

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.05.020

# 液氩探测器的低温 PMT 性能测试

何超<sup>1</sup>, 刘书魁<sup>2</sup>, 幸浩洋<sup>2</sup>, 林兴德<sup>2</sup>, 朱敬军<sup>1</sup>

(1. 四川大学原子核科学技术研究所 辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610064;

2. 四川大学物理学院, 成都 610064)

**摘要:** 中国暗物质实验(China dark matter experiment, CDEX)拟使用液氩探测器作为高纯锗探测器的反符合探测器,其使用的光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)需能长期稳定地工作在液氩温度(87.3 K)下. PMT 在使用前,须掌握其在低温下的性能情况. 文章分别在室温和低温环境中测试了 ETL 9357FLA 型光电倍增管,获得了单光电子响应、暗计数率以及低温环境中运行的稳定性等重要实验结果. 通过详细地对比和分析室温和低温环境中 PMT 的性能表现,确认该型 PMT 能在低温环境中正常运行.

**关键词:** 光电倍增管; 液氩探测器; 单光电子响应

**中图分类号:** TL813 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)05-921-05

## Low temperature PMT performance test for liquid argon detector

HE Chao<sup>1</sup>, LIU Shu-Kui<sup>2</sup>, XING Hao-Yang<sup>2</sup>, LIN Xing-De<sup>2</sup>, ZHU Jing-Jun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of Ministry of Education, Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** China dark matter experiment (CDEX) intends to use liquid argon detector as an anti-coincidence detector for high-purity germanium detectors. The photomultiplier tube used in the liquid argon detector needs to be able to work stably for a long time under the liquid argon temperature (87.3 K). Before using the PMT, we need to know its performance under low temperature. In this paper, the ETL 9357FLA photomultiplier tube was tested at room temperature and low temperature respectively, and important experimental results of single photoelectron response, dark count rate and stability in low temperature environment were obtained. According to the detailed comparison and analysis of PMT performance in the room temperature and low temperature environment, we confirmed that this type of PMT can work properly in low temperature environment.

**Keywords:** PMT; Liquid argon detector; Single photoelectron response

## 1 引言

CDEX 的目标是建设吨量级的高纯锗探测器,随着未来高纯锗探测器的体积不断增大,考虑到高

纯锗探测器工作在低温环境下,并需要尽量降低周围环境中本底的影响,低温液体闪烁体探测器就成为了高纯锗探测器的反符合探测器的最佳候选者之一<sup>[1]</sup>. 其中,液氩是一种比较理想的材料,可以提

收稿日期: 2018-03-16

基金项目: CDEX 合作组专项基金 (13H0820)

作者简介: 何超(1992-), 男, 湖南衡阳人, 硕士, 研究方向为核技术及应用. E-mail: 935430351@qq.com

通讯作者: 朱敬军. E-mail: zhujingjun@scu.edu.cn; 幸浩洋. E-mail: kevinxhy@163.com

供低温环境,高纯液氩本身还是一种良好的低温液体发光材料,可以把它用于高纯锗的反符合探测器.通常对闪烁光的读出需要使用光电倍增管,对液氩探测器而言,就需要使用在低温下能稳定工作的光电倍增管<sup>[2]</sup>.我们采购了大口径的 ETL 9357FLA 型光电倍增管,并在低温环境下对其性能和稳定性进行了测试.由于液氮温度(77 K)略低于液氩温度,并且考虑到液氮价格远低于液氩,前期测试使用液氮代替液氩进行 PMT 低温实验.

## 2 实验原理

### 2.1 单光电子响应

PMT 的单光电子响应是指弱光照射到 PMT 光阴极后,只有一个光电子被第一打拿极接收,并经过多级倍增后阳极输出的响应信号.拟合该响应信号电荷谱就可以得到 PMT 的增益(Gain)、绝对分辨率(Resolution)以及峰谷比等信息.

#### 2.1.1 数据采集系统

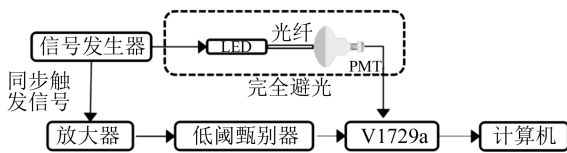


图 1 单光电子响应实验数据采集

Fig. 1 The data acquisition of single photoelectron response experiment

在图 1 中,使用信号发生器 AFG3102 产生两路频率为 2 kHz,时间同步,相互独立的脉冲信号.一路信号为宽度 20 ns、幅度合适的脉冲<sup>[3]</sup>,用来驱动 LED 灯发光并通过一根光纤传输至 PMT 光阴极;另一路同步触发信号依次经过放大器与低阈甄别器 N840 去触发数据采集卡 V1729a 采集数据<sup>[4]</sup>.

