

一种大尺寸微通道板型光电倍增管

孙建宁¹,任玲¹,丛晓庆¹,黄国瑞¹,金睦淳¹,李冬¹,刘虎林³,乔芳建¹,钱森²,司曙光¹,
田进寿³,王兴超¹,王贻芳²,韦永林³,辛丽伟³,张昊达¹,赵天池²

(1. 北方夜视技术股份有限公司,江苏南京 211100; 2. 中国科学院高能物理研究所,北京 100049;
3. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西西安 710119)

摘要:针对高能物理、核物理等国家大科学装置对核心探测器件的需求,研究不同于金属打拿极型倍增系统的大尺寸微通道板型光电倍增管。该光电倍增管最主要的特点是具有 20 in(1 in=2.54 cm)的低本底玻壳和微通道板型倍增极结构,使用 Sb-K-Cs 阴极作为光电转换阴极,该阴极对 350~450 nm 波段光子的量子效率高,倍增极采用两片微通道板,在电压比较低的情况下可实现 10^7 的倍增能力,从而提高了光电倍增管的探测效率和单光子探测能力。与传统的金属打拿极型光电倍增管相比,20 in 微通道板型光电倍增管是一种全新的产品结构,具有单光子峰谷比高、本底低、响应时间快、后脉冲比例小等特点。

关键词: 光电倍增管; 微通道板; 量子效率; 低本底

中图分类号: TN152 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0402001

Large-area micro-channel plate photomultiplier tube

Sun Jianning¹, Ren Ling¹, Cong Xiaoqing¹, Huang Guorui¹, Jin Muchun¹, Li Dong¹, Liu Hulin³,
Qiao Fangjian¹, Qian Sen², Si Shuguang¹, Tian Jinshou², Wang Xingchao¹, Wang Yifang²,
Wei Yonglin³, Xin Liwei³, Zhang Haoda¹, Zhao Tianchi²

(1. North Night Vision Technology Co., Ltd, Nanjing 211100, China;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: According to the requirement of detector in high energy physics and nuclear physics national scientific equipment, the large-area micro-channel plate photomultiplier(MCP-PMT) different from dynode PMT was researched. The large-area MCP-PMT had low-background glass and microchannel plate multiplier. Using Sb-K-Cs as photocathode, MCP-PMT enjoyed very high quantum efficiency at 350-450 nm. With double MCPs as electron amplifier, the gain could reach 10^7 . The detection efficiency and single photon detection of large-area PMT was improved. Compared with conventional dynode PMT, this MCP-PMT is a completely new design in structure and has better ratio of spectrum peak to valley, high gain, better anode uniformity, fast response time in single photoelectron detection.

Key words: photomultiplier; microchannel plate; quantum efficiency; low background

收稿日期:2016-08-05; 修订日期:2016-09-10

基金项目:国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项(2016YFF0100400)

作者简介:孙建宁(1970-),男,研究员,硕士,主要从事光电倍增管、微通道板制备等方面的研究。Email:sjn@nvt.com.cn

0 引言

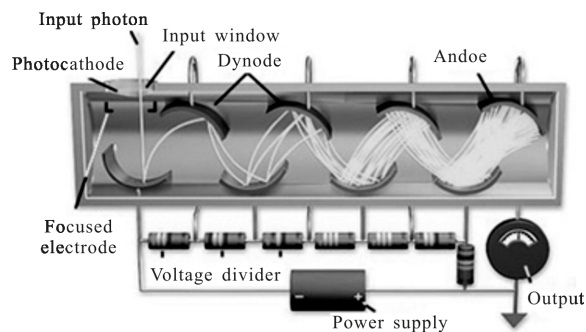
光电倍增管(PMT)是一种将极微弱光信号转变成电信号的真空电子器件,在高能物理、分析仪器、医疗仪器、石油勘探和核爆检测等领域有着广泛应用^[1-4],其中 PMT 在高能物理领域作为中心探测器内的液体闪烁体“捕获”中微子时放出的微弱光信号转变为电信号的关键器件,其尺寸和性能将影响中微子实验的建设费用及探测精度^[5]。中微子研究作为国际物理发展前沿研究领域,世界主要强国在该研究领域竞争激烈,纷纷投入大量的资金开展此类研究^[6-9],对 PMT 的需求也日益迫切。国外 PMT 研制和生产厂商有日本 Hamamatsu(滨松)公司、英国 ET 公司、美国 BURLE 公司、法国 Photonis 公司、俄罗斯 BINP 和 MELZ 公司,其中 Photonis 已经停产普通 PMT 的生产。国内主要的 PMT 生产厂商有:北方夜视技术股份有限公司、中国电子科技集团公司第五十五研究所、北京滨松光子技术股份有限公司、北京中核控制系统工程有限公司、华东电子管厂、海南展创光电技术有限公司和北京高新贝森公司等。目前,世界上 PMT 最大尺寸为 20 in(1 in=2.54 cm),国外只有日本滨松公司有能力和生产,国内只有北方夜视技术股份有限公司。

