

# CSR 外靶实验终端中 CsI (Tl) 晶体的测试

石国柱, 李松林, 胡强, 李恒远

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 为测量重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR) 的外靶实验终端上不同能量的  $\gamma$  射线, 一种用于探测  $\gamma$  射线的高能量分辨的探测装置正在中国科学院近代物理研究所建设, 该探测器由中国科学院近代物理研究所自行生长的铊激活的碘化铯 CsI (Tl) 晶体组成。与日本 Hamamatsu 公司生产的 S8664-1010 型雪崩光二极管 (APD) 耦合, 测试其光输出的非均匀性和能量分辨, 从测试结果给出了所需 CsI (Tl) 晶体合格的标准。目前已完成该  $\gamma$  探测球计划的六分之一, 所提供的晶体合格率达 94% 以上。

**关键词:** CsI (Tl) 晶体; 雪崩光二极管; 光输出; 非均匀性; 能量分辨

**中图分类号:** TL56      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931 (2010) S0-0435-04

## Test of CsI(Tl) Crystal at External Target Experimental Terminal of Cooling Storage Ring

SHI Guo-zhu, LI Song-lin, HU Qiang, LI Heng-yuan

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

**Abstract:** In order to detect gamma rays with different energy at the external target experimental terminal of the Cooling Storage Ring (CSR) of Heavy Ion Research Facility of Lanzhou, a gamma ray detector with perfect energy resolution is being constructed at Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences. It is made of CsI(Tl) crystal grown at IMP. The light output of non-uniformity and energy resolution of CsI(Tl) crystal were tested after CsI(Tl) crystal coupled with the Hamamastu S8664-1010 avalanche photodiode (APD). From the result of test, standard of CsI(Tl) crystal qualified was obtained. At present, one-sixth of the detectors was finished. The test result indicates that 1 024 pieces are good enough, and the percent of pass is over 94%.

**Key words:** CsI(Tl) crystal; avalanche photodiode; light output; non-uniformity; energy resolution

铊激活的碘化铯单晶体 (CsI (Tl)) 由于具有密度大、平均原子序数高、较高的闪烁光产额、相对低廉的价格、易加工等优点, 因而对  $\gamma$  射线和 X 射线有较高的探测效率。另外, 在高能物理中, 由于 CsI (Tl) 晶体本身具有许多优良的特性而作为一种重要的材料被广泛应

用于核物理、粒子物理、成像等领域<sup>[1-2]</sup>。随着国家大科学工程——兰州重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR) 的成功运行, CSR 上的大型核物理实验装置——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  $\gamma$  探测球中将会大量使用 CsI 晶体, 以用来测量

收稿日期: 2010-06-23; 修回日期: 2010-07-09

作者简介: 石国柱 (1983—), 男, 安徽阜阳人, 研究实习员, 硕士, 粒子物理与原子核物理专业

高能 $\gamma$ 射线和电子的能量和位置<sup>[3-4]</sup>。且CsI(Tl)晶体和光电二极管(PD)耦合在测量重离子的能量中作为停止探测器也已成功应用于兰州放射性束流线(RIBLL)。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。晶体探测器组通过多年探索和实验,已具备了批量生长大尺寸(约 $\phi 100\text{ mm}\times 350\text{ mm}$ )CsI(Tl)晶体和纯CsI晶体的能力,且晶体一流的品质已在国际市场上受到广泛的好评,已有德国、美国等多家国际著名实验室使用了近代物理研究所晶体探测器组的掺铊碘化铯晶体开展各种实验研究工作。

为测量CSR外靶实验终端上不同能量的 $\gamma$ 射线(能量从几百keV到几十MeV甚至更高),需要有一种阻止本领强、能量分辨好、价格较低的 $\gamma$ 射线探测器。众所周知, $\gamma$ 探测球<sup>[5-6]</sup>是世界上最早的一种高能量分辨的 $\gamma$ 射线探测器。自20世纪90年代以来,这种探测器已被世界上一些顶级的原子核结构研究机构如美国橡树岭国家实验室、劳伦兹伯克利国家实验室、阿贡国家实验室<sup>[7-9]</sup>等所采用。为满足实验上研究的需要,新型的 $\gamma$ 探测球装置正在中国科学院近代物理研究所建设,该探测器由不同规格的CsI(Tl)晶体组成。依照我们的工作,自2009年5月到2010年5月的第一阶段,要完成总进度的六分之一。目前,这部分工作已完成,该部分由16个环共1024块CsI(Tl)晶体组成。

在核物理实验中,用来探测高能 $\gamma$ 射线和电子的电磁量能器通常使用大尺寸的长条形无机闪烁晶体排列而成,探测器单元长轴方向的光输出非均匀性对探测器本征能量分辨能力影响极大<sup>[10-11]</sup>。因此,大尺寸闪烁晶体沿轴向的光输出非均匀性和能量分辨是探测器性能的两个重要参数,根据设计的要求,所有的CsI(Tl)晶体都将使用ESR膜材料包裹,采用雪崩光二极管(avalanche photodiode, APD)读出。本文主要介绍使用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,有效光灵敏面积 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ )对 $^{137}\text{Cs}$ 放射源产生的662 keV能量的 $\gamma$ 射线进行探测,包括采用A