2.1.2 拟合单光电子信号电荷谱 用 2 个独立的指数函数分别去拟合电子噪声和热噪声电荷,1 个关于泊松函数和高斯函数的乘积去拟合 PMT 光阴极产生光电子(photoelectron, pe)以及打拿极倍增过程输出的阳极信号电荷<sup>[5]</sup>.但在实际拟合中,只考虑了单光电子、双光电子和三光电子,因为三光电子以上的事例极少,可以选择忽略<sup>[6]</sup>.最终确定的拟合方程如下所示:

$$F(x) = e^{B_1+T_1x} + e^{B_2+T_2x} + \sum_{n=1}^3 [P \times \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \times e^{-\frac{(x-n\mu)^2}{2\sigma^2}}] \quad (1)$$

在(1)式中,如果  $\mu$  和  $\sigma$  分别表示一个光电子响应的电荷平均值与电荷标准偏差,并且要求线性响

应,那么  $n$  个光电子响应的平均值与标准偏差则分别满足  $\sigma_n = \sqrt{n}\sigma$  和  $\mu_n = n\mu$ <sup>[7]</sup>.通过(1)式拟合的典型单光电子信号电荷谱如图 2 所示.根据拟合结果可得增益为  $\mu/e$  ( $e$  表示电子电荷量)、绝对分辨率为  $\sigma/\mu$ 、峰谷比为  $P_{\text{count}}/V_{\text{count}}$ .

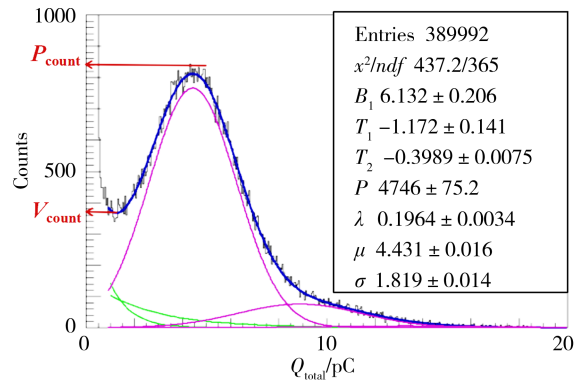


图 2 单光电子信号电荷谱拟合结果

Fig. 2 The fit result of charge spectra of single photoelectron signal

### 2.2 暗计数率

暗计数率是指 PMT 在完全避光环境下单位时间内由于自身噪声信号产生的计数.图 3 所示为测试暗计数率的数据采集系统.用随机信号去触发 V1729a 插件采集 PMT 完全避光情况下的噪声信号,在后期数据处理程序中设置脉冲的阈值(mV),将超过这一阈值的脉冲数目除以采样总时间,即为这一阈值下的暗计数率.然后再改变阈值大小,就可以得到暗计数率随阈值的变化规律.为了比较室温与低温下 PMT 的暗计数率,根据信号脉冲的幅度与电荷的线性关系(如图 4)以及单光电子对应阳极输出电荷量,可以将阈值单位等价转换为  $pe$ <sup>[8]</sup>.

### 2.3 PMT 在低温中的稳定性

通常用于暗物质探测等实验的液氩探测器需要长期运行,因此用于液氩探测器的 PMT 也需要测试其在低温环境中(光阴极及以下部分浸入)的稳定性<sup>[8]</sup>.考虑到液氮温度略低于液氩但性价比更高(液氮价格远低于液氩),在测试 PMT 性能时用液氮代替液氩,将 PMT 浸入液氮中并维持一段时间(约 60 h),同时观察其增益与绝对分辨率变化情况.如图 5 所示,PMT 附近竖直方向三个位置放置了温度计用于监控 PMT 的温度变化情况.阴影区域为液氩液面到达的合适区域,当光阴极处的温度计 2 显示温度在液氩温度(87.3 K)以下时,可以认为 PMT 处于要求的低温环境中.

