技术的一种, 通过选择合适的低噪声光电倍增管, 并对光电倍增管的光阴极和前几级倍增极进行致冷, 以及合理地设计光电倍增管的高压偏置电路和设定后续甄别器的鉴别阈值, 可以使 PMT 光子计数系统对弱光的探测灵敏度达到甚至优于  $10^{-17}$  W。文中阐述了 PMT 光子计数的原理及系统组成, 并对提高系统探测灵敏度的技术环节进行了分析。

**关键词:** 探测灵敏度; 偏置电路; 甄别器; 致冷; 光电倍增管; 光子计数

**中图分类号:** TN152

**文献标识码:** A

## Method of Improving the Detectability of Photon Counting System Based on PMT

WANG Ting-feng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science,  
Changchun 130033, China)

**Abstract:** PMT was one of the single-photon detectors used in photon counting systems. By choosing the appropriate PMT with low noise, cooling for PMT, designing reasonably the high voltage offset circuit of PMT, and setting appropriate threshold of discriminator, the detectability of photon counting system could be improved. The principle and component of photon counting system were expatiated on, and the key technology of improving the detectability of photon counting system was presented.

**Keywords:** detectability; offset circuit; discriminator; cooling; PMT; photon counting

## 1 引言

光子计数技术是一种依据光的量子性专为测量

微弱光信号而产生的检测方法, 光子计数技术的基础是单光子探测器。光电倍增管 (PMT) 是一种基于外光电效应采用二次发射倍增系统的真空光电探

测器件,它具有高电流放大和高信噪比特性,能输出适合光子计数用的离散脉冲信号,是光子计数很早就采用的一种典型探测器<sup>[1]</sup>。PMT 光子计数系统由光电倍增管、前置放大器、脉冲甄别器和脉冲计数器等组成。通过选择合适的低噪声光电倍增管,并对光电倍增管的光阴极和前几级倍增极进行致冷,以及合理地设计光电倍增管的高压偏置电路和设定甄别器的鉴别阈值,可以使 PMT 光子计数系统对弱光的探测灵敏度达到甚至优于  $10^{-17}$  W。PMT 光子计数技术现已广泛应用于天文测光、大气测污、分子生物学、超高分辨率光谱学和非线性光学等领域。

## 2 PMT 光子计数原理及系统组成

### 2.1 光电倍增管的单光子探测依据

光具有波粒二重性。爱因斯坦在普朗克黑体辐射量子论基础上提出了光的粒子性学说,他指出:辐射的能量在空间的分布是不连续的,而且辐射的能量也是量子化的,从而提出了光子假说<sup>[2]</sup>。

(1) 光能(或辐射能)有一最小单位,即光子或光子。光子是一种单模(即单一波长、方向和偏振)量子,单个光子的能量  $E_p$  与光波频率  $\nu$  的关系是:

$$E_p = h\nu \quad (1)$$

式中,  $h=6.6 \times 10^{-34}$  J·S, 称普朗克常数;光波频率  $\nu=c/\lambda$ , 单位为 Hz;  $c$  为光速,  $\lambda$  为光的波长。光子能量也可以用电子伏(eV)的单位表示,  $1 \text{ eV}=1.602 \times 10^{-19}$  J, 则

$$E_p = \frac{hc}{\lambda q} \quad (\text{eV}) \quad (2)$$

式中,  $q$  是电子电荷, 为  $1.602 \times 10^{-19}$  C。

(2) 光(或辐射)是一束以光速传播的光子流,其功率  $P$  取决于单位时间内发射的光子数或光子速率  $R$ , 即

$$P = RE_p \quad (\text{W}) \quad (3)$$

当入射光强很低,以至于入射光表现为图 1 中所示的离散脉冲序列时,这种状态称为单光子状态,此时光电倍增管输出的也是如图 1 中所示的脉冲信号,并且脉冲个数与入射的光子成正比。

