

用于聚变中子探测的门控型微通道板光电倍增管

李奎念¹, 陈萍¹, 刘虎林¹, 赛小锋¹, 乔凯¹, 贺峦轩¹, 田进寿¹, 苏琥²,
李璟隆², 张翌航³, 董玉峰³, 李翔⁴, 陈俊锋⁴, 远晓辉^{2,5}, 张喆^{3,5,6}, 张杰^{2,3,5}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 超快诊断技术重点实验室, 陕西 西安 710119;

2. 上海交通大学 物理与天文学院 激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240;

3. 中国科学院 物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190;

4. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 201899;

5. 上海交通大学, IFSA 协同创新中心, 上海 200240;

6. 松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808)

摘要: 在激光聚变的快点火方案实验中, 使用大能量皮秒激光产生的快电子束快速加热预压缩的等离子体, 实现加热区点火。伴随着皮秒激光的快电子束输运, 会产生大量的高能、高强度脉冲伽马射线, 可能造成电流型中子飞行时间探测器的严重饱和, 对聚变中子的测量带来很大困难和挑战。中科院西安光机所研制出了高性能的门控型微通道板光电倍增管 (MCP-PMT), 并将其应用到神光 II-升级装置上开展的“双锥对撞”激光聚变快点火实验中的聚变中子探测, 应用结果表明, 以 MCP-PMT 为核心器件的闪烁体探测系统可在高强度伽马射线背景下实现聚变中子的有效测量。

关键词: 门控型微通道板光电倍增管 (MCP-PMT); 中子飞行时间探测器; 激光聚变; 快点火; 聚变中子

Gated Microchannel-Plate Photomultiplier Tube for Laser-fusion Neutron Detection

Li Kuinian¹, Chen Ping¹, Liu Hulin¹, Sai Xiaofeng¹, Qiao Kai¹, He Luanxuan¹, Tian Jinshou¹,

Su Xiao², Li Jinglong², Zhang Yihang³, Dong Yufeng³, Li Xiang⁴, Chen Junfeng⁴, Yuan

Xiaohui^{2,5}, Zhang Zhe^{3,5,6}, Zhang Jie^{2,3,5}

(1. Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision

Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Key Laboratory for Laser Plasmas, Ministry of Education and School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao

Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China;

4. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China;

5. Collaborative Innovation Center of IFSA (CICIFSA), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

6. Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China)

Abstract: In the fast ignition experiment relevant to the inertial confinement fusion, fast electrons generated by high-energy picosecond laser pulses are used to heat the highly compressed plasma to realize the hot-spot ignition. The fast electron heating process will produce a large amount of high-energy and high-intensity pulsed gamma rays, resulting in serious saturation of the current-type neutron time-of-flight detector, which brings great difficulties and challenges to the precise measurement of fusion neutrons. A series of high performance gated microchannel plate photomultiplier tubes (MCP-PMT) have been developed in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS and applied to Double-cone Ignition (DCI) laser fusion experiment performed in SGII Upgrade laser facilities. The results show that the scintillation detection system equipped with high performance MCP-PMT can effectively measure fusion neutrons with strong background of high-intensity gamma ray flash.

Keywords: Gated Microchannel Plate Photomultiplier Tube (gated MCP-PMT); Neutron Time-of-flight Detector; laser fusion; fast ignition; Fusion Neutron

1 应用背景

在激光聚变^[1-2]实验研究中，聚变中子产额是判断达到热核反应条件最灵敏和最直接的判据^[3]，中子能谱是反映燃料离子温度和面密度信息的重要参数^[4]。因此，聚变中子产额及其能谱的诊断是评价惯性约束聚变实验状态的重要依据，能够为实验设计提供直接反馈。

快点火是激光聚变实验的新型点火方案^[5]，该方案利用皮秒大能量超强拍瓦激光与等离子体相互作用产生的兆电子伏特快电子束对预压缩的聚变中心区域快速加热以实现点火。在方案中，皮秒激光产生的超热电子会因韧致辐射作用产生高强度的伽马射线（比聚变中子强度高几个数量级），极强的伽马射线会使中子探测器严重饱和而进入死区，给中子测量带来很大困难。为解决高强度伽马背景下的聚变中子诊断难题，使用门控型光电倍增管和短余辉、

