

# 光子计数用光电倍增管的外围工作电路

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:** 光电倍增管是光子计数系统经常采用的一种典型探测器, 是整个光子计数系统的基础。光子计数系统中光电倍增管的外围工作电路设计得是否合理, 对光子计数系统的性能有很大影响。文中介绍了光电倍增管常采用的一些工作电路, 分析了这些工作电路的特点, 并给出了适合光子计数用光电倍增管的外围工作电路。

**关键词:** 偏置电路; 输出电路; 工作电路; 光电倍增管; 光子计数

**中图分类号:** TN152

## Working Circuit of PMT in Photon Counting Systems

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, Which was the basis of the photon counting. The design of the working circuit of PMT in photon counting system affected the detectability of photon counting system. Some working circuits used in PMT was introduced, and the working circuit of PMT applied to photon counting systems was presented by analyzing the characteristics of the circuits.

**Keywords:** offset circuit, output circuit, working circuit, PMT, photon counting

## 1 引 言

光子计数技术是一种依据光的量子性专门用于

微弱光信号测量的新技术。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, 具有高电流放大和高信噪比特性,

\*基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助 (Supported by CAS Innovation Program)

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>。光电倍增管由光阴极、聚焦电极、电子倍增极和阳极构成。光电倍增管的性能主要由光阴极和倍增极以及极间电压决定,为使光电倍增管能正常工作,需要有正确的外围工作电路。光电倍增管的外围工作电路主要由高压偏置电路和信号输出电路组成。光子计数系统中光电倍增管的外围工作电路设计得是否合理,对光子计数系统的性能有很大影响。本文对光电倍增管外围工作电路的设计进行了研究。

## 2 光电倍增管的高压偏置电路

光电倍增管由光阴极、聚焦电极、电子倍增极和阳极构成。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和窄脉冲宽度的输出信号<sup>[2]</sup>。

### 2.1 偏置电路的分压

光电倍增管光阴极和阳极之间的供电电压在千伏量级,通常采用电阻分压器方式在光阴极、聚焦极、倍增极和阳极之间分配一定的极间电压,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时,还要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1所示。当阳极需要输出大电流时,为了维持倍增极电势的稳定并获得高的峰值电流,在分压电路中还需将大容量电容与后几级分压电阻并联。电容值取决于输出电荷量的大小,如果要获得输出电流与

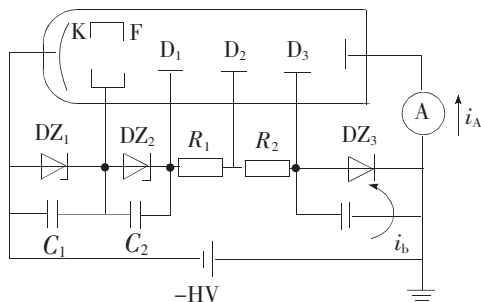


图1 光电倍增管的分压电路（电阻和齐纳管分压）

入射光之间高于1%的线性度,其电容值应至少是每个脉冲电荷量的100倍,即

$$C > 100 \frac{It}{V} \quad (1)$$

式中,  $I$  为峰值输出电流, 单位 A;  $t$  为脉冲宽度, 单位 s;  $V$  为电容上电压值, 单位 V。

在某些特殊场合, 如当阳极需要输出高幅值脉冲时, 如果极间电压保持不变, 随着入射光的增加就会出现输出饱和现象, 这是由于电极间的电子密度扰乱了电子流的空间电荷效应而产生的。若要矫正空间电荷效应, 则加在后几级的电压应比标准电压分布设置得高些, 从而使电压梯度得到改善。为此, 需要使用所谓的“锥形”分压器, 如图2所示, 相对于等分分压器, 它可将输出线性度提高5~10倍。

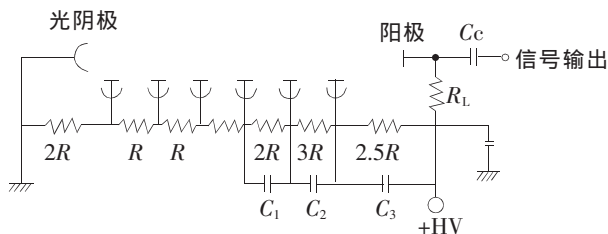


图2 锥形分压电路

总之, 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:

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, 因而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相比拟时, 将会导致末级区各级间电压的大幅