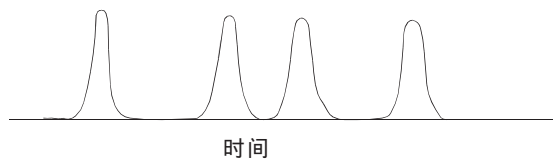


图1 微弱光条件下光电倍增管的输出信号(单光子事件)

由于在单光子状态下光子流量与这些电脉冲的个数成正比,因此,只要用计数的方法测出单位时间内的光电子脉冲数,就相当于检测了光的强度。这就是光电倍增管用于单光子探测的依据。

### 2.2 PMT 光子计数系统的组成

PMT 光子计数系统的组成如图 2 所示,主要由光电倍增管、放大器、甄别器和计数器组成。其工作机理是:含有多个光子的光子流照射到光电倍增管的光阴极上后,光电倍增管会输出一系列经过多级倍增放大的电流脉冲,光电倍增管输出的电流脉冲由光信号脉冲和暗电流脉冲组成;这些电流脉冲经光电倍增管的外围输出电路以及前置放大器放大后,将转换形成一系列幅值高低不同的电压脉冲,这些幅值高低不同的电压脉冲将成为脉冲高度甄别器的输入信号;脉冲高度甄别器对输入脉冲进行光信号和噪声鉴定,甄别器中的鉴别阈值的设定依据是光电倍增管输出信号的脉冲高度分布(PHD);脉冲计数器对甄别器鉴定出的光信号脉冲进行计数;最后依据公式(3),根据测得的计数值就能测量出信号的功率。

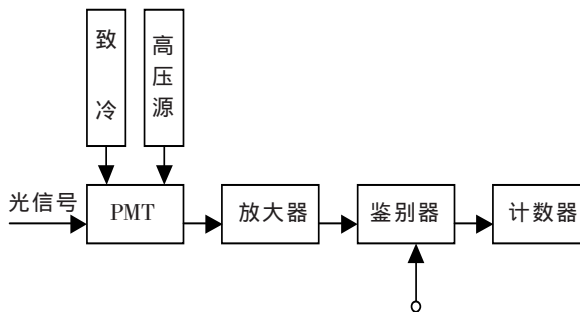


图2 PMT 光子计数系统组成示意图

### 3 提高 PMT 光子计数系统探测灵敏度的主要技术环节

光电倍增管是 PMT 光子计数的基础, 光电倍增管的噪声决定着探测系统的极限探测能力。因此, 对于提高光子计数系统探测灵敏度来说, 关键就在于如何降低光电倍增管的噪声。在选定一个合适的低噪声光电倍增管后, 通过对光电倍增管进行致冷, 以及合理地设计光电倍增管的高压偏置电路与设定甄别器的鉴别阈值, 还可以进一步降低噪声。

#### 3.1 光电倍增管

光电倍增管的噪声取决于很多因素, 除了与其自身结构有关外, 还与其所处的环境温度及高压偏置电路的设计有关。

##### 3.1.1 光电倍增管的选取

光电倍增管由光阴极、聚焦电极、电子倍增极和阳极构成。性能优良的光电倍增管, 其光阴极的稳定性好, 光谱响应特性好, 工作波段范围内的量子效率高, 暗计数率低, 时间响应快。光电倍增管的主要特性参数如下:

1) 量子效率。量子效率定义为一个入射光子产生光电子的概率, 或光阴极发射的光电子数与入射光子数的比值。光电倍增管的量子效率与光子能量、窗口及光阴极材料的特性有关。

2) 电流增益。电流增益就是光电倍增管的阳极输出电流与阴极光电子电流的比值。电流增益与管内倍增系统的结构有关。

3) 光谱响应特性。光谱响应特性即光阴极灵敏度与入射光波长之间的关系。光谱响应特性的长波端取决于光阴极材料, 短波端则取决于入射窗材料。

4) 暗电流。暗电流即入射光强为零时的输出电流。暗电流主要来自热电子, 特别是来自光阴极的热电子, 其它来源还有残留气体电离 (离子反馈)、玻璃发光、漏电电流与场致发射等。