快衰减闪烁体^[6]，并结合合理的屏蔽和准直设计，可在提高聚变中子探测效率的同时，最大程度削弱伽马射线的影响。

同伽马射线相比，聚变中子的运动速度慢，若将中子探测器置于离聚变反应区一定距离处，伽马射线将先到达探测器，使闪烁体发光。此时，门控型光电倍增管工作在关门状态，将不会对闪烁体发光进行光电转换和倍增。在伽马射线到达闪烁体之后、聚变中子到达闪烁体之前，使门控型光电倍增管工作在开门状态，即可实现在强伽马背景下测量聚变中子。

中国科学院西安光学精密机械研究所（简称西安光机所）研制出了系列高性能的具有门控功能的微通道板型光电倍增管（Gated Microchannel Plate Photomultiplier Tube，简称门控型 MCP-PMT），并应用于中国科学院战略性先导科技专项-新型激光聚变方案研究^[7]实验中的聚变中子测量，实现了强伽马背景下的聚变中子测量。

2 门控型 MCP-PMT 的研制

2.1 门控型 MCP-PMT 的原理

光电倍增管是一种可以将极微弱光信号转换成电信号并加以放大的光电探测器件，根据电信号倍增方式的不同，可将 PMT 分为传统打拿极 PMT、微通道板型 PMT 以及 SiPM。与传统打拿极 PMT 和 SiPM 相比，MCP-PMT 具有时间响应快、结构紧凑、暗电流低等特点。MCP-PMT 主要由管壳、光电阴极、MCP 倍增系统以及阳极组成。其中，MCP 是由上百万个直径 6~25 μm 的微通道组成的板状结构，每个单通道内表面覆盖有二次电子发射材料，可视为一个独立的二次电子倍增器。MCP-PMT 基本倍增原理如图 1 所示，入射光在光阴极作用下转化为光电子，光电子经电场加速后被收集进入 MCP 通道内并碰撞其内壁激发出二次电子，二次电子在 MCP 通道内电场的作用下会再次加速，如此反复碰撞，最终从阳极得到放大的电信号。

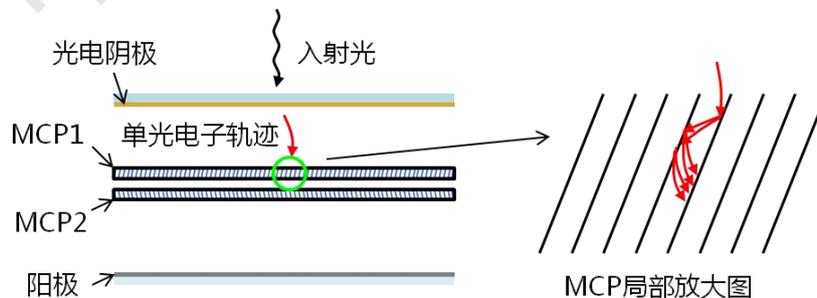


图 1 典型 MCP-PMT 工作原理示意图

门控型 MCP-PMT 在光电阴极和 MCP 之间增加了门控电极，通过改变阴极与门控电极之间的电势差来控制阴极发射电子的运动方向，实现对光电子的截止与选通。当 MCP-PMT

各电极施加工作电压，门控电极电位高于光电阴极电位，阴极出射电子被束缚在光电阴极表面，而无法到达 MCP，此时 MCP-PMT 工作在截止状态；当有门控信号施加在门控电极上时，门控电极电位低于阴极电位，此时光电阴极出射的电子可通过门控电极到达 MCP，从而实现 MCP-PMT 的门控选通。

2.2 门控型 MCP-PMT 研制流程

门控型 MCP-PMT 的研制流程包括电子光学方案设计、结构设计、制备条件检测与改造、零部件的加工与检测、部件的前处理以及装配、倍增管制备以及性能测试等，如图 2 所示。

