

学  
生  
园  
地

## 模块化光电倍增管实验开发

马国悦, 马世红, 白翠琴

(复旦大学 物理学系, 上海 200433)

**摘 要:**通过光电倍增管、电流测试仪、负高压电源、照度计等仪器的组合, 设计了分压电路, 搭建了模块化的光电倍增管特性测试的实验平台, 实现了对光电倍增管暗电流、光电特性、伏安特性的测量。模块化的实验平台组合使得仪器装置具有良好的开放性, 有利于学生直观认识掌握光电倍增管的工作原理以及性能参量的物理意义。

**关键词:**光电倍增管; 暗电流; 伏安特性; 光电特性

中图分类号: O462 文献标识码: A 文章编号: 1005-4642(2015)06-0035-04

### 1 引 言

光电倍增管是一种以光电效应、二次电子发射和电子光学理论为原理基础的真空光电发射器件。它把微弱入射光转换成光电子, 并获得倍增, 具有极高灵敏度和超快时间响应的优点。一些具有里程碑意义的近代物理实验都离不开光电倍增管的运用, 如塞曼效应、氢光谱实验、能谱仪实验、拉曼光谱等。现有的一些光电倍增管教学设备实现了各种仪器的一体化集成和封装, 在简化实验操作的同时, 也给学生理解核心的物理原理概念带来了困难。而开放式、模块化的实验平台设计为学生提供了一次打开“黑箱”的机会, 直观地认识各种仪器的结构及其组合方式, 从而对测量手段的原理和数据的物理意义有更深刻的理解, 并为学生自主的探索学习提供了拓展的空间<sup>[1-7]</sup>。

### 2 实验方案设计

实验装置原理示意图如图 1 所示, 实物如图 2 所示。实验采用可调直流电源与 LED 灯珠组合光源, 可通过改变供电电压调节光强。固定 JD-3 型照度计探头与光源的相对位置, 可以实现对相对光强的测量。光电倍增管供电采用 1 500 V 可调负高压电源, 信号电流测量采用 HB-311 型 PA 级电流测试仪。采用 GDB221 倍增管与滨松 R669 光电倍增管。为保障密闭充分遮光, 以铝制

管座外壳遮罩, 遮罩前端为直径 2.0 cm 通光孔, 可根据实验需要调节通光面积。该设计既降低了对实验环境的要求, 同时又保证了实验仪器的开放性。

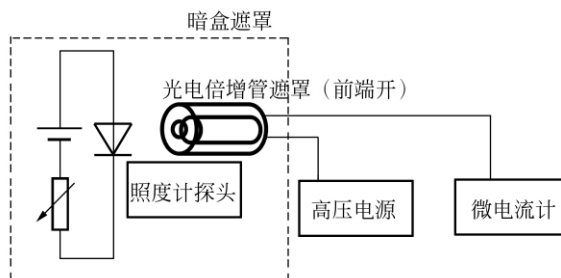


图 1 实验装置原理示意图

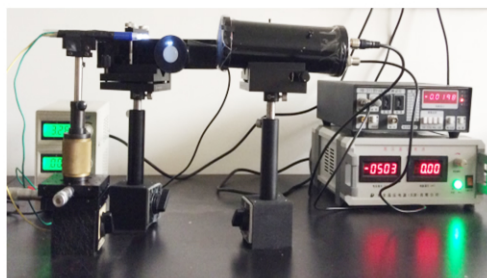


图 2 实验平台

光电倍增管分压电路的设计(图 3): 光电阴极接负高压供电, 设计分压电路在 1 000 V 工作状态下电流为 1.96 mA, 约为平均阳极电流的 20

“第 8 届全国高等院校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期: 2014-05-19; 修改日期: 2014-08-07

基金项目: 国家基础科学人才培养基金资助项目(No. J0730310, No. J1103204)

作者简介: 马国悦(1993-), 男, 江苏无锡人, 复旦大学物理学系 2011 级本科生。

指导教师: 白翠琴(1979-), 女, 河北石家庄人, 复旦大学物理学系工程师, 硕士, 从事蛋白质聚集的计算模拟及物理实验教学研究。

倍,以保障倍增极间的电压分布.由此确定分压电路单位阻值为 39 kΩ,阴极与第一倍增极间电阻阻值为单位电阻的 3 倍即 120 kΩ,以确保第一

打拿极收集电子的效率,提高系统增益.末三级的旁路电容在脉冲信号下可保障光电线性,大小分别为 0.01,0.01,0.047 μF<sup>[8]</sup>.

