

文章编号: 1007-4627(2014)02-0177-06

MCP-PMT 脉冲线性输出特性实验

陈钰钰

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用双脉冲方法, 研究了日本滨松光子学株式会社 R3809U-52 型 MCP-PMT 对于半宽为 20 ns 和 100 ns 两种脉冲宽度下的线性输出性能, 阳极输出线性电流分别为 150 mA 和 25 mA; 经过分析, 提供了将该型 MCP-PMT 用于百纳秒宽度范围内脉冲测量的线性电流动态范围递推公式, 拓宽了其参数范围。

关键词: MCP-PMT; 脉冲线性电流; 双脉冲法

中图分类号: TL822 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.02.177

1 引言

微通道板光电倍增管 (Micro-channel Plate Photo-multiplier Tube, MCP-PMT)^[1]因其具有高

增益、高速响应时间、电子渡越时间分散低、可在高磁场中稳定工作等优势, 而被广泛关注, 并应用于高能粒子探测研究工作中。与传统类型 PMT 比较, MCP-PMT 的时间响应优势特别突出, 如表 1 所列。

表 1 MCP-PMT 与其他类型 PMT 时间性能比较

PMT 类型	上升时间/ns	下降时间/ns	渡越时间/ns	脉冲宽度 (FWHM)/ns
环形聚焦型	4	10	31	7
盒栅型	~7	25	57~70	13~20
直线聚焦型	0.7~3	1~10	16~50	1.6~5
百叶窗型	~7	25	60	25
细网型	2.5~2.7	4~6	15	5
MCP-PMT	0.2	0.4	0.4	0.5

精确测量辐射脉冲的强度随时间变化的整个过程, 是脉冲辐射场测量诊断工作的主要内容。探测器的时间响应特性反映探测器对脉冲辐射源脉冲时间特性的跟随性, 测量中所使用的探测器时间响应越快, 测量得到的脉冲波形与辐射源脉冲形状的相似性越好, 越能够更少失真地反映脉冲辐射源的脉冲形状。由闪烁体和光电器件组成的闪烁探测器是常用的探测工具之一。闪烁探测器的时间特性由闪烁体和与之相配的光电器件时间特性共同决定; 在进行快脉冲辐射测量时, 要求使用快响应探测器, 闪烁体的时间响应特性是探测器的重要性能之一。需要构建快时间响应闪烁晶体测量系统对闪烁晶体的时间响应特性进行研

究。

快时间响应闪烁晶体测量系统的重要组件之一是尽可能快时间响应的光电器件, MCP-PMT 的良好时间特性使其成为重要的候选光电器件之一。MCP-PMT 常被用于计数测量, 测量的光脉冲半宽度一般为亚纳秒级, 厂家往往只提供亚纳秒级几组输出数据, 例如日本滨松光子学株式会社 (Hamamatsu Photonics Co.Ltd., 简称 Hamamatsu) R3809U-52 型 MCP-PMT 只提供了光源脉冲宽度为 0.05 ns 脉冲对应的情况。PMT 脉冲输出线性与所用脉冲光源的时间宽度和重复频率有关^[2]。不同种类的闪烁晶体发光时间特性差异很大,

收稿日期: 2013-06-26; 修改日期: 2013-07-15

作者简介: 陈钰钰(1982-), 女, 广西柳州人, 助理研究员, 本科, 从事脉冲辐射场测量诊断研究工作;
E-mail: cyy_xy@hotmail.com

发光前沿和后沿动态范围从亚纳秒开始到数百纳秒，而与不同的光脉冲半宽度对应的 MCP-PMT 的阳极输出线性电流不同，为了在应用 MCP-PMT 进行闪烁晶体脉冲时间特性精密测量时，确保测量结果的可靠性，有必要建立与光脉冲宽度(半宽范围从亚纳秒至到数百纳秒)对应的 MCP-PMT 的线性电流的量化关系，并研究其数据变化规律。

本实验具体测量 Hamamatsu R3809U-52 型 MCP-PMT 对脉冲半宽为 20 ns 和 100 ns 两种信号的脉冲输出线性电流，并将实验数据与 Hamamatsu 提供的该型号 MCP-PMT 阳极输出线性电流进行比较和分析。

2 MCP-PMT工作原理

MCP-PMT 是一种以 MCP 为电子倍增系统的光电倍增器件，典型的结构示意图如图 1 所示，由入射窗、光电面、MCP 及阳极构成。一般采用近贴聚焦、金属-陶瓷或金属-玻璃结构，与传统的打拿极结构的 PMT 相比，以近贴聚焦代替静电系统聚焦的电子

