

# CsI(Tl) 晶体探测器 APD 读出的温度效应\*

陈若富<sup>1,2;1)</sup> 樊瑞睿<sup>1,2</sup> 徐珊珊<sup>1</sup> 詹文龙<sup>1</sup> 李松林<sup>1</sup> 肖志刚<sup>1</sup> 肖国青<sup>1</sup> 胡正国<sup>1,2</sup>  
黄天衡<sup>1,2</sup> 章学恒<sup>1,2</sup> 郑川<sup>1,2</sup> 付芬<sup>1,2</sup> 贾飞<sup>1,2</sup> 岳珂<sup>1,2</sup> 欧阳珍<sup>1,2</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 对中国科学院近代物理研究所自行生长的铯激活碘化铯闪烁晶体 CsI(Tl) 光输出及 Hamamatsu 公司生产的 S8664-1010 型雪崩光二极管 (APD) 增益对温度的依赖关系做了系统研究. 结果表明, CsI(Tl) 晶体光产额在室温范围内随着温度的增加而增加, 在  $-2^{\circ}\text{C}$ — $8^{\circ}\text{C}$  温度范围内的平均温度系数为  $0.67\%/^{\circ}\text{C}$ , 在  $8^{\circ}\text{C}$ — $25^{\circ}\text{C}$  温度范围内的平均温度系数为  $0.33\%/^{\circ}\text{C}$ . 而对所使用的 APD, 其增益在室温范围内的温度系数为  $-3.68\%/^{\circ}\text{C}$  (工作电压 400V). APD 结合 CsI(Tl) 晶体在室温下对  $^{137}\text{Cs}$  的 662keV  $\gamma$  射线的能量分辨可达 5.1%.

**关键词** CsI(Tl) 晶体 光产额 雪崩光二极管 温度 能量分辨

## 1 引言

铯激活碘化铯闪烁 (CsI(Tl)) 晶体具有较高的密度、较高的闪烁光产额、较高的辐照硬度、相对低廉的价格、易加工等优点. 另外, 其光输出具有与被探测粒子性质相关的快、慢两种成分, 可直接通过脉冲形状甄别来实现粒子鉴别的特点. 因此, 在核物理、粒子物理、成像等领域中被广泛应用<sup>[1-5]</sup>. 由中国科学院近代物理研究所设计和承建的国家大科学工程兰州重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR) 已经进入调束阶段, CSR 上的大型核物理实验装置也在设计和建造中. 这些装置中将大量使用 CsI 晶体, 如: 强子物理兰州谱仪 (HPLUS) 中的电磁量能器和外靶实验装置中的  $\gamma$  探测球. 为降低这些探测器的造价, 中国科学院近代物理研究所启动了 CsI 晶体生长项目, 目前已经具备了批量生长直径达 100mm、长度达 300mm 的铯激活碘化铯和纯碘化铯晶体的能力.

对碘化铯晶体的闪烁光读出, 传统的方法是采用光电倍增管 (PMT). PMT 具有高增益、低噪声的特点, 并可通过改变光阴极材料实现对不同波长的闪烁光实现较高量子效率的光电转换, 这使得 PMT 可以

和不同类型的闪烁体配合使用, 并在实际的应用中成为一种非常重要的闪烁光探测器件. 但是, 光电倍增管由于其较大的体积和易受磁场干扰等缺点, 在很多场合不适宜使用. 于是, 人们又发展了光二极管 (PD), 并被成功地应用于无机闪烁体的闪烁光探测. PD 相对于 PMT 的优点是, 体积较小、抗磁干扰能力强以及低功耗, 且具有更高的量子效率. 但其缺点是自身无信号放大功能, 测量较弱光信号时, 需配合低噪声的前置放大电路.

雪崩光二极管 (avalanche photodiode, APD) 结合了 PD 和 PMT 两者的优点: 高量子效率、较高的增益、对磁场不敏感、体积小、低功耗等. APD 是具有大结区电场的强反向电压二极管, 其光阴极吸收光子后产生电子-空穴对, 电子向 p-n 结漂移到达高电场区域, 在高电场区域电子获得足够的能量, 高能电子通过电离作用产生新的电子-空穴对, 从而达到电子的雪崩放大.