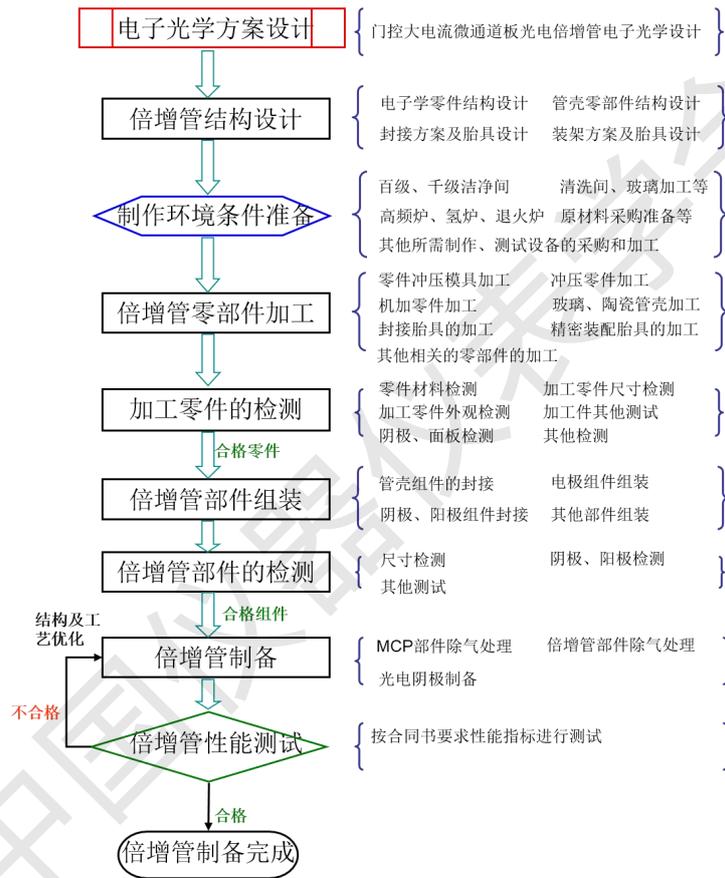


图 2 门控型 MCP-PMT 研制流程

3 门控型 MCP-PMT 的性能

3.1 基本性能

门控型 MCP-PMT 是中子探测器的关键部件，西安光机所研制的门控型 MCP-PMT 的内部结构和外观实物如图 3 所示。

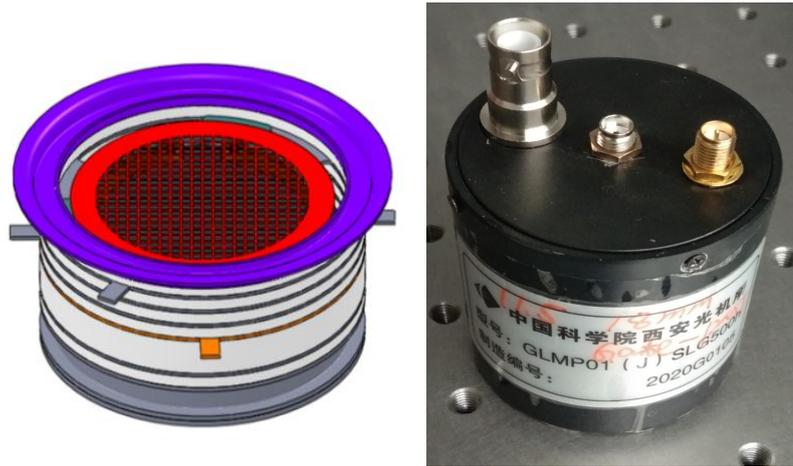


图3 西安光机所研制的门控型 MCP-PMT 内部结构（左）及实物（右）

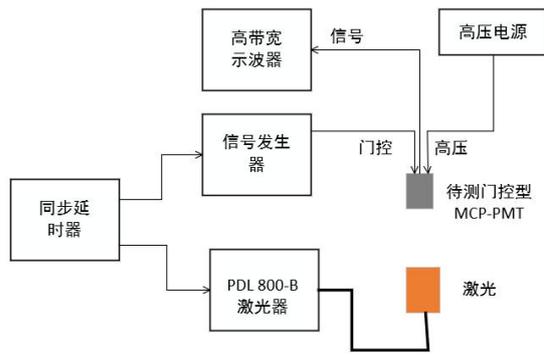
表 1 列出了西安光机所研制的 MCP-PMT 的基本参数，同时也给出了日本滨松光子同类型产品（R5916U-50[8]）的相关参数。

表 1 门控型 MCP-PMT 基本参数

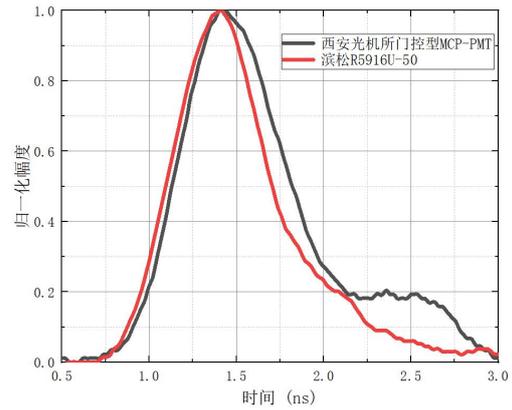
参数	西安光机所门控型 MCP-PMT	滨松 R5916U-50
光阴极有效直径	18mm	10mm
光阴极量子效率@400nm	10%~13%	~12%
典型增益	5E5	5E5
开门噪声	<±2mV	<±5mV
门控建立时间	<5ns	<5ns
门控电压	>10V	>10V
消光比@450nm	>1E4	>1E4