光学系统，以 MCP 代替传统的打拿极结构，使电子从光电阴极到阳极的运动距离大大缩短^[3]。

MCP 是一种由许多内壁既是电阻体又是二次发射体的内径为 6 ~ 20 μm 的细玻璃管密聚成束的板状结构，每根细管形成一个独立的二次电子倍增器。入射到 MCP 的一次电子，从壁上发射出二次电子，被 MCP 两端加的电压 V_D 的电场加速，再次碰撞到壁上又发射出次级电子。这个过程在细管内多次反复，大量电子从输出端输出。MCP 构造和倍增原理如图 2 所示。MCP-PMT 的工作原理为，光子经入射窗照射到光电阴极时，光电效应使光电面产生光电子，光电子在电场的聚焦作用下拉进 MCP 细管内，碰撞其内壁，进行反复倍增，从阳极得到放大的光电信号。

为使 MCP-PMT 正常工作，PMT 和各电极上需要加工作电压，通常使用电阻分压回路。图 2(c) 所示为分压回路的基本构成。通常光阴极面加负高压，在光阴极面、MCP 入口、MCP 出口及阳极之间用适当阻值的电阻进行外高压分压，把电压加在各电极上。

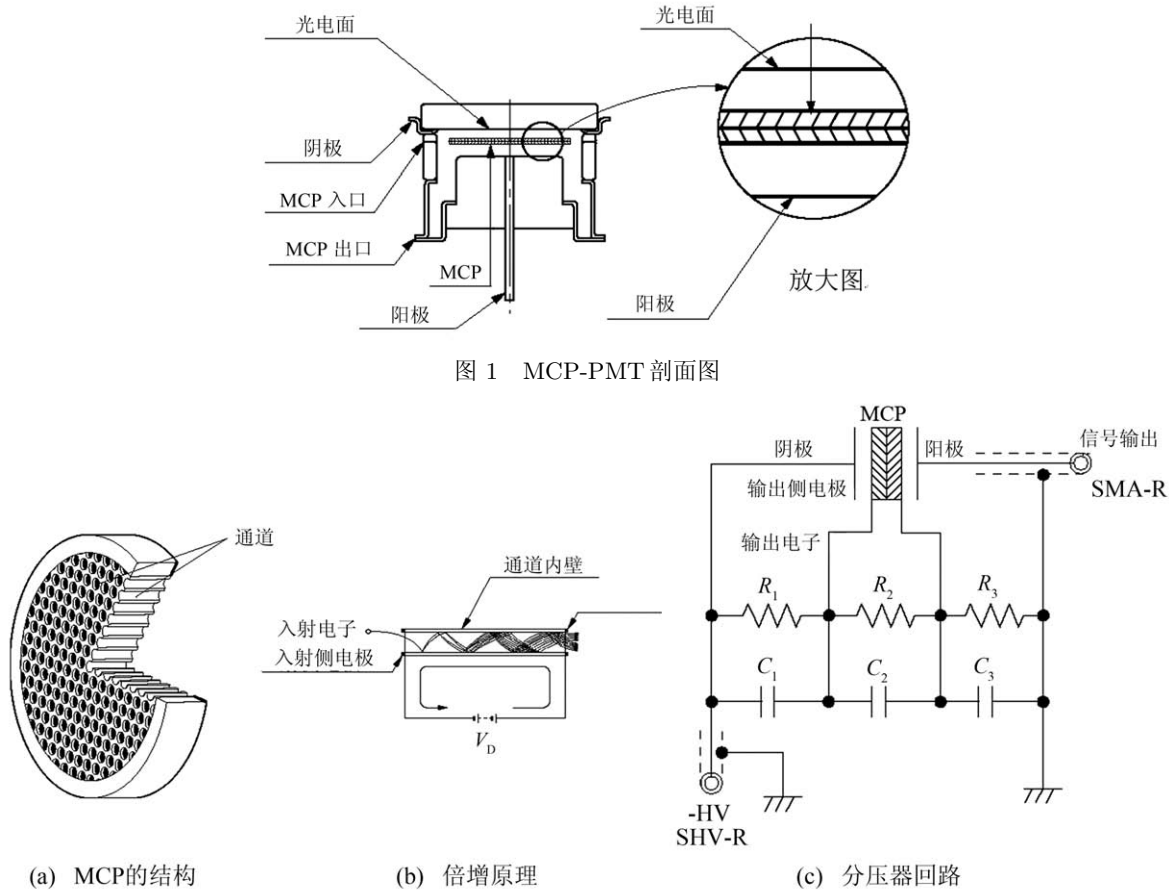


图 1 MCP-PMT 剖面图

图 2 MCP 构造和倍增原理及分压器回路

3 实验方法

3.1 双脉冲方法

本工作采用双脉冲方法测量 MCP-PMT 的脉冲线性特性。光源采用发光二极管 (light-emitting diode, LED)。双脉冲方法原理是: 让强弱两种 LED 脉冲光时间上交叠点亮, 并使它们各自脉冲的发光量之比预定为 $K:1$, 对于足够低的电流值的强弱脉冲光的输出为 I_{p02} , I_{p01} 时, I_{p02}/I_{p01} 应该和原来光亮成正比, 所以必然是 $I_{p02}/I_{p01} = K$ 。通过拉近距离、旋转偏振片、或者减少减光片的方法使对于 PMT 的光源的发光量增大, PMT 的输出电流也相应增大, 会导致线性偏离。对于弱脉冲光的输出为 I_{p1} , 对于强脉冲光的输出为 I_{p2} 时, 通常是具有高输出电流 I_{p2} 首先偏离线性。因此, 两脉冲的输出比为 $I_{p2}/I_{p1} < I_{p02}/I_{p01}$, 由此根据对于这两种脉冲的 PMT 的输出比 I_{p2}/I_{p1} 就可以测出线性参数曲线^[4]。线性偏离度为