本文主要介绍了使用中国科学院近代物理研究所生产的 CsI(Tl) 晶体配合日本 Hamamatsu 公司生产的 APD (S8664-1010) 对  $^{137}\text{Cs}$  放射源产生的 662keV 能量的  $\gamma$  射线进行探测的一些结果, 包括: CsI(Tl) 晶

2006-11-23 收稿

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (CKJCX2-SW-N18, CKJCX2-SW-N04) 资助

1) E-mail: chenruofu@impcas.ac.cn

体发光效率的温度效应、APD增益的温度效应以及CsI(Tl)晶体结合APD用于 $\gamma$ 射线测量的能量分辨。另外,文中还讨论了使用CsI(Tl)晶体结合APD组合进行射线探测时应注意的问题。

## 2 测试条件

测试中使用的CsI(Tl)晶体由中国科学院近代物理研究所生产。为与S8664-1010型APD的有效光灵敏面积(10mm×10mm)相匹配,尺寸选择为10mm×10mm×10mm。为了获取最大的光收集效率,除了读出面采取抛光处理外,其余各面均处理成漫散射面,并采用4层Teflon反射膜包裹。晶体和APD间使用硅油耦合。测试过程中APD的电压为400V。

为了研究CsI(Tl)和APD组成的探测器性能与温度的关系,我们使用了制冷和温度控制系统(Thermo Haake K15, Thermo Haake D30),该系统的温度控制精度的设计值为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。制冷系统把低温冷却液传送到一个U形铜管,紧贴APD和CsI(Tl)晶体的U形铜管通过良好的热传导作用把探测器的温度降到较低温度。为了避免在较低的温度下CsI(Tl)晶体和APD表面产生水蒸气凝结,CsI(Tl)晶体和APD放置在真空室内,真空室的真空度为5Pa。实验中使用了PT100温度计对APD和CsI(Tl)晶体的温度进行直接监测。

APD的信号通过前置放大器进入主放(ORTEC572),主放的成形时间为6 $\mu\text{s}$ ,其单极信号直接进入ADC进行获取,双极信号经过倒向后使用CF8000甄别,并利用GG8000调整门宽,然后给ADC作门信号。为了获得较好的能量分辨,我们把前置放大器和APD之间的电缆做得尽可能短,并在温度稳定后进行测试。

## 3 测试结果

### 3.1 晶体光产额对温度的依赖性

为了测试CsI(Tl)晶体的闪烁光产额对温度的依赖关系,我们选择的光电转换探测器是Hamamatsu公司生产的PD(S3590-01),并使用PT100温度计监测晶体的温度变化。由于PD自身没有增益,而CsI(Tl)晶体的闪烁光收集效率是一定的,因此PD信号大小的变化直接反映出晶体光产额的变化。前置放大器放置在真空室外(室温约 $25^\circ\text{C}$ ),与PD之间的电缆约20cm,因此来自于前置放大器的温度效应也可忽略。

实验结果表明:在本次实验温度范围内,晶体的光产额随温度的升高而增加,平均增幅约为

0.46%/ $^\circ\text{C}$ 。其中,在 $-2^\circ\text{C}$ — $8^\circ\text{C}$ 温度范围内,晶体的光产额受温度的影响较大,平均增幅为0.67%/ $^\circ\text{C}$ ;在 $8^\circ\text{C}$ — $25^\circ\text{C}$ 温度范围内,晶体的光产额受温度的影响较小,平均增幅约为0.33%/ $^\circ\text{C}$ 。图1给出了所测得的CsI(Tl)晶体光产额的温度曲线。

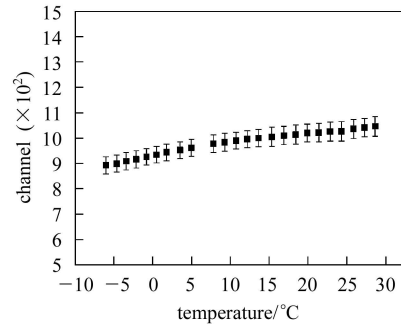


图1 碘化铯晶体的光产额和温度的关系  
图中的误差为各温度下所测能谱的半高宽。

在同样的温度范围内,本次实验CsI(Tl)闪烁晶体的光产额对温度的依赖关系和D.Bederede等人的研究结果<sup>[6]</sup>是一致的,但是与John D. Valentine等人的测试结果<sup>[7]</sup>相反。如果文献[7]的结果是正确的,这个现象可能是由于晶体的品质差异造成的。

### 3.2 CsI(Tl)晶体与APD组合输出信号的温度曲线

使用温度控制系统对APD和CsI(Tl)晶体在不同温度下的性能进行研究。由于温度控制系统设置的温度和实际温度因冷却液传输距离长,会有一定的差距,测试中使用PT100温度计对APD和CsI(Tl)的温度进行监测,以PT100监测的温度作为探测器的实际温度。

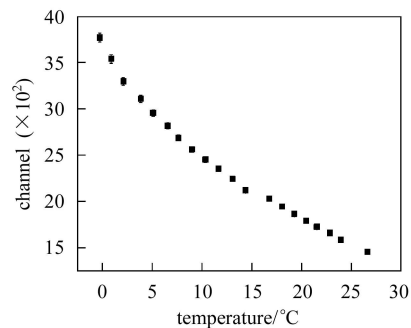


图2 APD和CsI(Tl)结合使用信号幅度和温度的关系  
图中的误差为各温度下所测能谱的半高宽。

在温度稳定后对APD的输出信号进行测量,为了增加测试的准确性,在每个温度下取3次测量的平均值作为最终的测试结果。APD和CsI(Tl)晶体组合的输出信号幅度和温度的关系见图2。可以看到,随着温