3.2 时间响应

MCP-PMT 具有快时间响应的特点，图 4 是使用 PDL-800B 皮秒激光器测试门控型 MCP-PMT 时间响应的示意图和测试结果，图 4（a）是测试示意图，图 4（b）是西安光机所门控型 MCP-PMT 的时间响应测试结果，并给出了滨松 R5916U-50 的时间响应。与滨松 R5916U-50 相比，西安光机所门控型 MCP-PMT 的上升时间与滨松 R5916U-50 相当，时间响应半高宽略大于滨松 R5916U-50。



(a) 时间响应测试示意图



(b) 时间响应测试结果

图 4 时间响应测量连接及结果

3.3 信噪比

MCP-PMT 输出波形的噪声成分由没有入射光时的噪声成分（光阴极面发射的热电子产生的暗电流）和信号光产生的噪声成分（信号电流产生的散粒噪声）组成，信噪比可用交流噪声成分的等效直流值来表示：

$$SNR = i_p (r.m.s.) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - I_p)^2}{n}}$$

其中，SNR 是信噪比， i_p 是交流噪声成分的等效直流值， x_i 是信号幅度， I_p 是信号平均值。

图 5 是使用中心波长 450nm 的 LED 测试西安光机所门控型 MCP-PMT 和滨松 R5916U-50 信噪比[9]的结果。图 5 的测试结果是在西安光机所门控型 MCP-PMT 和滨松 R5916U-50 相近增益条件下得到的，保持 MCP-PMT 的工作电压（增益）不变，改变 LED 光强，得到信噪比随信号幅度的变化。与滨松 R5916U-50 相比，西安光机所门控型 MCP-PMT 的信噪比优于滨松 R5916U-50。

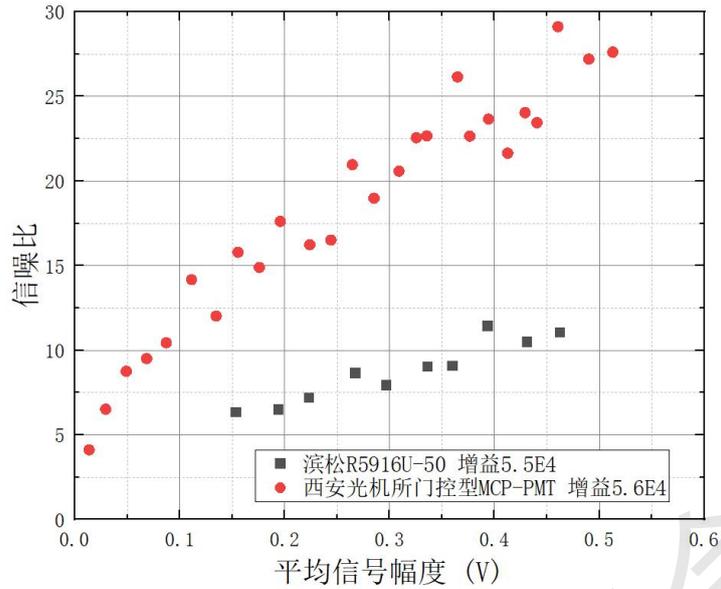


图5 门控型 MCP-PMT 信噪比随信号幅度的变化

4 典型的聚变中子信号

用于强伽马背景下聚变中子测量的中子探测系统主要由门控型 MCP-PMT、快猝灭短余辉闪烁体、准直屏蔽体等三部分组成。图 6 是在快点火实验中液闪中子飞行时间探测器采集的典型数据，如图中标注所示，在时刻 A，伽马射线先到达探测器，此时门控型 MCP-PMT 工作在关门状态。伽马射线与闪烁体相互作用产生的荧光不会被转换、放大，探测器记录的是伽马射线穿透屏蔽体直接与 MCP 相互作用产生的信号。从时刻 B 开始，MCP-PMT 工作在开门状态，MCP-PMT 对闪烁体发光进行光电转换和放大输出。由于伽马射线极强，尽管使用快猝灭短余辉闪烁体，伽马射线引起的闪烁体余辉仍然较强，MCP-PMT 开门之后的信号表现为闪烁体的余辉效应，其强度呈指数式衰减。在时刻 C，聚变中子到达闪烁体，使闪烁体发光，表现为叠加在闪烁体余辉本底上的聚变中子峰。