以中国科学院高能物理研究所所承担的中国科学院战略性先导科技专项——江门中微子实验为牵引,项目组设计大尺寸微通道板型光电倍增管(MCP-PMT)结构,攻克高量子效率、低本底玻壳制造、高增益低噪声和关键瓶颈设备制造等关键技术,研制大尺寸 MCP-PMT,搭建大尺寸 MCP-PMT 测试系统,测试与评估大尺寸 MCP-PMT 性能参数。

1 光电倍增管工作原理

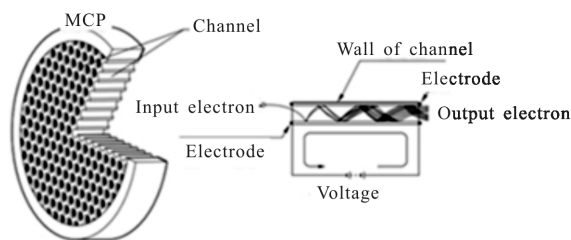
光电倍增管分为传统的打拿极型 PMT 和 MCP-PMT 两种。打拿极型倍增极系统工作原理如图 1(a)所示,入射光透过输入窗打到光电阴极上,激励光电阴极向真空中发射光电子,光电子经聚焦电极汇聚到第一打拿极上,进行二次电子倍增,每次电子数目倍增 $\delta \geq 2$ 倍以上,在外接电源直流电压控制下,这些二次电子继续在电场作用下,碰撞后打拿极得以倍增,从而使阳极收集到的电子数目倍增了

$G=8^n$ 倍,通常 G 可以达到 10^6 以上;与打拿极型 PMT 不同,MCP-PMT 的电子倍增器是由一个个微孔排列组成的微通道板,MCP 型倍增极系统的工作原理如图 1(b)所示,经聚焦电极汇聚到微通道板孔内的电子可以多次碰撞微孔内壁,发射二次电子,多次倍增后的电子出孔后被阳极收集或者根据增益需要进入下一块微通道板继续倍增,增益可以达到 10^7 以上。一块微通道板的厚度在 0.5mm 左右,比打拿极体积小很多,结构紧凑,更适用于大尺寸光电倍增管。



(a) 打拿极型

(a) Dynode



(b) 微通道板型

(b) MCP

图 1 PMT 工作原理示意图

Fig.1 Diagram of PMT working theory

2 大尺寸 MCP-PMT 设计理念

目前,国际上有许多公司可以研制高性能小尺寸 PMT,其中日本滨松公司生产的小尺寸的 Super Bialkali(SBA)和 Ultra Bialkali(UBA)光电阴极在峰值 380 nm 左右的量子效率分别为 35%和 43%,代表了目前国际上双碱光电阴极的最高水平。Hiroyuki Sekiya 认为^[10],SBA 的量子效率提高是由于损耗的降低,而 UBA 是量子效率公式中相关系数的增强,它和阴极材料的组分、纯度和沉积技术有很大关系,但是就目前技术水平而言,这种应用在小尺寸上的高量子效率的制造技术还无法直接转移到大尺寸

PMT 上。日本滨松公司 20 in 打拿极型 PMT 如图 2(a) 所示,其在 410 nm 处的量子效率技术水平目前处于 33%~36%之间。

文中提出的一种采用 MCP 作为倍增极的 20 in 光电倍增管^[3],如图 2(b)所示,其倍增极由两片 MCP 代替传统打拿极结构,可以实现 10^7 的倍增能力;一片 MCP 的厚度在 0.5 mm 左右,远远小于打拿极型倍增极体积。

