

# 光电倍增管特性与微弱光信号探测

## 一、引言

光电倍增管是一种将微弱光信号转换成电信号的[真空电子器件](#)。主要用在光学测量仪器和光谱分析仪器中。它能在低能级光度学和光谱学方面测量[波长](#) 200-1200 纳米的极微弱[辐射功率](#)。目前已经被广泛地应用在冶金、电子、机械、化工、地质、医疗、核工业、天文和宇宙空间研究等领域。

## 二、实验目的

- 1、熟悉光电倍增管的基本构成和工作原理
- 2、掌握光电倍增管基本参数的测量方法
- 3、学会正确使用光电倍增管

## 三、实验原理

### 1. 光电倍增管结构及工作原理

光电倍增管是一种真空管，它由光窗、光电阴极、电子光学系统、电子倍增系统和阳极五个主要部分组成。

电子倍增系统：

为使光电倍增管正常工作，光电倍增管中阴极（K）和阳极（A）之间分布有多个电子倍增极  $D_n$ 。如图 2 所示，在管外的阴极（K）和各个倍增极及阳极（A）引脚之间串联多个电阻  $R_n$ ，由  $R_n$  形成的分压电阻使各个倍增极相对阴极而言加上了逐步升高的正电压，要在阴极（K）和阳极（A）之间加上 500~3000V 左右的高电压，目的是吸引并加速从阴极飞出的光电子，并使他们飞向阳极。

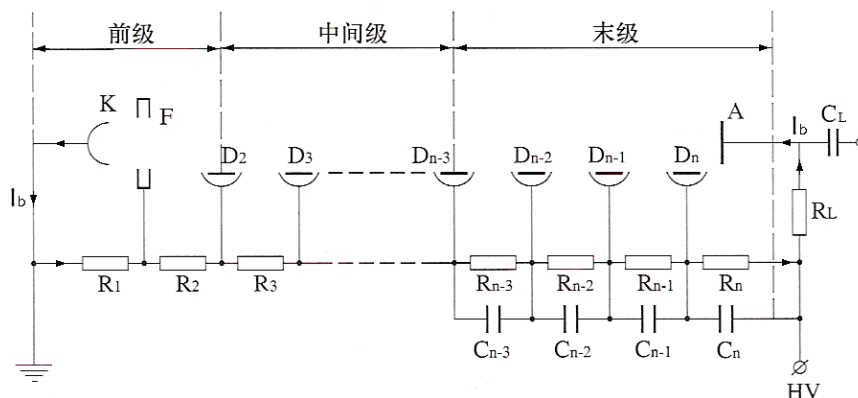


图 1

图 1 中回路电流  $I_b$  是流过分压器回路的电流，被叫做分压器电流，它和后面叙述的输出线性有很大的关系。 $I_b$  可近似用工作电压  $V$  除以分压电阻之和的值来表示。

光电倍增管的输出电流主要是来自于最后几级，为了在探测脉冲光时，不使阳极脉动电流引起极间电压发生大的变化，常在最后几级的分压电阻上并联电容。图中和电阻并联的电容  $C_{n-3}$ 、 $C_{n-2}$ 、 $C_{n-1}$ 、 $C_n$  就是因此而设计的。

本实验系统使用的电子倍增系统为环形聚焦型。由光阴极发射出来的光电子被第一倍增极电压加速撞击到第一倍增极，以致发生二次电子发射，产生多于入射光电子数目的电子流。这些二次电子发射的电子流又被下一个倍增极电压加速撞击到下一个倍增极，结果产生又一次的二次电子发射，连续地重复这一过程，直到最末倍增极的二次电子发射被阳极收集，光电子经过从第 1 极到最多 19 极的倍增电极系统，可获得 10 倍到  $10^8$  倍的电流倍增之后到达阳极。这时可以观测到，光电倍增管的阴极产生的很小的光电子电流，已经被放大成较大的阳极输出电流。通常在阳极回路要接入测量阳极电流的仪表，为了安全起见，一般使阳极通过 RL 接地，阴极接负高压。