图 6 中也给出了相同实验条件（同一发次）下，滨松 R5916U-50 输出的波形。西安光机所的门控型 MCP-PMT 与滨松 R5916U-50 的工作增益相当，可以看出，西安光机所的门控型 MCP-PMT 的信号幅度大于滨松 R5916U-50 的信号幅度，且中子信号的对比度（中子信号强度/本底信号强度）也优于滨松 R5916U-50，这与西安光机所门控型 MCP-PMT 的有效光阴极直径较大，对闪烁光收集效率高相关。

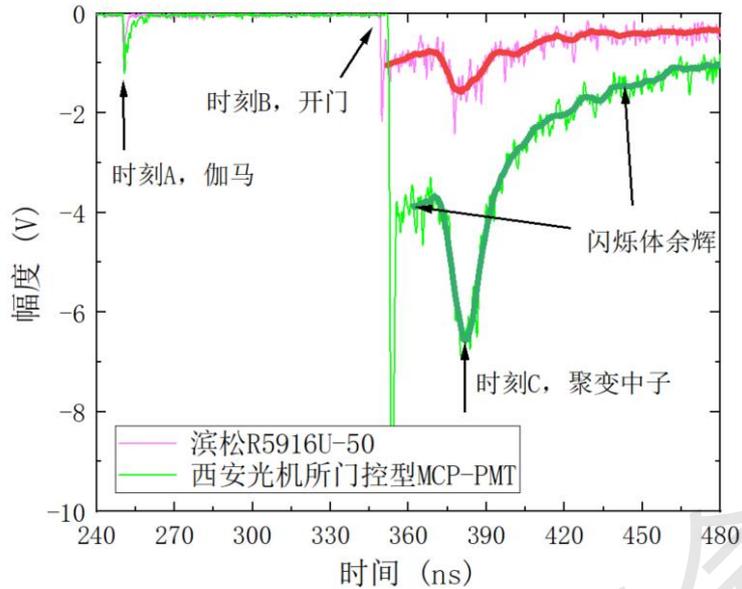


图 6 典型的聚变中子信号

5 总结

以门控型 MCP-PMT 为核心部件的闪烁探测器可有效解决快点火实验中强伽马背景下聚变中子测量的难题，西安光机所研制出了性能优异的门控型 MCP-PMT，并新型激光聚变方案研究的中科院 A 类战略性先导专项实验中的聚变中子测量中，配合合适的闪烁体和合理的辐射准直屏蔽设计，实现了强伽马背景下的聚变中子测量。与滨松同类型 MCP-PMT (R5916U-50) 相比，西安光机所研制的 MCP-PMT 具有光收集效率高（光阴极面积大）、信噪比高的特点，更适于强干扰背景下弱信号的测量。另外，结合飞行时间法，西安光机所研制的门控型 MCP-PMT 也可应用于强伽马背景下其它带电粒子（如质子、 α 粒子）的测量。

参考文献:

- [1] Betti R, Hurricane O. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. Nature Phys, 2016, 12: 435–448 .
- [2] Ping Y, Smalyuk V A, Amendt P, et al. Enhanced energy coupling for indirectly driven inertial confinement fusion[J]. Nature Phys, 2019, 15: 138–141.
- [3] Forrest C J, Radha P B, Knauer J P, et al. First Measurements of Deuterium-Tritium and Deuterium-Deuterium Fusion Reaction Yields in Ignition-Scalable Direct-Drive Implosions[J]. Phys Rev Lett, 2017, 118(9):1-5.
- [4] 康小涛. 用大阵列诊断燃料面密度的方法研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009.

- [5] Azechi H, Mima K, Shiraga S, et al. Present status of fast ignition realization experiment and inertial fusion energy development[J]. Nucl Fusion, 2013, 53(10): 104021.
- [6] Nagai T, Nakai M, Arikawa Y, et al. The development of the neutron detector for the fast ignition experiment by using LFEX and gekko XII facility[J]. Plasma Fusion Res, 2014, 9(3):1-4.
- [7] Zhang J, Wang W M, Yang X H, et al. Double-cone ignition scheme for inertial confinement fusion[J]. Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci, 2020, 378(2184):1-11.
- [8] 滨松. 微通道板光电倍增管R5916U-50[EB/OL].
https://www.hamamatsu.com.cn/cn/zh-cn/product/optical-sensors/pmt/pmt_tube-alone/mcp-pmt/R5916U-50.html
- [9] 跨田 敏一. 光电倍增管基础与应用[M]. 赵静, 付世鹏, 安保国, 等, 译. 3版. 日本: 滨松光子学株式会社, 2005: 73.