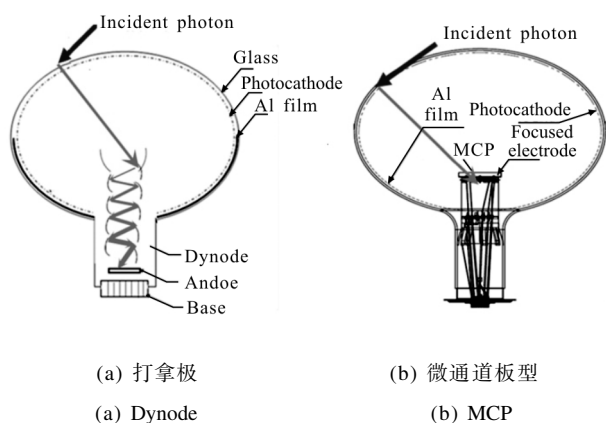


图 2 不同倍增极结构的 20 in PMT

Fig.2 Different multiplier structures of 20 in PMT

该公司采用转移设备研制的 20 in MCP-PMT 主要包括玻壳、光电阴极和阳极组件,如图 3 所示。其中,阳极组件由聚焦极、两片 MCP 和阳极片组成,玻壳上球面呈现的透明金黄色为 K_2CsSb 光电阴极,下球面为不透明银色铝膜,铝膜起到了补充电子和反射光子的作用,整个玻壳为椭球形状,从球顶到可伐盘高度为 555 mm,俯视椭球赤道直径为 508 mm。与传统的金属打拿极型光电倍增管相比,20 in MCP-PMT 具有单光子峰谷比高、本底低、响应时间快、后脉冲比例小等特点。



图 3 20 in MCP-PMT 实物图
Fig.3 Picture of 20 in MCP-PMT

3 大尺寸 MCP-PMT 关键技术

3.1 高性能阴极制备技术

双碱光电阴极为层状结构,基底层为 K_2CsSb ,表面层为交替蒸镀 Sb、Cs 形成的 Sb-Cs 偶极层,可以降低阴极表面亲和势^[10]。在激活过程中,严格控制表面层的厚度,使表面尽量薄,处理次数不能过多。经过 Sb、Cs 处理后,形成表面能带弯曲,使表面电子亲和势下降,提高电子逸出几率,从而提高光电发射能力。

阴极制备前选取碱源材料,以减少阴极材料晶格缺陷,降低杂质吸收,从而提高激发电子几率。在阴极衬底上制作增透膜以减少入射光反射损失,此薄膜还可以阻止阴极体内的电子向衬底方向扩散,有利于提高阴极性能。在阴极制备过程中,采用光电流监控和反射率监控相结合的多信息实时监控系统对阴极的光电流、厚度、生长速率、结构成分等参数进行测定,以制作高量子效率光电阴极,如图 4 所示。结合反射率监控和光电流监控,利用转移设备制作光电阴极量子效率最大值达到 31.64%。

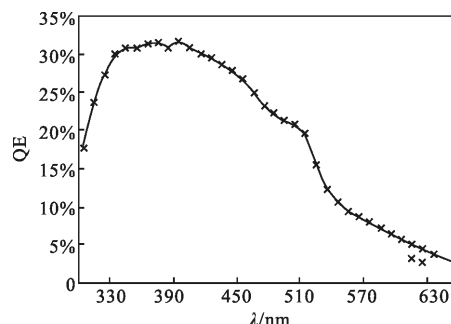


图 4 在双碱阴极的基础上改进的高量子效率光阴极的光谱响应曲线

Fig.4 Spectrum response curve of high quantum efficiency photocathode based of the bialkali photocathode

3.2 低本底玻壳制作技术

光电倍增管中放射性元素含量将影响本底噪声,从而影响 PMT 的取数效率,而玻壳在光电倍增管整管重量中所占权重最大,因此,如何降低玻壳本底是关键技术之一。利用低本底伽玛谱仪研究原材料及其玻璃成形过程中各中间态的放射性元素 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 的含量,分析现有各组件的放射性本底及其对 PMT 的影响,研究玻壳及其过渡节玻璃、陶瓷件等主要原材料的来源及其降低放射性本底的

技术路线,通过对构成玻壳的原材料及其熔炼过程的低本底测试和监控,优化玻壳所用原材料,以确保整管的放射性同位素满足用户技术指标规定的要求。目前,放射性元素 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 本底值分别达到 $1.03 \pm 0.03 \text{ Bq/kg}$ 、 $0.5 \pm 0.02 \text{ Bq/kg}$ 和 $0.63 \pm 0.13 \text{ Bq/kg}$,还有进一步降低的趋势。