总之，当入射光经过下述过程后，光电倍增管才能输出电流。

- (1) 入射光透过玻璃光窗；
- (2) 激励光阴极的电子向真空中放出光电子（外光电效应）；
- (3) 光电子经聚焦极汇集到第一倍增极上，进行二次电子倍增后，相继经各倍增极发射二次电子；
- (4) 由末级倍增极发射的二次电子经阳极输出。

## 2. 光电倍增管的主要参量与特性

### 1) 光谱响应

光电倍增管的阴极将入射光的能量转换为光电子。其转换效率（阴极灵敏度）随入射光的波长而变。这种光阴极灵敏度与入射光波长之间的关系叫做光谱响应特性。图 3 给出了多碱光电倍增管的典型光谱响应曲线。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。对应于该光谱响应曲线，本实验系统采用 3 种不同中心波长的 LED 发光二极管做光源来观察实际响应特性，并跟光电倍增管的光谱响应曲线进行比较，其中光谱响应曲线中的长波端的截止波长定义为峰值灵敏度的 0.1%。对于每一支光电倍增管来讲，真实的数据可能会略有差异。

# 典型光谱响应曲线

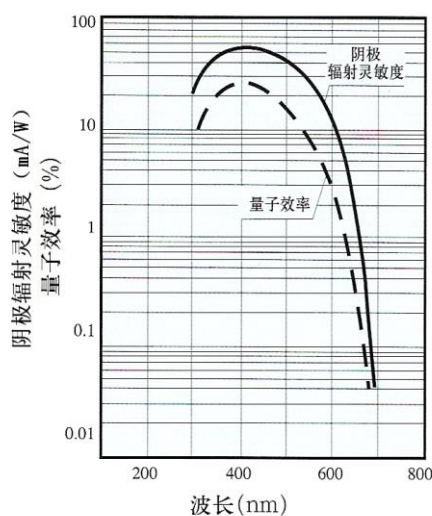


图 2

## 2) 灵敏度

由于测量光电倍增管的光谱响应特性需要精密测试系统和很长的时间，且提供每一支光电倍增管的光谱响应特性不现实，所以一般用光照灵敏度来评价光电倍增管的灵敏度。阳极光照灵敏度表示的是对光电面上入射一定光束时，阳极输出电流的大小。即对应于 1 流明光的输出电流称之为光照灵敏度，用 SA 表示；单位为 A/LM（安培/流明）。光照灵敏度有表示阴极特性的阴极灵敏度和表示光电倍增管整体特性阳极灵敏度两种。

## 3) 光电特性

光电倍增管的阳极输出电流与入射于光电阴极的光通量之间的函数关系，称为倍增管的光电特性。一般光电倍增管的光电特性曲线线性（直线性）是很好的。也就是说具有宽的动态范围。但是在接收较强的光入射时，会产生偏离理想线性的情况。其主要原因是阳极的线性特性影响。具有透过型的光电阴极的光电倍增管，工作在低电压、大电流场合，也可能出现阴极线性特性的影响。阴极、阳极两者的线性特性在工作电压一定时，与入射光波长无关，而取决于电流值大小。因此对于模拟量测量，必须选取能保证阳极电流与光照在大范围内保持线性关系的那些型号的光电倍增管（工程上一般取特性偏离于直线 3% 作为线性区的界限）。

## 4) 伏安特性

光电倍增管的伏安特性是指在改变阳极—阴极间的工作电压时，从而引起阳极输出电流的变化。光电倍增管的输出电流对工作电压非常敏感，因此必须使用高稳定性的高压电源。本测试仪采用的高压电源的漂移、纹波、温度变化、输出变化、负载变化等的综合稳定度优于该光电倍增管稳定度 1 个数量级，并连续可调。

### 5) 阳极暗电流

光电倍增管在完全黑暗的环境中仍会有微小的电流输出,这个微小的电流叫做阳极暗电流。作为微小电流、微弱光使用的光电倍增管,希望暗电流尽可能小。

阳极暗电流是决定光电倍增管对微弱光信号的检出能力的重要因素,其产生的主要原因有以下几种:

1. 由光电表面及倍增极表面的热电子发射引起的电流;
2. 管内阳极和其它电极之间,以及芯柱阳极管脚和其它管脚之间的漏电流;
3. 因玻璃及电极支持材料发光产生的光电流;
4. 场致发射电流;
5. 因残留气体电离产生的电流(离子反射);
6. 因宇宙射线、玻璃中的放射性同位素发出放射线、环境 $\gamma$ 射线等导致玻璃发光引起的噪声电流。

阳极暗电流也受阳极电压的影响,随着工作电压增加而增加,但增加率并非一样。

### 6) 电流放大(增益)

由一个具有初速能量 $E_p$ 的一次电子,从倍增极发射出 $\delta$ 个二次电子(称 $\delta$ 为二次发射系数),在低噪声的条件下得到倍增,从而达到了电流放大的作用。

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。在理想情况下,具有 $n$ 个倍增极,每个倍增极的平均二次电子发射率为 $\delta$ 的光电倍增管的电流增益为 $\delta^n$ 。二次电子发射率 $\delta$ 由下式给出:

$$\delta = A \cdot E^\alpha$$

这里的 $A$ 为一常数, $E$ 为极间电压, $\alpha$ 为一由倍增极材料及其几何结构决定的系数, $\alpha$ 的数值一般介于0.7和0.8之间。在具有 $n$ 个倍增极的光电倍增管,其电流增益 $\mu$ 即可表示为:

$$\mu = I_a / I_k = S_a / S_k \text{ 或 } \mu = \delta^n$$

## 3. 光电倍增管输出的电流、电压转换

### (1) 负载电阻进行电流、电压转换

光电倍增管输出是一个电流信号,而与其相连的后续电路,一般是基于电压信号而设计的,因此,常用一个负载电阻来完成电流-电压的转换。由于光电倍增管小电流输出时可看成一个具有很高特性阻抗的理想恒流源,为此,理论上负载电阻可以选取任意大的阻值,实现从一个很小的电流信号得到一个很大的电压信号。但实际上,较大的负载电阻会导致频率响应和输出线性的恶化。