$$\frac{\frac{I_{p2}}{I_{p1}} - \frac{I_{p02}}{I_{p01}}}{\frac{I_{p02}}{I_{p01}}} \times 100\% \quad (1)$$

如果是线性, 则有

$$\frac{I_{p2}}{I_{p1}} = \frac{I_{p02}}{I_{p01}} \quad (2)$$

工作中选择使用减光片的方法。减光片使用中性和减光片, 透过光谱范围覆盖 LED 灯发光光谱范围。暗箱示意图如图 3 所示。

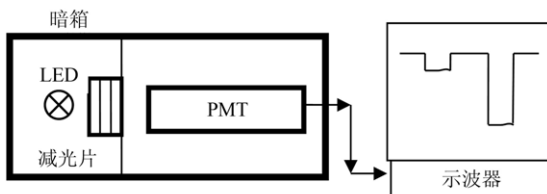


图 3 减光片方式双脉冲法示意图

通过改变给 LED 灯所加电压的时间宽度, 控制 LED 发光时间宽度, 使 LED 发出半宽度为 20 ns、100 ns 两种脉冲光。

3.2 LED光源

LED 是一种可将电能转变为光能的半导体发光器件, 属于固态光源。LED 的响应时间是标志反应速度

的一个重要参数。响应时间是指输入正向电流后 LED 开始发光和熄灭的时间。不同材料制得的 LED 响应时间各不相同。实验中选取采用材料为 GaAsP 的 LED, 较其它材料 LED 具有响应时间短的特点, 约为 10^{-9} s^[5], 能够满足发出 20 ns 宽度光脉冲的实验设计条件。

3.3 实验结果

实验采用 Hamamatsu 生产 R3809U-52 型 MCP-PMT, Hamamatsu 提供的 MCP-PMT 的各项属性列于表 2, 其阳极脉冲输出线性特性如图 4 所示。

表 2 Hamamatsu 提供 R3809U-52 型 MCP-PMT 特性参数

光阴极直径/mm	11
光谱相应范围/nm	160 ~ 850
增益	2.0×10^5
暗流/nA	10
直线性电流/nA	100
上升时间/ns	0.15
渡越时间/ns	0.55
渡越时间分散/ns	0.025

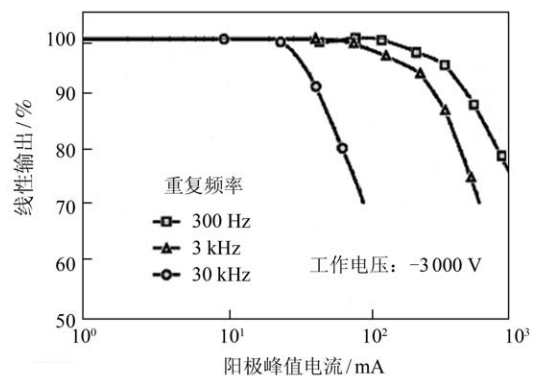


图 4 MCP-PMT 重复频率 300 Hz ~ 30 kHz 的脉冲线性结果

实验时, 给 MCP-PMT 所加的高压为 -3000 V, 从数字高压仪器上读出, MCP-PMT 回路链电流为 -0.078 mA, 由

$$R = \frac{U}{I} = \frac{-3000}{-0.078 \times 10^{-3}} \approx 3.85 \text{ M}\Omega \quad (3)$$