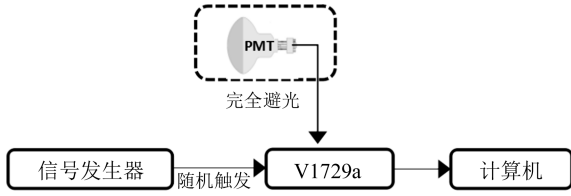


图 3 暗计数率实验数据采集

Fig. 3 The data acquisition of dark count rate experiment

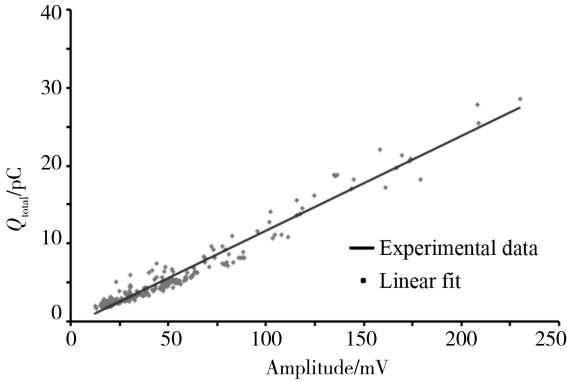


图 4 脉冲幅度与电荷关系

Fig. 4 The relation between pulse amplitude and pulse charge

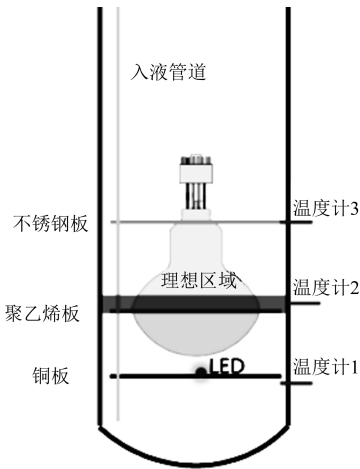


图 5 探测器结构示意图

Fig. 5 The schematic diagram of detector structure

### 3 数据处理与结果分析

#### 3.1 PMT 在低温中稳定性情况

为了研究 PMT 能否在低温下长期稳定地运行,测试了 PMT 的增益和绝对分辨率在低温下随时间的变化.如图 6 所示,横坐标表示 PMT 在低温下持续运行的时间,起始时间为液氮液面首次到达合适位置(图 5 中阴影区域),纵坐标表示 PMT 的分辨率.随着时间增长,两个高压下 PMT 的绝

对分辨率均出现了波动,不过波动幅度都不大.在图 7 中,横坐标意义同图 6,纵坐标表示 PMT 的增益.除了起始时间点的增益异常,其他时间点的增益大小变化很平缓,可以认为 PMT 的增益在低温下最终能维持稳定.起始时间点的两个高压下增益异常趋势是一样的,这可能是由于此时液氮液面刚到达 PMT 光阴极位置,其打拿极系统内部还没有得到充分冷却.随着时间增加,PMT 内部的温度趋于均匀和稳定,所以其增益也变得稳定了.