度的降低, 信号幅度明显的增加. 除了在接近零度的范围内, 信号的幅度增加稍快, 约为  $-5.47\%/^{\circ}\text{C}$ , 在大部分的测试温度范围内 ( $2^{\circ}\text{C}$ — $25^{\circ}\text{C}$ ), 信号幅度增加的平均值约为一个常数  $-3.35\%/^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3 能量分辨

本次测试的温度范围内, APD和CsI(Tl)晶体组成的探测器对 $^{137}\text{Cs}$ 放射源的662keV能量 $\gamma$ 射线的能量分辨在5%—6%之间. 图3给出了 $26.6^{\circ}\text{C}$ ,  $18^{\circ}\text{C}$ 和 $3.8^{\circ}\text{C}$ 的典型能谱, 其能量分辨率 $\Delta E(\text{FWHM})/E$ 分别为5.3%, 5.29%, 5.76%.

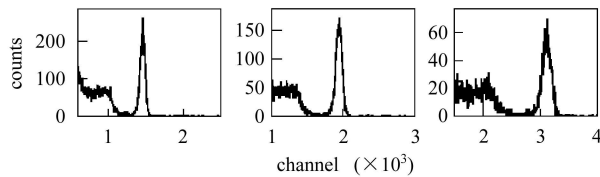


图3 CsI(Tl)加APD读出分别在 $26.6^{\circ}\text{C}$ ,  $18^{\circ}\text{C}$ 和 $3.8^{\circ}\text{C}$ 时测量 $^{137}\text{Cs}$ 源662keV的 $\gamma$ 射线能谱

测试中温度的不稳定对探测器的能量分辨影响会非常大, 主要是由于APD的增益对温度的依赖性强, 较小的温度变化会造成信号幅度的较大晃动, 从而造成能谱的进一步展宽, 影响了探测器的分辨能力. 从图3中可以清楚地看到, 在较低温度条件下, 探测器的能量分辨变差. 这是由于控制系统设置的温度越低, 测试系统和周围环境温差越大, 控制系统对温度控制的精度就越差, 从而造成APD增益的晃动更大, 影响了探测器的能量分辨.

实际上, 探测器信号幅度和温度的关系受两个方面因素的影响: (1) APD的增益对温度的依赖; (2) CsI(Tl)闪烁光产额随温度的变化. 下面, 我们分析一下由于温度变化引起APD增益变化对能量分辨的影响.

假定APD输出信号 $S = L\eta QG$ , 其中 $L$ 是晶体的光产额,  $\eta$ 是晶体闪烁光的收集效率,  $Q$ 是APD进行光电转换的量子效率,  $G$ 是APD的增益. 假设晶体闪烁光的收集效率 $\eta$ 和APD的量子效率 $Q$ 不随温度变化, 则信号幅度的相对变化率随温度的变化可写为

$$\frac{(\Delta S/S)}{dT} = \frac{(\Delta L/L)}{dT} + \frac{(\Delta G/G)}{dT}, \quad (1)$$

即温度对探测器信号大小的影响等于温度对晶体光产额影响和APD增益影响的和. 根据实验的数据, 在室温附近, 探测器信号幅度随温度的变化率为 $-3.35\%/^{\circ}\text{C}$ , 晶体本身的光输出对温度的依赖关系为 $0.33\%/^{\circ}\text{C}$ , 可导出在室温范围内, APD的增益随温度的变化约为 $-3.68\%/^{\circ}\text{C}$ . 此时, 温度变化 $1^{\circ}\text{C}$ , APD增

益的变化会造成信号幅度有3.68%的变化. 因此, 使用APD时温度控制的精确性将直接影响探测器的能量分辨.

应当注意的是: APD的增益同时也受工作电压的影响, 本文所给出的S8664-1010增益和温度的关系是在其典型工作电压400V下的结果.

基于以上分析, 我们在室温下进行了测量. 此时不使用温度控制系统, 仅使用PT100温度计监测CsI(Tl)的温度. 在温度恒定后进行测量, 测量过程中温度的变化在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的水平. 图4(a)给出了在 $25^{\circ}\text{C}$ 温度下测得的能谱, 能量分辨 $\Delta E/E$ 为5.1%. 这个结果和T. Ikagawa等人给出的最好结果4.9%<sup>[8]</sup>很接近. T. Ikagawa等人的测试是在 $20^{\circ}\text{C}$ 的温度下测试的, 因此APD的增益大、暗电流低, 从而信噪比更好.