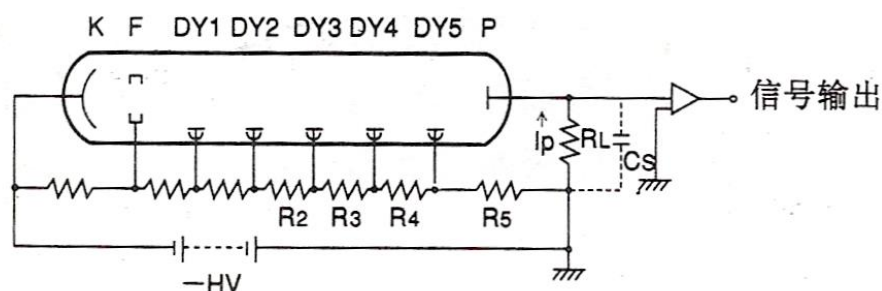


图4 光电倍增管的输出回路

如图4中，考虑到上述因素，本测试仪采用温度系数小的金属膜无电感负载电阻，并选取适当阻值的电阻来完成光电倍增管特性的测试。

## (2) 运算放大器电流-电压转换

使用运算放大器进行电流-电压转换的电路，在和数字电压表组合起来用时，就不需要使用昂贵的微小电流计，也可精确测试光电倍增管的输出电流。

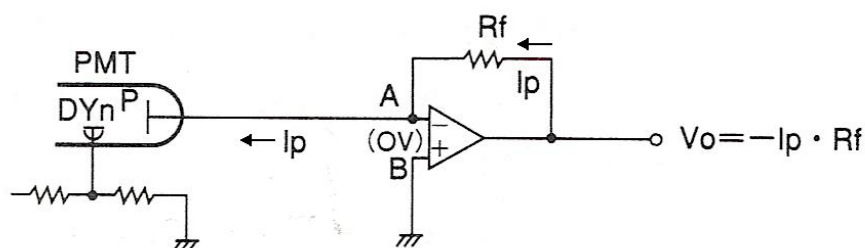


图5 用运算放大器的电流、电压变换回路

用运算放大器进行电流-电压转换的基本电路如图6所示，因为运算放大器的输入阻抗非常高，光电倍增管的输出电流不能在图5中的A点流入运算放大器的反相端子(-)。因此，绝大部分的电流流经反馈电阻  $R_f$ ，然后流出前置放大器的输出端。一般运算放大器有非常高的放大倍数为  $10^5$ ，通常保持在反相输入端子(A点)的电位与同相输入端子(B点)的电位(接地电位)相同下工作(把这称作并接地或假接地)。所以运算放大器输出电压和  $R_f$  两端发生的电压  $V_0$  相同，理论上，可以得到开路放大倍数倒数大小的高精度，实现电流-电压变换。这种情况下，输出电压  $V_0$  可用下面的公式来计算：