得到 MCP-PMT 分压回路总电阻为 $3.85 \text{ M}\Omega$ 。

两种不同宽度脉冲, R3809U-52 型 MCP-PMT 线性输出实验结果如图 5 所示。测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。黑色实线为使用二阶二项式拟合曲线。

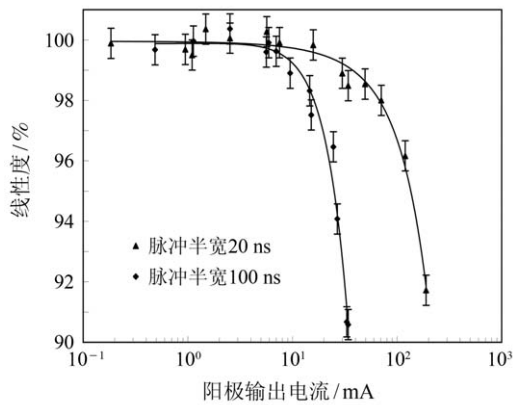


图 5 脉宽 20 ns、100 ns MCP-PMT 阳极输出电流线性变化曲线

如图 5 所示，当 LED 灯发出脉冲半宽度 20 ns 时，MCP-PMT 阳极脉冲电流输出 150 mA 时线性度

为 95%；相同线性偏离度下，当 LED 灯输出的脉冲宽度增加为 100 ns 时，阳极脉冲电流仅为 25 mA。选取偏离线性直线 5% 处为 MCP-PMT 的阳极脉冲线性电流值，将 Hamamatsu 提供的参数与本工作实际测量到的数据进行比较，列于表 3。

其中，实验中脉冲半宽度为 20 ns 和 100 ns 时，视为单次测量，脉冲频率为 1 Hz^[2]。表中所列 MCP-PMT 每秒输出总电荷量 Q 为：

$$Q = F \cdot q = F \cdot \int I(t) dt \approx F \cdot I_{\text{峰}} \cdot FWHM, \quad (4)$$

F ：脉冲重复频率，单位为 Hz； Q ：单个脉冲电荷量，单位为 C； $I(t)$ ：单个脉冲输出瞬时电流，单位为 mA； $I_{\text{峰}}$ ：输出电流峰值，单位为 mA； $FWHM$ ：波形半宽度，单位为 s。

表 3 MCP-PMT 不同宽度频率脉冲阳极线性输出比较

光源脉冲宽度/ns	重复频率/Hz	MCP-PMT 阳极脉冲线性电流(5%)/mA	MCP-PMT 每秒输出总电荷量/nC
0.05	300	350	5.25
0.05	3 k	100	15
0.05	30 k	25	37.5
20	1	150	3.0
100	1	25	2.5

3.4 分析

传统 PMT 脉冲输出偏离线性通常起因于两种效应：(1) 与大电流脉冲相联系的空间电荷效应；(2) 电阻分压器网络不能供给足够的电流来维持 PMT 倍增和其他电极处于恒定工作电位的分压器效应。对于 MCP-PMT，MCP 代替了传统倍增极的作用，探测器的非线性特性是由不灵敏时间 τ_d 引起，并受空间电荷效应的影响。

$$\tau_d = \frac{Q_{\text{out}}}{I_s}, \quad (5)$$

式中： τ_d 为不灵敏时间，单位为 s； Q_{out} 为单个通道的输出电荷量，单位为 C； I_s 为一个通道的传输电流，单位为 A。

重复频率低时的最大脉冲线性电流由空间电荷效应限制，是由单通道发射的电子数和通道数量的乘积决定；另一方面，重复频率高时的最大脉冲电流是由传输电荷与总电荷的比决定的，而总电荷又取决