3.3 低噪声高增益 MCP 制造技术

普通 MCP 实现电子倍增是通过还原铅硅酸盐玻璃以获得二次电子发射能力来实现,为了提升光电倍增管性能,光电倍增管探测用 MCP 采用特殊倍增极材料,在 MCP 使用前,对其进行电子清刷处理,研究不同电子源对 PMT 单光电子谱峰谷比的影响,保障 MCP 具备低噪声高增益性能,同时兼顾 PMT 寿命。

3.4 三工位阴极转移设备研制技术

三工位阴极转移设备是 20 in MCP-PMT 研制的核心设备,直接影响光电倍增管的核心性能和产品的质量和良品率。该设备具备真空抽气、高温烘烤、阴极制作、电子清刷和钢封加热等功能,是高真空、机械、电子、计算机相结合的高新技术设备,工作精度高、技术性能、结构十分复杂,真空度要求高。

三工位阴极转移设备总体设计思路是通过玻壳旋转、各组件升降来完成转移动作,如图 5 所示,真空腔体为钟罩式,可升降,腔体上设置多个观察窗口;旋转夹具设置在机架的底板上,支撑 3 个玻壳并可以绕中心轴旋转,玻壳可以在阴极工位和 MCP 工位上转移切换;机架底部设置 3 个 MCP 组件腔体和 3 个阴极组件腔体,各个组件可以在其腔体内升降;抽气系统设置在台面下,选用合适抽速的真空泵来实现高真空。

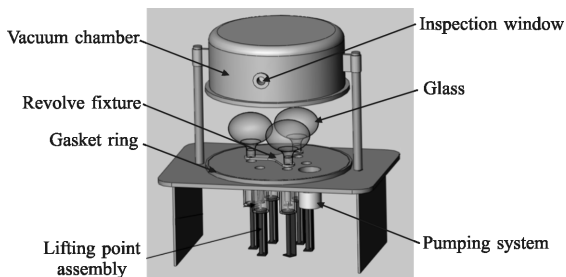


图 5 三工位阴极转移设备示意图

Fig.5 Diagram of photocathode transfer equipment with three stations

4 大尺寸 MCP-PMT 测试与性能研究

使用自主研发的静态测试台和动态参数测试台,如图 6 所示,分别测试 2 856 K 色温光照下阴极光照灵敏度和单光电子谱。PMT 工作在增益为 1×10^7 的工作电压下,稳定 30 min 后使用微电流计测试暗电流,通过使用高速 LED,调节脉冲发生器的脉冲幅度实现对所驱动 LED 光强进行缓慢调节,得到单光子信号光源,测试单光电子谱,通过双高斯函数拟合单光电子谱,测试出 PMT 单光电子谱的峰谷比、信号能量分辨率,使用点光源扫描测试整管阴极面不同区域位置的探测效率。使用时数转换器测试样管脉冲信号过阈值的时间,通过统计直方图方法统计不同过阈值的时间,采用高斯拟合求出半高宽时间,即为样管的渡越时间离散(TTS),随后使用带宽为 1 GHz 示波器测试脉冲信号 10%最大幅度值上升到 90%最大幅度值的时间,即脉冲信号上升时间。



(a) 静态测试

(b) 动态测试

(a) Static testing

(b) Dynamic testing

图 6 测试台实物图

Fig.6 Diagram of PMT testing equipment

对于中微子探测用的大尺寸 PMT,其光阴极的均匀性也是评价 PMT 性能好坏的一个关键参数。由于这种大球形或者大椭圆形 PMT 的质量和体积较大,需要设计专门的均匀性扫描测试平台来评估大尺寸 MCP-PMT 的均匀性性能。

项目组采用了一种三维扫描测试大尺寸 PMT 均匀性的方法,使用单片机控制转台和灯架,配合脉冲信号驱动 LED 光源,通过光纤将光源传输到被测 PMT 表面,配合旋转平台和灯架,实现对放置于旋转平台上的大尺寸 PMT 均匀性三维扫描。依据此方法,设计实现了一种三维扫描测试大尺寸 PMT 均匀性的装置,具体机械结构如图 7 所示,由单片机、固定装置、旋转装置、扫描光纤装置等组成。