$$V_0 = -I_p \times R_f$$

限制输出电压  $V_0$  的因素主要有：光电倍增管的阳极电流  $I_p$ 、反馈电阻  $R_f$  的大小以及运算放大器的工作电压等。

## 四、 实验内容与步骤

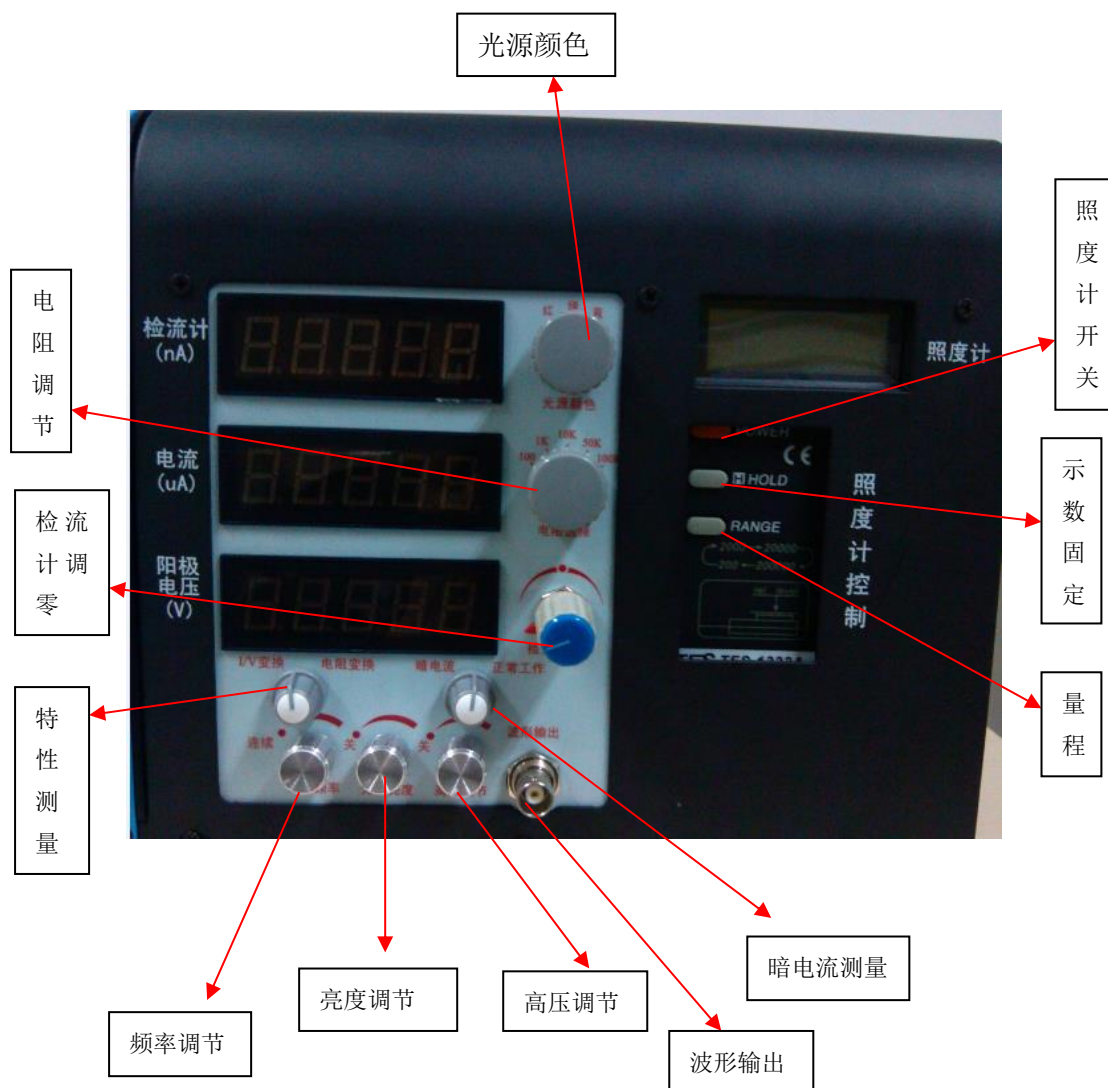


图6 主控箱前面板



光电倍增管在探测微弱信号方面应该广泛，本实验中照射到泵增管上的照度很弱，以绿光为例，LED 输出 5Lux，其中 99%反射到照度

计上, 1%透射到倍增管上, 约 0.05lux。(参考普通教室照度约为 200-300Lux)

## 1. 暗电流检测

- 1) 打开 220V 电源开关, 预热 5 到 10min;
- 2) 分别逆时针旋转“亮度调节”和“高压调节”旋钮至最左使之处于关闭状态;
- 3) 调节“暗电流测量”旋钮至“暗电流”档;
- 4) 旋转“检流计调零”旋钮进行调零;
- 5) 顺时针旋转“高压调节”旋钮, 逐渐增加高压;
- 6) 记录检流计示数与高压数值并绘出  $I_{\text{暗}}-V$  曲线。
- 7) 逆时针旋转“高压调节”逐渐降低高压至零, 调节“暗电流测量”旋钮至“正常工作”档;

$U(V)$									
$I_{\text{暗}}(nA)$									

## 2. 光电倍增管特性测试

### (1) 光照度与阳极电流的关系

- 1) 调节“特性测量”旋钮至“I/V 变换”档;
- 2) 顺时针旋转“高压调节”旋钮, 找到合适电压值;  
(顺时针旋转“亮度调节”旋钮到最大, 顺时针旋转“高压调节”旋钮并观察电流表示数直至电流接近饱和, 此时电压值比较合适, 再将“亮度调节”旋钮左旋关闭。)
- 3) 顺时针旋转“亮度调节”旋钮, 记录电流值  $I$  和光照度  $E_x$ , 绘制  $I-E_x$  曲线;
- 4) 逆时针旋转“亮度调节”和“高压调节”至关闭状态。
- 5) 旋转“光源颜色”旋钮, 测量不同波长光源下光照度与阳极电流的关系。  
(选作)



$E_x$ (Lux)									
$I$ (uA)									

## (2) 高压与阳极电流的关系

- 1) 顺时针旋转“亮度调节”旋钮，找到合适照度值；

(顺时针旋转“高压调节”旋钮到 1000V 左右，顺时针旋转“亮度调节”旋钮并观察电流表示数值至电流接近饱和，此时照度值比较合适，再将“高压调节”旋钮左旋关闭。)

- 2) 顺时针旋转“高压调节”旋钮，记录电流值  $I$  和高压值  $U$ ，绘制  $I-U$  曲线；
- 3) 逆时针旋转“亮度调节”和“高压调节”至关闭状态。
- 4) 旋转“光源颜色”旋钮，测量不同波长光源下光照度与阳极电流的关系。

## (选作)

电压 (V)								
电流 ( $\mu A$ )								