5) 时间特性。光电倍增管的时间特性取决于管内光电子的渡越时间与渡越时间离散。时间特性包

括脉冲上升时间和脉冲响应时间。脉冲上升时间即脉冲幅度从 10% 上升到 90% 所需的时间; 脉冲响应时间即脉冲幅值为 50% 的两点之间的时间间隔。

6) 脉冲高度分布 (PHD)。脉冲高度分布即光电倍增管噪声脉冲与信号脉冲的幅度关系。光电倍增管各级倍增极热电子发射的脉冲高度小于光信号的脉冲高度, 脉冲数很多; 光阴极的热电子发射及反馈光子激发产生的脉冲高度等于光信号的脉冲高度, 脉冲数很少; 宇宙射线激发输出的脉冲高度大于光信号的脉冲高度, 脉冲数很少。典型光电倍增管输出信号的脉冲高度分布如图 3 所示<sup>[1]</sup>。

在选择光电倍增管时, 需要综合考虑以下各项特性参数:

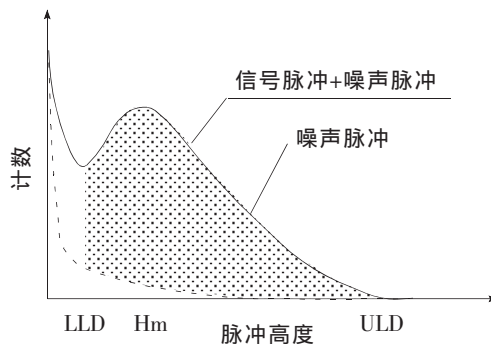


图 3 典型 PMT 的脉冲高度分布

1) 脉冲上升时间与脉冲响应宽度。光电倍增管的脉冲上升时间一般应  $< 3.5 \text{ ns}$ , 脉冲响应宽度应为  $10 \sim 30 \text{ ns}$ , 这样可以有效地抑制脉冲堆积效应。

2) 量子效率。量子效率影响光子计数的信噪比和最小可检测的光子数, 光电倍增管的量子效率越高越好。

3) 增益系数。增益系数直接影响脉冲振幅, 用于光子计数的光电倍增管的增益系数  $G$  一般要  $> 5 \times 10^6$ 。

4) 暗计数。暗计数也影响光子计数的信噪比与最小可检测光子数, 光电倍增管的暗计数越小越好。

5) 脉冲高度分布。PHD 中清晰的波峰和波谷是用于光子计数的光电倍增管的一项重要特性。光电倍增管的 PHD 要具备明显的单光子峰, 有利于最佳甄别电平的选择。

光电倍增管种类繁多, 不同类型光电倍增管的各项特性参数也不相同, 因此简单比较很难进行选择。依据光阴极材料的光谱匹配系数大小来选择光电倍增管是一种有效的方法。

光谱匹配系数表征了各种光谱响应的光阴极对不同的辐射源的光谱利用率的高低。光谱匹配系数  $M$  的一般表达式为:

$$M = \frac{\int_0^\infty w(\lambda)R(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty w(\lambda)d\lambda} \quad (4)$$

式中,  $w(\lambda)$  为光谱辐射特性, 它是关于波长的归一化函数;  $R(\lambda)$  为光阴极光谱响应, 它也是关于波长的归一化函数。如果入射到光电倍增管的光谱分布受到滤波器或其它光学设备的修正, 则匹配系数  $M$  为:

$$M = \frac{\int_0^\infty w(\lambda)R(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty w(\lambda)f(\lambda)d\lambda} \quad (5)$$

式中,  $f(\lambda)$  为滤波器或光学设备的透射率。

$M$  的取值介于 0~1 之间,  $M$  值越大, 表明匹配越好,  $M$  值越小, 匹配越差。不同光源和光阴极材料的光谱匹配系数可查阅相关手册得到。