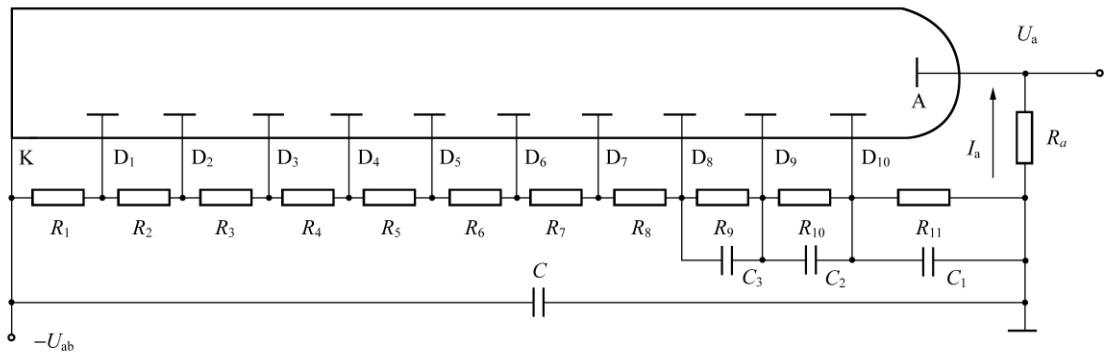


图 3 光电倍增管分压电路示意图

### 3 测试结果与分析

#### 3.1 暗电流

对 GDB221, R669 管的测量结果如图 4 所示.在低压区 0~400 V,暗电流低于 pA 量级;工作电压区域 600~1 000 V,暗电流上升至 nA 量级;在 1 300 V 以上电压时,R669 管的暗电流陡升至 μA 量级.从图中曲线可以明显观察到存在状态跃变的情况.

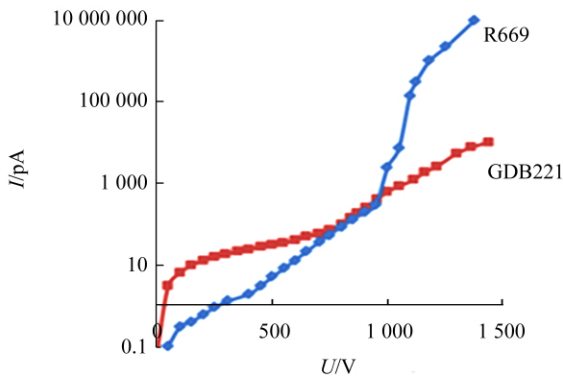


图 4 暗电流曲线

对于低压区 0~400 V,暗电流曲线呈现明显的线性特征,如图 5 所示.

采用直线拟合得到 GDB221 管和滨松 R669 管的结果分别为

$$I_{\text{dark}} = (0.0614 \pm 0.0004)U + (0.10 \pm 0.09),$$

$$I_{\text{dark}} = (0.0046 \pm 0.0002)U + (-0.27 \pm 0.04).$$

暗电流同工作电压之间呈正比关系,如图 6 所示,由斜率可以求得 GDB221 管和滨松 R669

管的电阻分别为

$$R = (1.630 \pm 0.013) \times 10^{13} \Omega,$$

$$R = (2.16 \pm 0.09) \times 10^{14} \Omega.$$

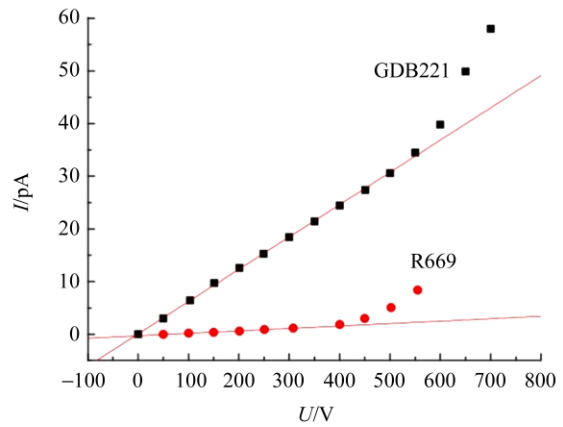


图 5 低压区暗电流曲线

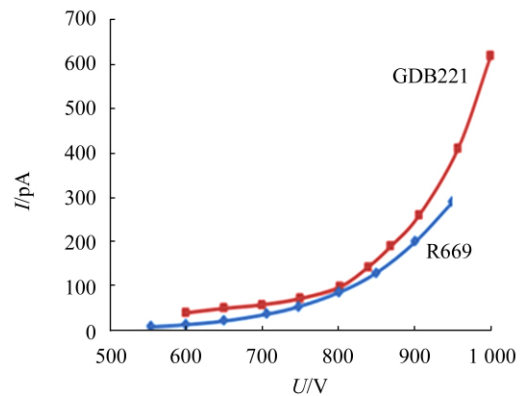


图 6 工作电压区间暗电流

此量级的电阻可以认为是漏电因素的作用.