于每个脉冲的电荷量与重复频率。MCP-PMT 回路电流即为单位时间内的传输电荷，实验中测量为 0.078 mC/s。从表 3 知，宽度为 50 ps，重复频率 30 KHz 脉冲下，每秒输出总电荷量最大；宽度为 100 ns 单次脉冲每秒输出总电荷量最小。阳极单位时间线性输出总电荷量随着重复频率的增加而减少，随着单脉冲宽度的增加而减小。这说明空间电荷效应的限制作用在脉冲宽度变大时，会表现得越发明显。虽然重复频率低和高只是相对值，对于特定的 MCP-PMT 类型和种类，需要通过具体实验才能得到在特定脉冲状态下真实的最大脉冲线性电流，但是，对于 Hamamatsu R3809U-52 型 MCP-PMT，由表 3 的数据及式 (4)，即

$$I_{\text{峰}} \approx \frac{Q}{F \cdot FWHM}, \quad (6)$$

可得脉冲半宽度 $t \leq 0.05$ ns 时，

$$I_{\text{峰}}(f) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{5.25}{f \cdot 0.05} = \frac{105}{f}, \quad 300 \leq f \leq 3000 \\ \frac{15}{f \cdot 0.05} = \frac{300}{f}, \quad 3000 \leq f \leq 30000 \\ \frac{37.5}{f \cdot 0.05} = \frac{750}{f}, \quad f \geq 30000 \end{array} \right\}; \text{单位: A。} \quad (7)$$

单次脉冲状态下:

$$I_{\text{峰}}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{3 \times 10^{-9}}{t}, \quad t \leq 20 \text{ ns} \\ \frac{2.5 \times 10^{-9}}{t}, \quad 20 \text{ ns} \leq t \leq 100 \text{ ns} \end{array} \right\}; \text{单位: A。} \quad (8)$$

对于本工作中用到的 Hamamatsu R3809U-52 型 MCP-PMT, 考虑重复频率高达 30 kHz 时, 由表 3 可知, 线性输出 (5%) 每秒总电荷为 37.5 nC; 考虑重复频率高的极限状态, 即为直流阳极输出线性电流, 从表 2 知, Hamamatsu 提供参数为 100 nA, 即每秒总电荷为 100 nC。

4 结论

本工作研究了 Hamamatsu R3809U-52 型 MCP-PMT 对半宽度为 20 ns 和 100 ns 两种脉冲信号的阳极线性输出电流, 分别为 150 mA 和 25 mA, 二者均为偏离线性曲线 5% 取值。理论分析了限制 MCP-PMT 脉冲线性电流的原因, 基于 Hamamatsu 提供的参数和实验数据的比较, 提供了将 R3809U-52 型 MCP-PMT 用于百纳秒宽度脉冲测量的线性电流动态范围递推公式。该型 MCP-PMT 可用于构建闪烁晶体时间响应特性测量系统, 实验测量了该型 MCP-PMT 用于测量宽度为 10 ~ 100 ns 的脉冲信号的阳极输出线性电流动态范围, 为使用该型 MCP-PMT 用于针对宽度为 100 ns 内脉冲信号测量的工作提供了借鉴和

参考。

参考文献:

- [1] ANASHIN V V, BESCHASTNOV P M, GOLUBEV V B, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 1995, **357**: 103.
- [2] LIU Qingzhao. The research of Measurement Technique of Pulse Radioactive Field[M]. Beijing: Science Publishing House, 1994: 148-149. (in Chinese)
(刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 148-149.)
- [3] HUANG Min, DAI Liying. Optoelectronic Technology, 1994, **14**(2): 151. (in Chinese)
(黄敏, 戴丽英. 光电子技术, 1994, 1994, **14**(2): 151.)
- [4] Hamamatsu Photonics Co.Ltd. Photomultiplier Tubes Basics and Application(Third Edition) [M]. Beijing: HAMAMATSU, 2010: 197-199. (in Chinese)
(日本滨松光子学株式会社. 光电倍增管基础及应用(第三版)[M]. 北京: 日本滨松光子学株式会社, 2010: 197-199.)
- [5] ZHOU Zhimin, ZHOU Jihai, JI Aihua. LED Lighting Engineering and Application circuit[M]. Beijing, Publishing house of electronics industry, 2009: 34-35. (in Chinese)
(周志敏, 周纪海, 纪爱华. LED 照明技术与应用电路[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 34-35.)

Research on Property of MCP-PMT's Pulse Output Linearity

CHEN Yuyu¹⁾

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: The double pulse method was applied to study the pulse linear current property of R3809U-52 type MCP-PMT (micro-channel plate photo-multiplier tube) from Hamamatsu Photonics Co.Ltd. When the FWHM of pulse are 20 and 100 ns, the pulse linear currents are 150 and 25 mA, respectively. According to the experiments results, we deduced the functions of pluses' FWHM lower than 100 ns with linear current, which extends the range of parameters available.

Key words: MCP-PMT; pulse linear current; double pulse method

Received date: 26 Jun. 2013; **Revised date:** 15 Jul. 2013

1) E-mail: cyy_xy@hotmail.com.

<http://www.npr.ac.cn>