

光子计数用的光电倍增管

朱 印 康

(北京大学物理系)

光子计数技术是微弱光检测的一种强有力的手段^[1]。光电倍增管(以下简称PMT)是光子计数系统中的关键器件。虽然PMT使用已很普遍,但作为微弱光检测,并非所有PMT均能实现。尤其作为单光子计数的测量,对PMT有若干特殊要求。本文根据实践经验对此加以阐述,并给出两种国产器件的测试结果。

一、光子计数技术对光电倍增管的特殊要求

对用作光子计数系统中探测器的光电倍增管,除了与用于模拟的微弱光检测方法有相同的要求(例如合适的光谱响应范围、较高的光阴极和阳极积分灵敏度以及小的暗电流)外,还有一些特殊的要求。

(1) 在单光电子响应的脉冲高度分布(简称PHD)曲线上要有高的峰谷比。

PMT的单光电子响应PHD曲线是衡量能否用于光子计数系统的重要特性。峰谷比

(E_p/E_v)和分辨率($\Delta E/E_p$)是表征该曲线优劣的两个主要参数。图1画出了两种典型的PMT的PHD曲线。(a)中曲线的峰谷比远大于(b),并且分辨率也是(a)高于(b)。具有如(a)所示曲线的PMT适用于光子计数系统,而(b)所示的管子则不能使用。

PMT的PHD曲线除了与它的内部结构和第一级倍增极(D_1)的材料性质有关外,还与光阴极(K)和 D_1 间的电位差有关^[2]。通常采用提高K与 D_1 之间的电位差的方法来获得比较理想的曲线。

(2) 在光子计数与工作电压的关系曲线上要有较宽的“坪区”。

PMT工作在“坪区”时,可以消除工作电压的不稳定性造成的增益漂移的影响。

(3) 要有低的背景噪声脉冲计数率。

无光照时,输出的脉冲计数率称为背景噪声脉冲计数率或暗计数率。其来源主要是光阴极和各倍增极的热电子发射,玻壳内 K^{40} 放射性同位素衰变以及宇宙射线中的高能粒子对玻

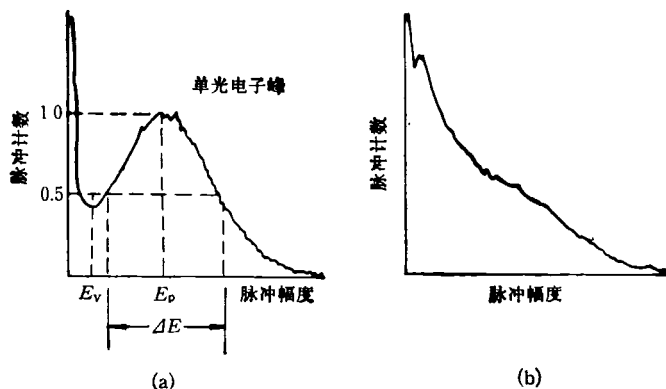


图1 PMT的单光电子响应PHD曲线

壳和光阴极的轰击等。为了降低暗计数率，可选用低的热发射光阴极；采用致冷措施以降低工作温度。例如一只 RCA 31034 型 PMT 测试结果为，在 15℃ 时，甄别电平设在 PHD 曲线谷点时的暗计数率为 4452 CPS (即每秒计数值)，而致冷至 -25℃ 后，则降至 24CPS。另外最好选用小面积光阴极的 PMT，当必须选用大面积光阴极的 PMT 时，可采用磁散焦技术^[3]降低暗计数率。图 2 是 EMI 9558 B 型 PMT 在室温条件下，加磁散焦电流时的实验结果。