依据光谱匹配系数, 光电倍增管光阴极的电流表达式为:

$$I_k = \sigma PM \quad (6)$$

式中,  $\sigma$  为光阴极辐射灵敏度, 单位 A/W;  $P$  为光源的平均功率。对任何应用的光电倍增管而言, 拥有得到最大光阴极电流的光谱响应是最理想的。

依据光谱匹配选择光电倍增管的步骤是: 首先根据 (6) 式计算出可供选择的光阴极材料的光电流, 然后根据给出的各种光阴极材料的暗电流参数, 计算出相应光阴极材料的信噪比, 再综合比较, 信噪比最大的光阴极材料即可选择为光电倍增管的最佳光阴极材料。最后再考虑上述其它特性参数, 就可以选择出具有最佳性能的光电倍增管。

### 3.1.2 光电倍增管的致冷

光电倍增管的暗计数主要来自光阴极和最初几个倍增极的热电子发射。采用致冷技术降低管子的环境温度, 可以进一步降低光电倍增管的噪声以及

提高性能稳定性。在光子计数中, 光阴极发射的热电子对暗计数的影响最重要。光阴极的暗电流的大小由理查逊 (Richardson) 方程决定<sup>[1]</sup>:

$$i_r = \alpha A T^2 \exp\left(-\frac{E\varphi}{KBT}\right) \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  为由光阴极材料决定的比例系数, 对纯金属, 其值为  $1.2 \times 10^6 \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$ ;  $A$  为光阴极的面积 ( $\text{m}^2$ );  $T$  为光阴极的温度 (K);  $E\varphi$  为光阴极的功函数 (eV);  $KB$  为玻耳兹曼常数。

根据上式, 理论上, 平均每降低  $3.3^\circ\text{C}$ , 暗计数可降低 1 倍。例如, R2949 型光电倍增管, 在室温下的暗计数率约为 200 cps, 用半导体冷却器冷却到  $-20^\circ\text{C}$  时, 暗计数可降至 2~6 cps。因此, 对光电倍增管的光阴极进行冷却可以有效地降低暗计数。

用于光电倍增管冷却的方法有很多种, 推荐采用半导体致冷<sup>[2]</sup>。半导体致冷是通过空穴和电子在运动中直接传递热量的一种固体致冷方式。它在技术应用上具有以下优点:

1) 不需要任何致冷剂, 可连续工作, 没有污染源, 不会产生回转效应, 没有滑动部件, 工作时没有震动、噪音, 寿命长, 安装容易。

2) 半导体致冷器是电流换能型器件, 通过输入电流的控制, 可实现高精度的温度控制, 再加上温度检测和控制手段, 很容易实现遥控、程控、计算机控制, 便于组成自动控制系统。

3) 半导体致冷器热惯性非常小, 致冷致热时间很快, 在热端散热良好、冷端空载的情况下, 通电不到 1 min, 致冷器就能达到最大温差。

### 3.1.3 光电倍增管高压偏置电路的设计

光电倍增管高压偏置电路的设计在于为各电极提供必要而稳定的电压分布, 以得到稳定的倍增总增益和输出具有最大信噪比与窄脉冲宽度的输出信号。高压偏置电路的设计要点在于分压器和电路接地的设计以及最佳偏置电压的选取。

#### (1) 分压器设计

光电倍增管光阴极和阳极之间的供电电压在千伏量级, 为了在光阴极、聚焦极、倍增极和阳极之



间分配一定的极间电压,通常采用电阻分压器方式进行电压分割,若需要满足光阴极和第一倍增极之间以及末级倍增极和阳极之间的电压的稳定性,还会采用齐纳二极管来代替分压器中的部分电阻以保证电压恒定,如图4所示<sup>[3]</sup>。在设计分压器时,为了得到最佳的极间电压分配,需要综合考虑3方面因素:阳极峰值电流、允许的电压波动以及允许的非线性偏离。分压器的基本设计原则如下:

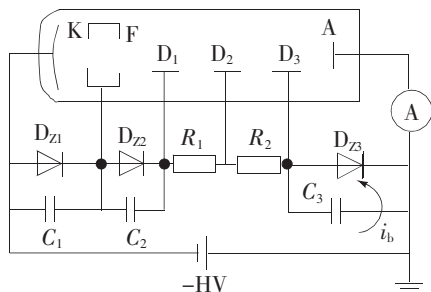


图4 光电倍增管的分压电路（电阻和齐纳管分压）

1) 极间电压的分配。光电倍增管的极间电压可按前级区、中间级区和末级区3区加以考虑。对于前级区,收集电压必须足够高,以使第一倍增极有高的收集效率和大的次级发射系数。中间级区的各级间通常具有均匀分布的极间电压,以使管子给出最佳的增益。由于末级区各级特别是末级支取较大的电流,所以末级区各级间电压不能过低,以免形成空间电荷效应而使管子失去应有的直线性。

2) 分压器电流的选取。当阳极电流增大到与分压器电流相比拟时,将会导致末级区各级间电压大幅度下降,从而使光电倍增管出现严重的非线性。为防止极间电压的再分配以保证增益稳定,分压器电流至少为最大阳极平均电流的20倍。在光子计数系统中,阳极电流最大值在10 mA量级,为减少因分压器上功率损耗发热而产生的对光电倍增管热电子发射的影响,分压电阻中的偏置电流一般控制在200 mA以内。

3) 分压器电阻的选取。确定了分压器电流,就可以根据光电倍增管的工作电压算出分压器的总电

阻,再按照适当的极间电压分配比,由总电阻求出各分压电阻的阻值。每一级的分压电阻可由分压器总电阻和特定的光电倍增管的极间电压分配比求得。分压器每一级的分压电阻一般在20 kΩ~5 MΩ。如果每级电阻过小,则电阻消耗的功率就很大。为防止过热的功耗,电阻的功率还应至少为安全界限值的2倍。

## (2) 偏置电路的接地

光电倍增管的接地方式有两种:负高压接法和正高压接法<sup>[4]</sup>。负高压接法是将光电倍增管的阴极接电源负高压,电源正端接地,又称阳极接地法。阳极接地时,阴极处于负高电位。这种方式的优点是消除了光电倍增管外部信号输出电路与阳极之间的电位差,便于与后面的前置放大器连接。缺点是在屏蔽罩和光阴极、第一倍增极之间可能存在漏电流,使得输出噪声比较大。正高压接法是光电倍增管的阳极接电源正高压,电源负端接地,又称阴极接地法。阴极接地时,阳极处于正高电位。这种方式的优点是屏蔽效果好,暗电流小,噪声水平低。缺点是当输出交流信号时,需要采用一个耐高压、噪声小的隔直电容将正高压与后续电路分隔开,由于增加了存在较大寄生电容和电感的高压电容等附加元件,阳极的杂散电容会显著增大,因此会对高频电脉冲信号的传输产生影响。

光子计数技术的测量对象是功率很小的微弱光,光电倍增管输出信号的频率不是很高,因此,光子计数中光电倍增管偏置电路的接地要采用正高压接法。

## (3) 最佳偏置电压的选取

光电倍增管的工作偏置电压对信号电流的增益和非线性有很大的影响。一般地,偏置电压愈高,信号增益越大,同时非线性也越强。当偏置电压进一步提高时,信号电流就会逐渐饱和,而暗电流则随电压的升高而迅速增大。光电倍增管的暗电流随偏压增大而增大,会导致信噪比降低。为了使光电倍增管有较高的工作灵敏度,又不致受噪声的影响