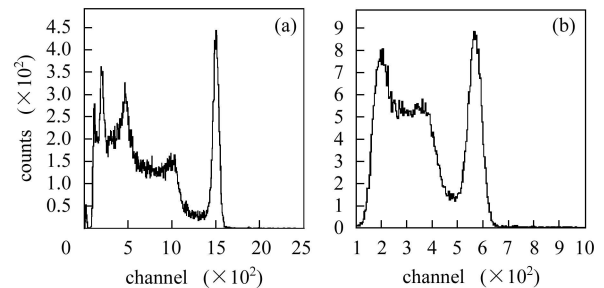


图4  $25^{\circ}\text{C}$ 时APD (a), PD (b)结合CsI(Tl)晶体测量662keV  $\gamma$ 射线的能谱

为了对比, 我们还测量了室温下同一块晶体与PD结合时测量来自 $^{137}\text{Cs}$ 源的662keV的 $\gamma$ 射线的能谱(图4(b)), 所用的PD为Hamamatsu公司生产的S3590-01, 得到的能量分辨为11.3%. 这是由于PD自身无放大功能, 对于低能 $\gamma$ 射线在晶体中产生的弱闪烁光信号进行探测, 受电子学的噪声影响更大, 从而造成能量分辨不理想.

## 4 结论

通过对中国科学院近代物理研究所生产的CsI(Tl)晶体结合APD组成 $\gamma$ 射线探测器的性能进行测试, 得到下列结论: (1) 在室温范围内, CsI(Tl)晶体的光产额将随着温度的增加而增加, 其中, 在 $-2^{\circ}\text{C}$ — $8^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 晶体光产额的增幅较大, 平均增幅约为 $0.67\%/^{\circ}\text{C}$ ; 在 $8^{\circ}\text{C}$ — $25^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 晶体光产额的增幅总体上较为缓慢, 平均增幅约为 $0.33\%/^{\circ}\text{C}$ . (2) APD增益随温度的降低而增高, 温度越低依赖性越强, 即使是在室温条件下, 本次测试所使用的S8664-1010也有 $-3.68\%/^{\circ}\text{C}$ (工作电压400V)的变化

率. 因此, 在使用 APD 时温度的控制非常重要. (3) 采用自制的 CsI(Tl) 晶体配合 APD, 在 25°C 时对 662keV  $\gamma$  射线进行测量, 得到了 5.1% 的能量分辨.

### 参考文献(References)

- 1 ZHU Ren-Yuan. Nucl. Phys., 1999, **B78**(Proc. Suppl.): 203—219
- 2 Gericke M T et al. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **A540**: 328—347
- 3 Brose J et al. Nucl. Instrum. Methods, 1998, **A417**: 311—324
- 4 Ryzhikov V D et al. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **A537**: 424—430
- 5 Carel W E, van Eijk. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A509**: 17—25
- 6 Bederede D et al. Nucl. Instrum. Methods, 2004, **A518**: 15—18
- 7 Valentine J D et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, **40**: 1267
- 8 Ikagawa T et al. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **A538**: 640—650

## Temperature Effects of CsI(Tl) Crystal Detector with APD Readout<sup>\*</sup>

CHEN Ruo-Fu<sup>1,2;1)</sup> FAN Rui-Rui<sup>1,2</sup> XU Hu-Shan<sup>1</sup> ZHAN Wen-Long<sup>1</sup> LI Song-Lin<sup>1</sup> XIAO Zhi-Gang<sup>1</sup>  
 XIAO Guo-Qing<sup>1</sup> HU Zheng-Guo<sup>1,2</sup> HUANG Tian-Heng<sup>1,2</sup> ZHANG Xue-Heng<sup>1,2</sup> ZHENG Chuan<sup>1,2</sup>  
 FU Fen<sup>1,2</sup> JIA Fei<sup>1,2</sup> YUE Ke<sup>1,2</sup> OUYANG Zhen<sup>1,2</sup>

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The temperature dependences of the light output of CsI(Tl) crystal grown at IMP and of the gain of the Hamamatsu S8664-1010 avalanche photodiode (APD) have been investigated systematically. The light output of the CsI(Tl) crystal increases with temperature by 0.67%/°C in the region from -2°C to 8°C, and by 0.33%/°C in the region from 8°C to 25°C, while the gain of the tested APD decreases by -3.68%/°C (working voltage 400V) on average in the room temperature range. The best energy resolution 5.1% of the CsI(Tl) with APD was obtained for the 662keV  $\gamma$  ray from <sup>137</sup>Cs radiation source.

**Key words** CsI(Tl) crystal, light yield, APD, temperature, energy resolution

Received 23 November 2006

<sup>\*</sup> Supported by Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (CKJCX2-SW-N18, CKJCX2-SW-N04)

1) E-mail: chenruofu@impcas.ac.cn