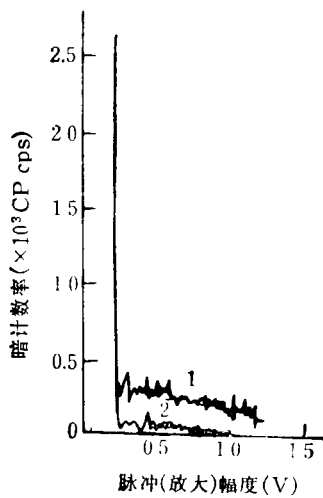


图 2 EMI 9558 B 的暗计数磁散焦特性
1. 磁散焦电流为 0mA,
2. 磁散焦电流为 60mA

(4) 在正常的工作电压时，要不发生管内光子和正离子反馈的后续脉冲效应。

(5) 要求 PMT 具有快速脉冲响应时间，即 PMT 的上升时间 t_r 应小于 10 ns，以便减小脉冲堆积误差，提高系统测量的动态范围。

(6) PMT 的阴极要有高的量子效率，倍增极和阳极要有高的收集效率，并尽量提高系统的量子计数效率^[4]，即提高输出脉冲计数值与人射光子数之比，可获得更高的检测极限。

二、用于光子计数的光电倍增管

北京核仪器厂专门为光子计数研制的 GDB-47 型 PMT 具有高增益、快速时间响应的特点，采用半透明双碱光阴极，光谱响应范围为 310—650 nm，峰值波长为 400 ± 20 nm。华东电子管厂生产的 GDB-423 型 PMT 是一种小型 ($\phi 40$ mm) 11 级宽波段 (310—820 nm) 器件，具有良好的红白比光电特性以及高增益、低暗流和工作稳定的特点。并且价格低廉，特别适用于作一些专用测量设备的光电探测器。

国外常用的 RCA 31034 和 RCA 31034-02 型 PMT 采用高量子效率的 GaAs 半导体光阴极，具有平坦的宽波段 (200—930 nm) 光谱响应，但价格昂贵。EMI 9558 B 型 PMT 也用于光子计数系统，但该管的 PHD 曲线不够理想，因而实际使用时，它的量子计数效率很低^[4]，且有较大的暗计数率。表 1 对上述四种用于光子计数的 PMT 的工作特性作了比较。

表 1 四种端窗式光电倍增管的工作特性

型号	光 阴 极				阳 极				倍增极		上升时间 (ns)	
	材料	光谱响应范围 (nm)	峰值波长 (nm)	光照灵敏度 ($\mu A/lm$)	阳极光照灵敏度 (A/lm)	阳极电压 (V)		暗电流 (nA)		级数		电流增益* ($\times 10^6$)
						典型	最大	典型	最大			
GDB-47	双碱	310—650	400 ± 20	75	2000	1800	2250	5	20	12	26.7	1.8
GDB-423	三碱	310—820	490	100	100	950	1500	10	100	11	1.0	14
RCA 31034	GaAs	200—990	850	630	500	1500		50		11	0.8	≤ 2.5
EMI 9558B	三碱 (s-20)	320—850	370	235	200	1100	1600	2	10	11	0.85	10