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。对于直线性要求很高的应用场合,分压器电流应至少为最大阳极平均电流的100~500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对光电倍增管热电子发射的影响,分压电阻中的偏置电流应控制在200 mA以内。

3.分压电阻的选取。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 k $\Omega$ ~5 M $\Omega$ 。如果每级电阻过小,则电阻消耗的功率会很大。为防止过热的功耗,电阻的功率还应至少是安全界限值的2倍。

## 2.2 偏置电路的接地

光电倍增管的接地有两种方式:负高压接法和正高压接法<sup>[3]</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:当光电倍增管放入接地的屏蔽罩后,在屏蔽罩和光阴极、第一倍增极之间存在很高的电位梯度,造成它们之间的漏电流。漏电流流经管脚玻璃时可能出现荧光,它照射光阴极而产生附加的光电子计数脉冲,使得噪声比较大,这对光子计数器来讲是不允许的。解决的办法是在光电倍增管和接地屏蔽罩之间设置另一层屏蔽,此屏蔽通过耐高压的高阻值电阻与阴极连接,从而消除管壁的漏电流。该方法可用于交流或直流输出信号,最适宜于直流信号。

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。采用这种方法可以使屏蔽光、磁、电的屏蔽罩与管子外壳直接相连,屏蔽效果好,暗电流小,噪声水平低。但由于阳极处于高压,会导致寄生电容增大。当输出直流信号时,不仅要求传输电缆的耐压性能高,而且后级的直流放大器也要处于高电压,因而会产生一系列的问题,所以该方法只适用于交流或脉冲信号应用。当输出交流信号时,还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。这种方法的优点是不会产生上述的漏电流和附加脉冲。缺点是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。

光子计数技术测量的对象是功率很小的微弱光,因而光电倍增管输出信号的频率不是很高。在光子计数系统中,为了避免产生额外噪声,光电倍增管偏置电路的接地要采用正高压接法。

## 2.3 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。一般来说,偏置电压越高,信号增益越大,同时非线性也越强。非线性增强是由于高偏压工作时离子或反馈光会产生电脉冲。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。暗电流增大是因为倍增极形状不规则引起尖端放电而产生的。

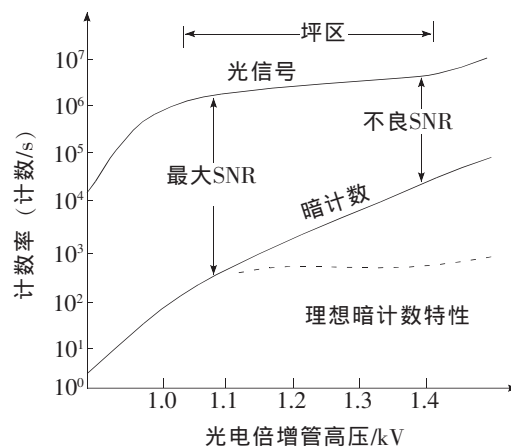


图3 光电倍增管最佳偏置选择

光电倍增管的暗电流随偏压增大而增大,从而导致信噪比降低。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选取的依据是 PMT 的信号计数、暗计数和偏置电压的关系曲线。如图 3 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,此处的偏压即最佳偏置电压。

### 3 光电倍增管的信号输出电路

光电倍增管可采用的信号输出电路有两种:一种是负载电阻输出方式;另一种是运算放大器输出方式。

#### 3.1 负载电阻输出电路

负载电阻输出电路如图 4 所示。光电倍增管通常可看作是一个恒流源,电流脉冲通过对负载电阻和杂散电容组成的  $R_L C_s$  电路进行充电,将电流信号转换成电压信号,得到的阳极输出电压脉冲信号再与一个前置放大器相连,经放大器放大后再输出。

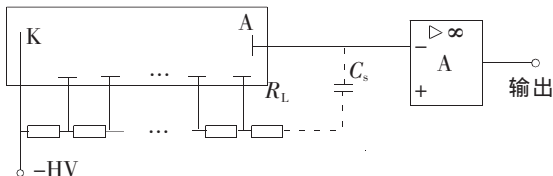


图 4 光电倍增管的负载电阻输出电路

光电倍增管的输出电流很小,因此,一般认为可以选取任意大的负载电阻,从而从一个较低的电流信号得到一个很高的电压信号。但实际上,负载电阻的选取受多方面因素的限制。

如图 4 所示,设负载电阻为  $R_L$ ,光电倍增管阳极和其它电极之间的静电电容量以及由于布线等引起的杂散电容量的总和为  $C_s$ ,则光电倍增管输出线路的上限截止频率  $f_c$  为:

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_s R_L} \quad (2)$$

由上式可以看出,即使光电倍增管和后面的放大器有极快的响应速度,实际的最高响应频率仍将受到输出线路上限截止频率  $f_c$  的限制。若负载电阻过大,受上限截止频率的限制,当电子速率升高时,很容易导致阳极输出电压脉冲的堆积,从而导致光电倍增管输出的非线性。

另一方面,当光照比较强时,在较高输出电流情况下,输出阳极电流在大负载  $R_L$  上会产生较大的压降,使得阳极和末级倍增极之间的电压下降,这样就可能会出现明显的空间电荷效应,同时也降低了阳极的电子收集率,最后可能会因输出信号饱和而引起光电倍增管输出的非线性。

再者,前置放大器的输入阻抗对光电倍增管负载电阻的选取还有影响。假定负载电阻和放大器的输入阻抗都是纯电阻性的,设前置放大器的输入阻抗为  $R_{in}$ ,则它与负载电阻  $R_L$  并联后,光电倍增管的有效负载阻抗  $R_0$  为:

$$R_0 = \frac{R_L \cdot R_{in}}{R_L + R_{in}} \quad (3)$$

显然,负载电阻的阻值还受到放大器输入阻抗的限制。

综上所述,在选取光电倍增管负载电阻时,需要注意以下几点:

1. 在频率响应要求比较高的场合,负载电阻应尽可能小一些;
2. 当输出信号的线性要求较高时,选择的负载电阻应使信号电流在它上面产生的压降在几伏以下;
3. 负载电阻应比放大器的输入阻抗小很多。

当后续回路(信号接收端)与连接电缆的特性阻抗匹配时,阻抗与电缆的长度无关,是电缆的特性阻抗,此时,光电倍增管的传输波形不会失真。当后续回路与连接电缆的特性阻抗不匹配时,光电倍增管的输出脉冲能量将不能被完全接收,一部分反射到光电倍增管,如果光电倍增管的电缆一端匹配,则这种反射的能量会被接收;如果不匹配,光电倍增管是开放的,这种反射能量再次反射给后续端,也就是说,一部分脉冲在电缆中往复后,再被

输入给后续端, 这个被反射的信号与主脉冲相比延迟, 这样在主脉冲后就会显示一个振荡脉冲, 从而导致波形失真, 这称为振荡现象。为了防止发生这种现象, 首先要在后续端准确地实施匹配, 同时, 光电倍增管端也应加一个与电缆阻抗相匹配的电阻。这样, 反射脉冲的影响即可消除。其代价是, 光电倍增管的输出脉冲幅度要减小一半。如图 5 所示, 在检测高速脉冲光信号时, 通常使用图中的具有  $50\ \Omega$  或  $75\ \Omega$  特性阻抗的同轴电缆来连接光电倍增管和后续电路<sup>[1]</sup>。

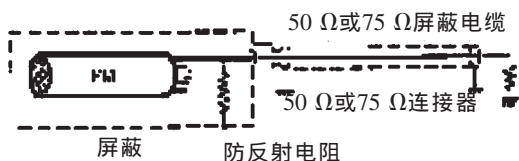


图 5 防振荡现象的输出线路的典型连接

负载电阻输出电路可用于各种测量场合, 目前, 光子计数系统中光电倍增管的外围工作电路主要采用这种方式。

### 3.2 运算放大器输出电路

从上文的负载电阻输出电路中可以看出, 要保证光电倍增管具有良好的线性和频率响应特性, 负载电阻取值要小, 这就使得输出信号的转换效率很低。如果用运算放大器来代替负载电阻实现电流-电压转换, 就能解决上述问题。采用运算放大器代替负载电阻的输出电路如图 6 所示<sup>[2]</sup>, 光电倍增管输出的电流全部进入放大器的反相输入端, 绝大部分的电流将会流过  $R_f$ , 然后流出前置放大器的输出端, 则运算放大器的输出电压  $V_0$  有下列关系:

$$V_0 = -R_f \cdot i_A \quad (4)$$

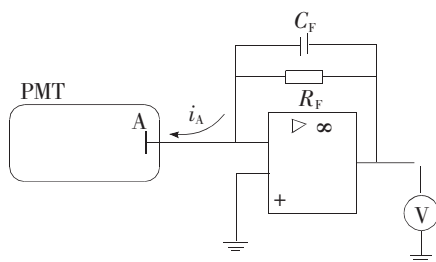


图 6 运算放大器输出电路

式中,  $R_f$  为运算放大器的反馈电阻;  $i_A$  为光电流。

实际输出电路的最小可测量电流往往受到放大器的偏置电流、温度漂移、反馈电阻  $R_f$  的质量和电路板的绝缘性能等因素的制约。普通运算放大器往往有几十纳安的偏置电流, 因此流过反馈电阻的电流由光电流  $i_A$  和放大器的偏置电流  $i_{os}$  组成。如果考虑前置放大器的输入偏置电流  $i_{os}$ , 将其叠加进输入电流中, 则运算放大器的输出电压变为:

$$V_0 = -R_f \cdot (i_A + i_{os}) \quad (5)$$

实际上, 最大输出电压大约等于前置放大器的工作电压。

放大器等效的输入阻抗, 即光电倍增管的等效负载为:

$$R_0 \approx \frac{R_f}{A} \quad (6)$$

式中,  $A$  为运算放大器的开环增益。运算放大器的开环增益很高, 一般高达  $10^5 \sim 10^8$ , 因此等效阻抗  $R_0$  很小。

运算放大输出电路的频率响应特性与该电路的时间常数有关。如图 6 所示, 设与反馈电阻  $R_f$  并联的电容为  $C_f$  (包括反馈电阻及线路的各种杂散电容), 则放大电路的时间常数为  $R_f C_f$ 。由于反馈电阻  $R_f$  的值通常很大, 因此该电路的时间常数也很大, 这就使得运算放大器输出电路的上限截止频率不是很高。因而运算放大器输出电路只适宜在低频信号测量时使用, 而且由于与反馈电阻并联的电容  $C_f$  可以减少信号中的高频噪声, 还可以改善信噪比。

## 4 结束语

光电倍增管是光子计数系统的基础, 光电倍增管外围工作电路设计得是否合理, 对光子计数系统的性能影响很大。光电倍增管的外围工作电路主要由高压偏置电路和信号输出电路组成。在光子计数系统中, 偏置电路通常采用等分分压器结构就能满足各电极间的极间电压分配, 在一些特殊场合, 需要采用“锥形”分压器结构; 偏置电路的接地要采用正高压接法, 即阴极接地; 最佳偏置电压需要根



据光电倍增管的信号计数、暗计数和偏置电压的关系曲线来进行选择;信号输出电路采用负载电阻输

出方式即可,由于测量对象是微弱光信号,因而能够保证整个测量电路的频率匹配。

## 参考文献

- [1] 光电倍增管简介及使用特性.电子零件城.
- [2] 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.
- [3] 曾永庆.微弱信号检测 [M]. 杭州: 浙江大学出版社,1986.

## 长春光机所获批承担光栅领域国家重大科研装备研制项目

日前,由国家光栅制造与应用工程技术研究中心申请的国家重大科研装备研制项目“大型高精度衍射光栅刻划系统”获得财政部批准,获支持经费超过1亿元。

光栅制造技术是一种超精密加工技术,光栅刻划机被称为“精密机械之王”,要达到大刻划面积和高刻划精度标准,必须要有一流的精密机械加工、精密光学加工、精密自动控制和恒温隔震技术作为前提。由于我国机械制造领域技术能力与国外存在较大差距,我国至今没有高精度大尺寸光栅的制造能力,难以满足我国光谱仪器行业、大科学工程和军事应用的特殊需求。

本项目在我国长期技术积累、关键技术获得突破的基础上,依托中科院长春光机所,联合国内相关技术力量研制具有自主知识产权的大型高精度衍射光栅刻划系统。该系统利用首创的三层台结构、承重兼导向的一体式石英刀架导轨、支撑丝杠的主副螺母结构和金刚石刀具的中途连续切换技术,实现连续运行与间歇刻划相结合的独特工作方式,保证高精度大尺寸光栅的刻划。

通过“大型高精度衍射光栅刻划系统”项目的实施,我国有望建成总体实力和影响力与法国Jobin-Yvon公司、美国Newport公司相当的光栅研究和生产基地,从而满足我国战略高技术以及高水平科学仪器发展需求,打破美国等发达国家对高精度大尺寸光栅的垄断。