太大, 需要精心选择光电倍增管的最佳偏置电压。光电倍增管最佳偏置电压的选取依据是 PMT 的信号计数、暗计数和偏置电压的关系曲线。如图 5 所示, 由于信号计数曲线有一平坦区, 而暗计数曲线则一直处于不断上升的趋势, 因此在信号计数曲线开始进入平坦区时, 信噪比最大, 此处的偏压即光电倍增管的最佳偏置电压。

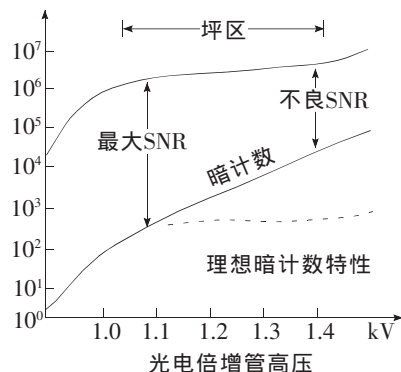


图 5 光电倍增管最佳偏压选择

### 3.2 脉冲高度甄别器

选择脉冲高度甄别器的依据是图 4 中所示的光电倍增管输出脉冲的脉冲高度分布。在图 4 中, 低脉冲高度基准 (LLD) 在波谷的位置, 而高脉冲高度基准 (ULD) 是在输出脉冲较少的底部。绝大部分低于 LLD 的脉冲来自热噪声, 同时绝大部分高于 ULD 的脉冲来源于宇宙射线等外界因素。这样, 通过 LLD 和 ULD 值对脉冲进行甄别, 不仅能剔除倍增极系统的热电子噪声脉冲和放大器噪声脉冲等低幅度噪声脉冲, 还能剔除正离子和宇宙射线造成的器壁荧光等高幅度噪声脉冲, 从而去除绝大多数噪声脉冲, 而只将光阴极发射的光电子脉冲和热电子脉冲转换为标准脉冲输出, 降低光电倍增管的暗计

数, 提高探测系统的信噪比。

脉冲高度甄别器应采用工作于窗口方式下的双阈值脉冲高度甄别器。甄别器要设置两个甄别电平, 即等于 LLD 的阈值  $V_1$  和等于 ULD 的阈值  $V_2$ 。输入脉冲的幅度只有在大于  $V_1$  小于  $V_2$  时, 甄别器才有标准脉冲输出用于计数。为满足光子计数需要, 双阈值脉冲高度甄别器的工作电路应满足如下要求:

1) 要有灵活可调的甄别电平范围。两个甄别电平要能够调节, 以适应光波波长、PMT 增益和环境温度的改变。一般要求最小甄别电平为 50~100 mV, 电平可调范围上限是下限的 10~50 倍, 同时要求足够稳定。

2) 死区时间短。死区时间是指当有一脉冲触发了甄别器中的线路以后, 在它恢复原状以前甄别器不能接受后续脉冲的这段时间。死区时间越短, 甄别器的响应越快, 性能越好。用于光子计数的甄别器的死区时间要求  $<10$  ns。

3) 能输出满足后续脉冲计数电路所需要的脉冲输出幅度和宽度。

## 4 结束语

光电倍增管是 PMT 光子计数系统的基础, PMT 光子计数系统的探测灵敏度主要取决于所选光电倍增管的性能。在利用光阴极光谱匹配法选择合适的低噪声光电倍增管后, 再采用对光电倍增管的光阴极和前几级倍增极进行致冷, 合理地设计光电倍增管高压偏置电路中的分压器、接地和设置最佳偏置电压以及合理地设定甄别器的鉴别阈值等措施, 还可以进一步甚至大幅度提高 PMT 光子计数系统的探测灵敏度。

## 参考文献

- [1] 光电倍增管简介及使用特性. 电子零件城.
- [2] 何丽玲, 张秋佳. 用于单光子计数系统的冷却器的研究 [J]. 哈尔滨商业大学学报, 2006, 22(2):105-108.
- [3] 安毓英, 曾晓东. 光电探测原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [4] 曾永庆. 微弱信号检测 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1986.