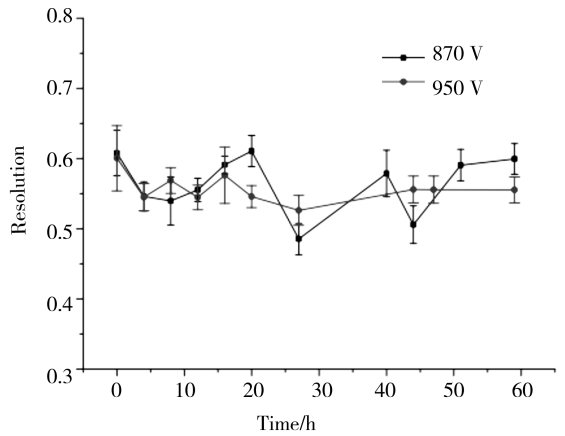


图 6 低温下绝对分辨率随时间的变化

Fig. 6 The resolution change with time at low temperature

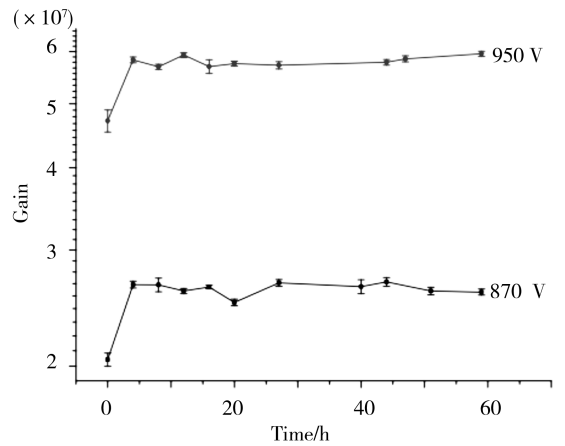


图 7 低温下增益随时间的变化

Fig. 7 The gain change with time at low temperature

#### 3.2 室温与低温中 PMT 的性能对比

3.2.1 绝对分辨率 图 8 所示为 PMT 在室温和低温环境中绝对分辨率随着高压的变化情况.其中低温环境下选择了两组数据 No. 1 和 No. 6,分别对应于图 7 中起始时间点和第 6 个时间点(即在低温环境维持约 20 h)采集的数据.可以看到 PMT 在低温环境中的绝对分辨率优于在室温环境,且随着

高压变化其波动相对平稳。

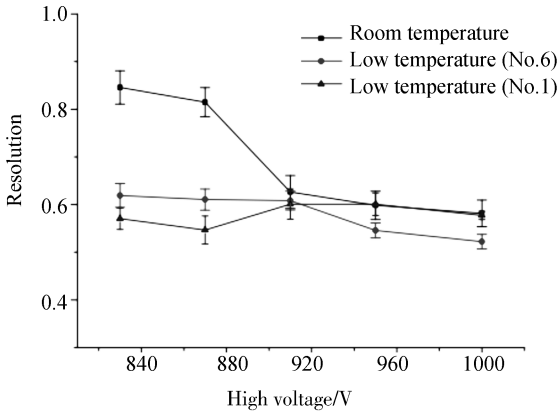


图 8 室温与低温下绝对分辨率对比

Fig. 8 Comparing resolution between room temperature and low temperature

	<b>k</b>	<b>d<sub>1</sub></b>	<b>d<sub>2</sub></b>	<b>d<sub>3</sub></b>	...	<b>d<sub>8</sub></b>	<b>d<sub>9</sub></b>	<b>d<sub>10</sub></b>	<b>d<sub>11</sub></b>	<b>d<sub>12</sub></b>	<b>a</b>
Standard	600v	2R	1.5R	R	...	R	R	R	R	R	
High Pulsed linearity	600v	2R	1.5R	R	...	R	2R	3R	4R	3R	

图 9 两种 PMT 分压电路方案

Fig. 9 Two types of voltage divider of PMT

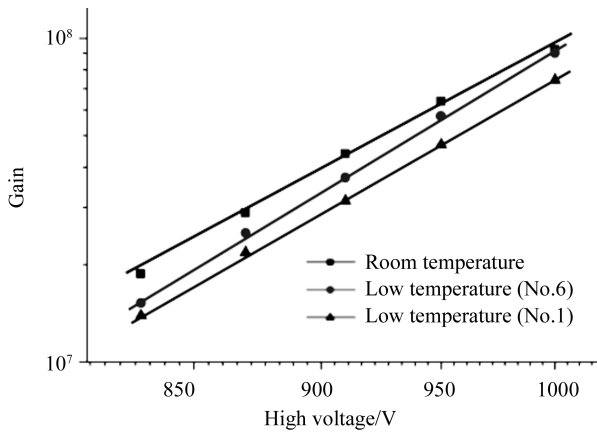


图 10 室温与低温下增益对比

Fig. 10 Comparing gains between room temperature and low temperature

3.2.2 增益 如图 9 所示, PMT 分压电路采用标准分压方案, 电压的分配比较均匀. 可以设 1 个入射光电子在每相邻打拿极间产生  $\delta$  个光电子, 根据 PMT 的打拿极倍增原理, 不难知道增益服从指数关系<sup>[6]</sup>  $Gain = k(\delta)^N$ . 其中  $k$  是线性因子, 如果 PMT 打拿极系统倍增线性很好, 则  $k$  值接近 1;  $N$  是 PMT 的打拿极总级数. 另外  $\delta$  的大小与打拿极间的电压大小成正比, 则增益与高压 (HV) 也服从指数关系, 即  $\ln(Gain)$  与  $\ln(HV)$  要满足线性关系, 如图 10 所示. 从图上可以看出, 不管是在室温

环境还是低温环境, PMT 基本上都能满足线性要求; 另外, 可以明显地看到, PMT 在低温时的增益小于在室温环境下的增益.