光电倍增管电极之间玻璃、管座和灰尘会导致漏电,由于漏电电流不经过电子倍增系统,所以电阻性质稳定,不随电压变化。

当电压上升至工作区间 600~1 000 V,暗电流曲线随负高压增大迅速上升。

在工作电压下电子倍增系统开始工作。由阴极、倍增极金属材料的热发射电流,经过倍增系统的放大而得到更大的输出电流信号,此时其对暗电流的贡献将远大于漏电的影响。依照次级电子发射原理,单倍增极的放大系数  $\delta$  与极间电压  $U_{DD}$  的  $k$  次方成正比,即  $\delta = CU_{DD}^k$ 。对暗电流、负高压同时做对数处理,可以得到:

GDB221 和滨松 R669 管对数处理后如图 7 所示,的数据直线拟合的结果分别为(电流以 pA 为单位)

$$\lg I = (8.9 \pm 0.2) \lg U + (-24.2 \pm 0.6),$$

$$\lg I = (6.64 \pm 0.09) \lg U + (-17.3 \pm 0.3).$$

拟合表明  $I \propto U^{(8.9 \pm 0.2)}$ ,  $I \propto U^{(6.64 \pm 0.09)}$ , 证明了对暗电流来自倍增系统放大。

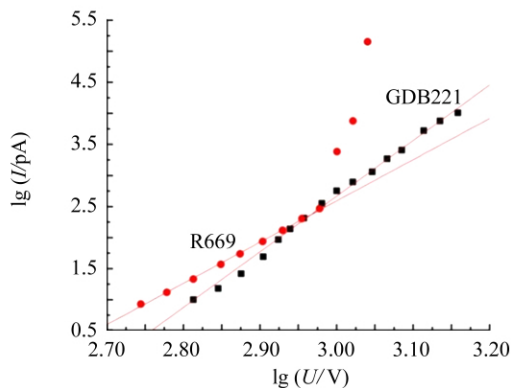


图 7 对数处理后的工作电压区间暗电流

注意到,滨松 R669 管在高于 1 300 V 时,其对数处理曲线进一步偏离线性,暗电流上升速度再次加快,存在“突升”现象,其原因可能来自场致发射电子或残余气体电离放电在高压区明显作用<sup>[7-9]</sup>。

### 3.2 伏安特性的测量

对滨松 R669 管在不同入射光强下的伏安特性曲线测试结果如图 8 所示。

阳极输出电流随负高压增大而快速上升,这反映了增益(放大倍数)随电压的变化,且数据表明上升速度与入射光波长、强度均无关。滨松 R669 管对数拟合得到的结果为(照度计示数 0.8,

0.4 lx)

$$\lg I = (6.35 \pm 0.03) \lg U + (-13.2 \pm 0.09),$$

$$\lg I = (6.36 \pm 0.03) \lg U + (-13.5 \pm 0.10).$$

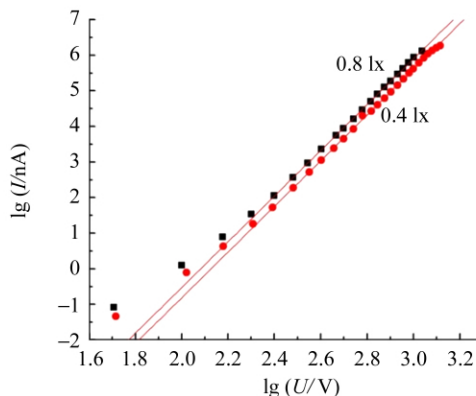


图 8 对数处理后伏安特性曲线

对于整个倍增系统,其放大倍数应是各个倍增极的乘积,结合次级电子发射原理式  $\delta = CU_{DD}^k$  可以得到:

$$I = I_K \delta_1 \delta_2 \cdots \delta_n = C^n U_{DD}^{nk}.$$

因此倍增管伏安特性在理论上应满足  $I \propto U^{nk}$ , 其中  $n$  为倍增极数量。滨松 R669 管有 10 个倍增极,相应的  $k = 0.636 \pm 0.003$ 。