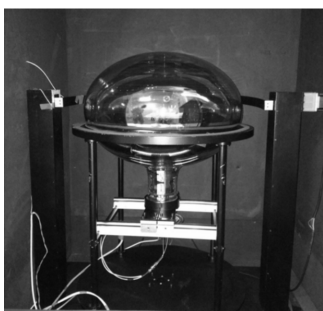


图 7 大尺寸 PMT 均匀性三维扫描装置

Fig.7 Three-dimensional testing equipment of large-area PMT uniformity

基于以上PMT测试系统,测试了自主研发型号为GDB-6201的20in MCP-PMT和日本滨松型号为R12860的20in打拿极型PMT主要性能参数,如表1所示。

表 1 20 in 打拿极型 PMT 与 MCP-PMT 性能参数对比

Tab.1 Performance comparison of 20 in dynode-PMT and MCP-PMT

Parameters	GDB-6201	R12860
Detection efficiency	27.2%	27.6%
Peak to valley ratio	3.5	3.0
Gain	1×10^7	1×10^7
Dark rate@0.25 PE, 10^7 Gain, 22 °C	30 kHz	25 kHz
Duration at half height	12 ns	2.8 ns
After pulse rate	3%	10%
Rise/fall time	1.7 ns/12 ns	6.6 ns/14.8 ns

从表 1 可以看到,GDB-6201 的个别指标如单光子谱峰谷比、前/后脉冲比例、信号上升/下降时间等参数的性能达到国际先进水平。

在中微子探测中,PMT 的探测效率也是一个重要参数,它的表达式为:

$$DE=QE \times CE \tag{1}$$

式中:DE 为 PMT 的探测效率;QE 为光电阴极的量子效率;CE 为电子的收集效率。日本滨松 R12860 20 in PMT 的量子效率为 30%左右,电子收集效率在 92%左右,即探测效率可以达到 27.6%;GDB-6201 的量子效率为 27.5%左右,电子收集效率为 99%左右,探测效率为 27.2%。由此可以得出,自主研发的 GDB-6201 虽然在量子效率方面略低于滨松,但是

由于采用了新型的双 MCP 倍增极结构,其探测效率通过收集效率的提高得到了弥补。

5 结 论

大尺寸 MCP-PMT 的研制是助力江门中微子实验项目,攻克了高量子效率、低本底、高增益低噪声等关键技术,与传统的金属打拿极型光电倍增管相比,20in 微通道板型光电倍增管是一种全新的产品结构,具有单光子峰谷比高、本底低、响应时间快、后脉冲比例小等特点。大尺寸 MCP-PMT 的开发成功,不仅使国内的 PMT 技术水平突飞猛进,形成具有我国自主知识产权的技术体系,满足国家重点工程的配套需求,未来还可以发展多种类、多系列的 PMT,并在分析仪器、医疗仪器、石油勘探和核爆检测等领域占领更多国际市场,具有极强的经济效益及社会意义。

参考文献:

- [1] Hamamatsu. Photomultiplier Tubes Basics and Application [M]. Third edition. Japan: Hamamatsu, 2006.
- [2] Matsuoka K. Development and production of the MCP-PMT for the Belle II TOP counter [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2014, 766:148-151.
- [3] Qian S. The 20 inch MCP-PMT R&D in China: report of the 16th international workshop on next generation nucleon decay and neutrino detectors (NNN16)[R], 2016.
- [4] Chen Chengjie, Xu Zhangbu. Photomultiplier Tube [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1988. (in Chinese)
- [5] Cao Jun. Daya Bay and Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO) neutrino experiments[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2014, 44: 1025-1040. (in Chinese)
- [6] Chang Y P, Huang G R, Heng Y K, et al. The R&D of the 20 inch MCP-PMTs for JUNO [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2016, 824: 143-144.
- [7] Super-Kamiokande Official Website [J/OL]. [2016-10-15]. <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>.
- [8] Szczerbinska B. Long baseline neutrino experiment [J]. *Acta Physica Polonica*, 2010, 41(7): 1719-1726.
- [9] Sekiya H. Review of photo-sensor R & D for future water Cherenkov detectors: report of the 12th International Workshop in Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN11)[R], 2010.
- [10] Chang B K. Theory and control technology of large area MCP-PMT K2CsSb photocathode [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(8): 455-462. (in Chinese)