* 电流增益按阳极光照灵敏度与阴极光照灵敏度之比计算。

为了考察 GDB-47 和 GDB-423 两种 PMT 能否用于光子计数系统，我们用 HTV-C 676

型光子计数器对这两种管子进行了单光电子响应的 PHD 曲线的测试，并与 RCA 31034 和

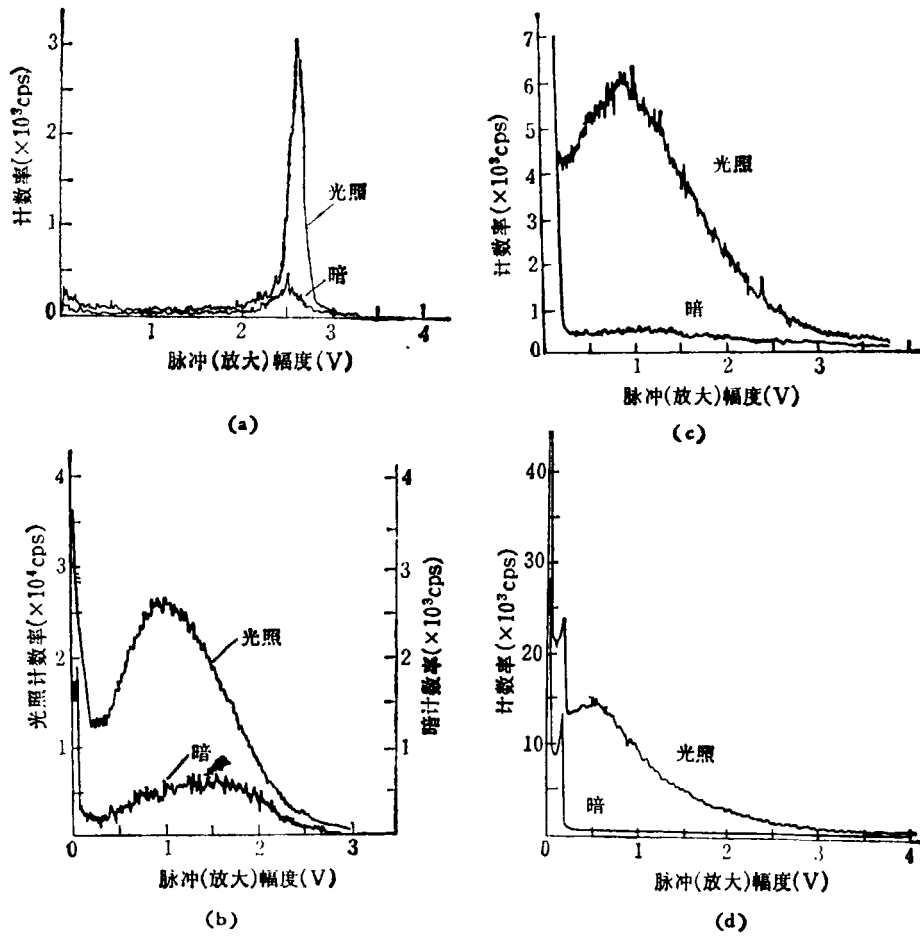


图3 几种 PMT 的 PHD 曲线比较(测试窗宽: 80 mV)
 (a) GDB-47 (2150V); (b) GDB-423 (-1000 V);
 (c) RCA 31034 (-1450 V); (d) EMI 9558 B(1250 V)

EMI 9558 B 比较, 结果示于图 3。由 PHD 曲线所得的四种管子的峰谷比和分辨率列于表 2。由图 3 和表 2 可见, GDB-47 具有良好的单光电子谱特性, 很适用于光子计数系统。GDB-423 也具有较好的单光电子谱特性。

表 2 四种 PMT 的单光电子谱特性

型 号	峰 谷 比	分 辨 率 (%)
GDB-47	2.1	7.7
GDB-423	4.0	145.0
RCA 31034	3.6	183.3
EMI 9558B	2.0	230.0

比较图 3 所示的各种 PMT 的暗计数特性曲线, GDB-47 具有良好的背景噪声谱特性。其背景噪声脉冲计数主要来自光阴极, 只要采取

致冷或磁散焦等措施, 可以获得极低的暗计数率。工作电压为 2150V 和温度为 20°C 时, 其暗计数率 $\sum = 1098 \text{ cps}$, 其中 p_e 为单光电子脉冲高度, 即 PHD 曲线中单光电子峰对应的脉冲高度。而当甄别电平取最佳电平 ($0.8 p_e$) 时, 暗计数率 $\sum = 694 \text{ cps}$ 。此值远小于 RCA 31034 在 15°C 时的最佳电平暗计数率 4452 cps。

图 4 是 GDB-47 型 PMT 的不同工作电压的 PHD 曲线。它在较宽的工作电压范围内具有较好的单光电子谱特性, 因此它具有图 5 所示的良好光照计数率与工作电压关系曲线的