## 3. 倍增的阳极光照灵敏度及增益

- (1) 阳极光照灵敏度定义为阳极输出电流  $I_A$  除以入射光通量  $\Phi$  所得的商：

$$S_A = \frac{I_A}{\Phi} (\mu A / I_m)$$

说明：本实验仪上光电倍增管的光阴极直径为  $8*24mm^2$ ；阳极电流可以在通过实验 2 读出，比如在高压 800V 时阳极电流 200 微安；光通量  $\Phi = E * A$ ， $E$  为照度， $A$  为通光面积；其中照度为倍增管实际接收量，一般是显示的 99%)

- (2) 电流增益定义为在一定的入射光通量和阳极电压下，阳极电流与阴极电流的比值，目前实验中使用的光电倍增管正常工作（高压约 1000V）增益倍数为  $10^6$ 。

## 4. 光电倍增管输出测试——倍增管作为非理想电流源的研究

- 1) 调节“特性测量”旋钮至“电阻变换”档；



- 2) 调节“电阻调节”旋钮至“100”档；
- 3) 顺时针旋转“亮度调节”旋钮，找到合适照度值；
- 4) 顺时针旋转“高压调节”旋钮，记录电流值  $I$  和高压值  $U$ ，绘制  $I$ - $U$  曲线；
- 5) 逆时针旋转“高压调节”至关闭状态。
- 6) 调节“电阻调节”旋钮，测量不同阻值下  $I$ 、 $U$  值，绘制  $I$ - $U$  曲线。

电压 (V)					
电流 ( $\mu$ A)					

## 5. 脉冲光现象演示及倍增管响应速度

- 1) 用信号线将倍增管的“波形输出”端口连接到示波器的有效通道上；
- 2) 调节“光源调节”旋钮到适当的亮度，可根据照度计上示数进行选择；
- 3) 顺时针旋转“频率调节”旋钮增加光源的调制频率；
- 4) 顺时针依次旋转“高压调节”、“亮度调节”和“频率调节”旋钮，观察示波器输出波形。
- 5) 通过测量方波的上升沿计算倍增管的响应速度。具体算法是在示波器上分别读取振幅为 10% 和 90% 对应的时间，将两示数相减即可得到响应时间。

## 6. 光谱响应特性（选做）

实验中可分别选择红光、绿光和黄光，当调整时确定一种光源的照度，其他两种光源与前者照度一致我们即可认为进入倍增管的强度一样。实验中测量照度的照度计对三种颜色照度响应不同，测试得到 蓝光：红光：绿光=1:3:5，所以调试过程中如果蓝光 0.2lux，那么红光应为 0.6lux，绿光为 1lux。根据实验中测量到的电流做出光谱响应曲线。

波长 (nm)	470 (蓝)	550 (绿)	690 (红)
照度 (lux)			
电流 ( $\mu$ A)			

## 五、 实验结果与思考

1. 光电倍增管的暗电流对信号检测有何影响？在使用时如何减少暗电流？
2. 光电倍增管阳极电流的大小都与什么因素有关？

## 六、 参考文献

- 【1】 王海科，吕云鹏；光电倍增管特性及应用【J】；仪器仪表与分析监测；2005 年 01 期
- 【2】 陈奕升；陈光；光电倍增管的微光特性测量【J】；激光与红外；1986 年 11 期
- 【3】 杨国栋；周荣楣；光电倍增管的现状与抉择【A】；第九届真空技术应用学术年会论文集【C】；2006 年
- 【4】 江月松，阎平，刘振玉1 光电技术与实验[M ]1北京：北京理工大学出版社，2000，70～ 88
- 【5】 光电倍增管管数据手册；北京滨松电子

## 七、 注意事项

1. 光电倍增管对光的响应度很高，因此在没有完全隔离外界干扰光的情况下切勿对光电倍增管施加工作电压，否则会导致管内倍增极的损坏；
2. 即使光电倍增管处在非工作状态，也要尽可能减少光阴极和倍增极的不必要的曝光，以免对光电倍增管造成不良影响；
3. 光电阴极的端面是一块很光亮的玻璃片，要妥善保管；
4. 使用时先开机预热 5 分钟，要保持清洁干燥，同时要满足规定的环境条件，切勿超过 1000V 工作电压；