### 3.3 光电特性的测量

实验采用测量相对光强的办法,在伏安特性电路的基础上,靠近 LED 处放置照度计探头,测量过程中保持位置固定,调节 LED 工作电压,测得照度计示数及光电流即反映光电特性。对滨松 R669 管光电特性曲线测量光电线性曲线测量结果如图 9 所示。

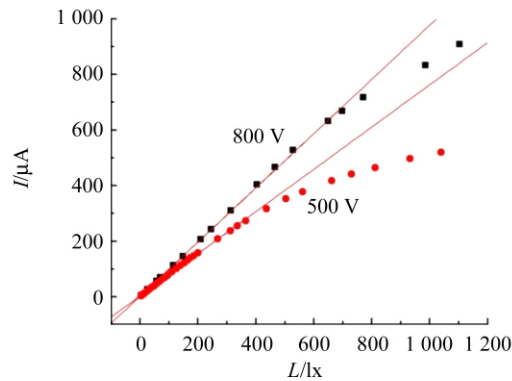


图 9 光电特性曲线

倍增管加压 800 V 时,

$$I = (0.974 \pm 0.008)L + (2.6 \pm 0.8),$$

倍增管加压 500 V 时,

$$I = (0.7584 \pm 0.004)L + (3.7 \pm 0.7).$$

在低光强区域光电倍增管光电特性呈良好的线性,由于光强测量并不是绝对值,所以斜率不能反映倍增管的绝对灵敏度.

当光电流信号增大至一定值时,光电倍增管光电特性将出现线性极限,对于工作电压 500 V 和 800 V,线性极限分别 317  $\mu\text{A}$  和 717  $\mu\text{A}$  左右.此时分压电路中的电流大小为 1 000  $\mu\text{A}$  和 1 700  $\mu\text{A}$ .根据倍增管工作电路原理,当分压电路电流为光电流信号的 20 倍以上时,各倍增极间电压可实现平均分配.当光电流增大至分压电流量级可比拟时,倍增极间的等效电阻不再相同,电压分布发生变化,使得倍增系统放大倍数降低,光电线性被破坏.

#### 4 结束语

以微电流测试仪、照度计、高压源等基本实验仪器组合搭建了模块化光电倍增管特性研究的实验平台,设计实验以国产 GDB-221、滨松 R669 光电倍增管为例,研究了光电倍增管的暗电流、光电特性和伏安特性.实验研究内容丰富,仪器平台开放度高、可调节性强,有助于学生从实验现象出发,直观理解光电倍增管工作的原理和影响因素,

能够激发学生钻研探究的热情,从而对物理规律有更深入的理解和掌握.

#### 参考文献:

- [1] 陈森,张师平,吴疆,等.光电倍增管光谱特性实验设计[J].大学物理,2013,26(1):26-29.
- [2] 史玖德.光电管与光电倍增管[M].北京:国防工业出版社,1981.
- [3] 杨百瑞.高量子效率红外光电阴极与光电倍增管的研究进展[J].物理实验,2005,25(5):3-5.
- [4] 武兴建,吴金宏.光电倍增管原理、特性与应用[J].国外电子元器件,2011(8):13-17.
- [5] 赵文锦.光电倍增管的技术发展状态[J].光电子技术,2011,31(3):145-148.
- [6] 陈星,罗慧,赵博. Hg 的 Zeeman 效应相对强度实验观察与朗德 g 因子测量[J].物理实验,2008,28(8):28-34.
- [7] 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.
- [8] 别尔可夫斯基.真空光电器件[M].北京:原子能出版社出版社,1980.
- [9] 陈成杰,徐正卜.光电倍增管[M].北京:原子能出版社,1988.

## Modular design of photomultiplier experiment

MA Guo-yue, MA Shi-hong, BAI Cui-qin

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** By combining photomultiplier, amperemeter, negative high voltage power supply, illuminometer and so on, an experimental platform was constructed for the purpose of studying the characteristics of photomultiplier (PMT). Several major parameters and characteristics of photomultiplier had been measured and analyzed, including the characteristic of dark current, current-voltage characteristic under different light intensities and photoelectric characteristic. The experimental platform with modular design was open type, which could help student intuitively master the operating principle and performance parameter of photomultiplier.

**Key words:** photomultiplier; dark current; current-voltage characteristic; photoelectric characteristic

[责任编辑:郭 伟]