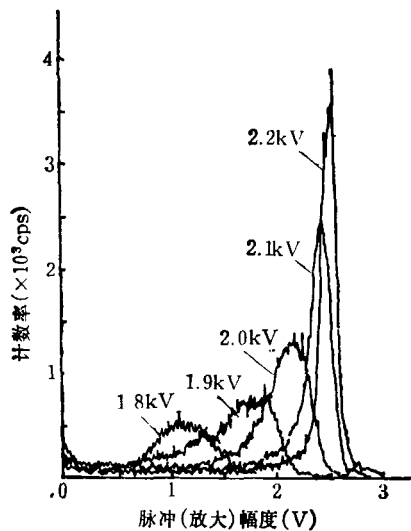


图4 GDB-47 不同工作电压的PHD曲线

“坪区”。

PHD曲线综合表达了PMT特性的重要参数,给出了暗计数率、单光电子响应等特性,并为选择工作电压、确定甄别电平以及误差修正等提供了可靠的依据。利用PHD曲线可以设计光子计数系统的其它电参数,并可在微弱光检测中获得接近理论极限的信噪比和极高的探测灵敏度。

GDB-47和GDB-423都是用于光子计数

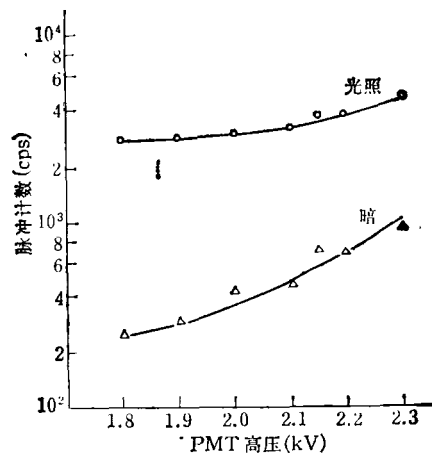


图5 GDB-47 的计数坪

的PMT。其单光电子谱特性、暗计数率、增益以及时间特性等方面已达到或超过了几种常用的国外产品。在光谱响应范围适宜的情况下,选择这两种型号的管子是适宜的。

感谢北京核仪器厂提供了GDB-47型PMT测试样管。

参 考 文 献

- [1] 翁渝民,物理,9(1980),20.
- [2] M. L. Meade, *J. Phys. E*, 14 (1981), 909.
- [3] W. Knight et al., *Appl. Opt.*, 7 (1968), 1115.
- [4] R. Foord et al., *Appl. Opt.*, 8 (1969), 1975.

国内、外物理学期刊近期发表的综述评论性文献题录

- 86-217. 利用快原子轰击二次离子质谱分析法和激光电离质谱分析法研究界面,(长井一敏),表面科学[日],6(1985),No. 4, 303—309,参13.
- 86-218. 利用亚稳原子退激发光谱(MDS)研究界面特征,(西垣敏),表面科学[日],6(1985),No.4, 310—314,参14.
- 86-219. 利用二次离子质谱分析法(SIMS)和辉光放电发射光谱分析法(GDS)研究界面,(大平孝至),表面科学[日],6(1985),No. 4,315—324,参24.
- 86-220. 利用超声显微镜评价材料,(石川等),表面科学[日],6(1985),No.4, 325—330,参9.
- 86-221. 人造超点阵(半导体),(坂本统德),表面科学[日],6(1985),No.4,331—339,参23.
- 86-222. 陶瓷界面的评价和控制,(桑原诚),表面科学[日],6(1985),No.4,340—346,参16.
- 86-223. 半导体界面的评价和控制,(田口常正等),表面科学[日],6(1985) No.4, 347—355,参43.
- 86-224. 高聚物复合材料界面的控制,(西敏夫),表面科学[日],6(1985),No.4,356—362,参23.
- 86-225. 纤维增强金属的界面问题及其控制,(盐田一路),表面科学[日],6(1985),No.4, 363—369,参16.
- 86-226. 金属界面的控制——通过晶粒间界偏析以改进金属材料性能,(木村宏),表面科学[日],6(1985),No.4,370—375,参12.
- 86-227. 金属表面偏析和脱溶的热力学,(吉原一彦),表面科学[日],6(1986),No. 5,388—389,参34.
- 86-228. 表面和界面现象的计算机模拟,(井手本等),表面科学[日],6(1986),No.5,400—408,参58.
- 86-229. 材料工艺用的核物理学,(T. W. Conlan),表面科学[日],6(1986),No. 5,400—408,参58.

(下转封三)