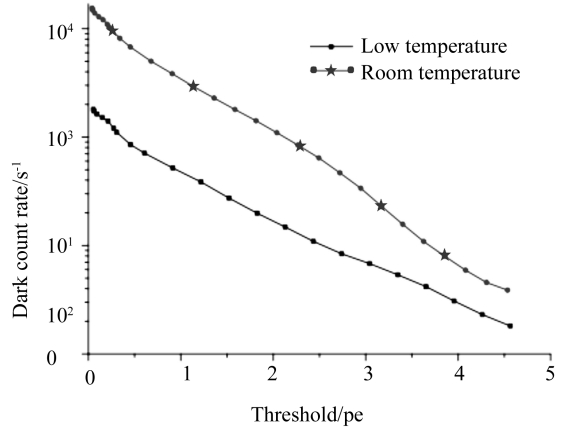


图 11 室温与低温下暗计数率对比

Fig. 11 Comparing dark count rates between room temperature and low temperature

3.2.3 暗计数率 探测器的噪声是影响其探测性能的重要因素, 而 PMT 的噪声是探测器噪声的重要来源之一, 因此掌握 PMT 的暗计数率水平是非常有必要的. 图 11 是室温与低温环境中测试的暗计数率随阈值变化的实验结果, 可以看到低温环境中的 PMT 暗计数率比室温中降低了 80% 左右, 可见低温对降低噪声的效果非常明显.

### 4 结论

通过在室温和低温下对 PMT 进行测试, 掌握了用于低温探测器的 PMT 性能参数以及测试的实验原理与方法, 具体体现在以下几个方面:

(1) 室温环境中测试了 PMT 单光电子响应、暗计数率等, 获得了室温下 PMT 基本性能资料, 为后续低温实验开展奠定了基础.

(2) 研究了低温环境中 PMT 的性能情况, 同样在低温环境中开展了 (1) 中实验, 并且还测试了 PMT 在低温环境下运行时的性能稳定. 将室温与低温实验得到的数据分析对比, 进而评价 PMT 在低温环境中的性能表现. 根据实验结果, 发现测试的 ETL 9357FLB 型号 PMT 能在低温环境中稳定工作, 且有些性能在低温下表现地更好. 比如在低温环境中 PMT 的暗计数率大幅降低, 绝对分辨率也更好. 此外, 低温实验也可为液氩探测器制冷系统的改良提供经验及参考.

## 参考文献:

- [1] Kang K J, Cheng J P, Li J, *et al.* Introduction of the CDEX experiment [J]. *Front Phys*, 2013, 8: 679.
- [2] 王永强, 刘义保, 岳骞, 等. CDEX-10 中 PMT 的测试装置和 DAQ 系统设计[J]. *核电子学与探测技术*, 2013, 33: 606.
- [3] Carbonara F, Cocco A G, Fiorillo G, *et al.* Performance of photomultiplier tubes for cryogenic applications [J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2009, 610: 271.
- [4] Dossi R, Ianni A, Ranucci G, *et al.* Methods for precise photoelectron counting with photomultipliers [J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2000, 451: 623.
- [5] Ankowski A, Antonello M, Aprili P, *et al.* Characterization of ETL 9357FLA photomultiplier tubes for cryogenic temperature applications [J]. *Nucl Inst Meth A*, 2006, 556: 146.
- [6] Singh L P, Bhardwaj A, Sachdeva A. Characterization of large area photomultipliers and its application to dark matter search with noble liquid detectors [J]. *J Instrum*, 2007, 3: 1006.
- [7] Chen Q H, Yue Q, Cheng J P, *et al.* Measurement of photoelectron yield of the CDEX-10 liquid argon detector prototype [J]. *Chin Phys C*, 2016, 40: 114.
- [8] Briese T, Bugel L, Conrad J M, *et al.* Testing of cryogenic photomultiplier tubes for the MicroBooNE experiment [J]. *J Instrum*, 2013, 8: 217.

## 引用本文格式:

中文: 何超, 刘书魁, 幸浩洋, 等. 液氩探测器的低温 PMT 性能测试 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 921.

英文: He C, Liu S K, Xing H Y, *et al.* Low temperature PMT performance test for liquid argon detector [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2019, 56: 921.