读出时晶体样品光输出的非均匀性和其能量分辨的测试,本文围绕探测器的这两个性能参数进行简单的讨论。

## 1 测试条件

对CsI(Tl)晶体的闪烁光读出,传统的方法一般是采用光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)。由于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来得到较高量子效率的光电转换,这使得PMT在实际应用中成为一种非常重要的、可与不同类型的闪烁体配合使用的闪烁光探测器。但由于PMT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。于是人们发展了雪崩光二极管(APD),它不仅具有高量子效率、较高的增益,还具有对磁场不敏感、体积小、低功耗等优点。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。

测试和使用的晶体由中国科学院近代物理研究所晶体探测器组生产。图1给出了 $4\pi$  $\gamma$ 球上所需CsI(Tl)晶体的形状。在进行大批量生产和加工 $\gamma$ 探测球所需要的CsI(Tl)晶体前,根据设计所需的16个环中每种规格的晶体均加工1块作为样品,并测试其性能。晶体样品的长度从15~17 cm不等,共计16块(晶体编号为9#~24#)。为获得最大光收集效率,所有样品除了读出面采取抛光处理外,其余各面均处理成漫反射面,并采用ESR反射膜包裹,晶体和APD间使用硅油光学耦合。

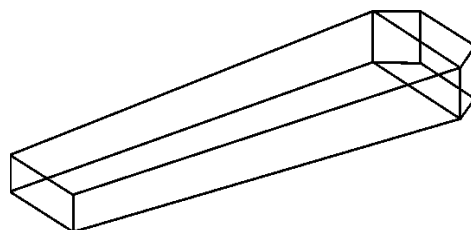


图1  $\gamma$ 球上CsI(Tl)晶体的形状

Fig. 1 Shape of CsI(Tl) crystal on gamma sphere

测试过程中APD的电压为416 V。APD的信号通过前置放大器进入主放 (ORTEC572), 主放的成形时间为3  $\mu$ s, 其单极信号进入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做门信号。为获得较好的能量分辨, 把前置放大器和APD之间的电缆做得尽可能短, 并在测试仪器稳定后进行测试。

## 2 测试结果

### 2.1 CsI (TI) 晶体光输出非均匀性测量

由于本次测试的所有CsI (TI) 晶体样品均是有方向性的, 使用反射效率较高的ESR反射膜包裹, 晶体的闪烁光采用APD读出, 选择晶体的顶端 (晶体生长时垂直方向的上端) 作为光输出的读出端。对该探测器的每块CsI (TI) 晶体在 $^{137}\text{Cs}$ 放射源产生的662 keV能量的 $\gamma$ 射线测试其光输出非均匀性。每块晶体等间距地测量7个点, 测量间距选择为2 cm。根据光输出非均匀性的公式, CsI (TI) 晶体探测单元的光输出非均匀性 $U$ 定义为:

$$U = (M_{\max} - M_{\min}) / M_{\text{ave}} \quad (1)$$

式中:  $M_{\max}$ 、 $M_{\min}$ 和 $M_{\text{ave}}$ 分别为晶体7个测量点中测量到的光输出最大值、最小值和7个测量点的平均值。根据测量结果由式 (1) 可分别求得每块晶体的光输出非均匀性, 编号为9#~24#的16块晶体样品的光输出非均匀性的测试结果如图2所示。

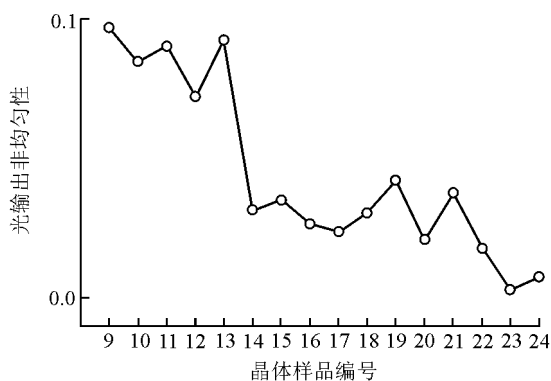


图2 APD 读出晶体样品光输出的非均匀性测试结果

Fig. 2 Test result of light output non-uniformity CsI(Tl) for crystal samples by APD readout

测量结果表明: 大部分CsI (TI) 晶体样品光输出非均匀性小于7%, 同时, 为了获得性能较高的探测器, 最终决定, 晶体样品光输出的非均匀性测试结果低于7%视为合格产品。

### 2.2 CsI (TI) 晶体能量分辨测量

CsI (TI) 晶体探测单元的任何一测试点对662 keV  $\gamma$ 射线的能量分辨定义为:

$$\eta = \Delta E(\text{FWHM})/E \quad (2)$$

测试条件与上述相同, 根据测量结果可由式 (2) 分别求得每块晶体7个测量点的能量分辨, 然后通过加权平均后可求出该晶体的能量分辨值。编号为9#~24#的16块晶体样品的能量分辨测试结果如图3所示。

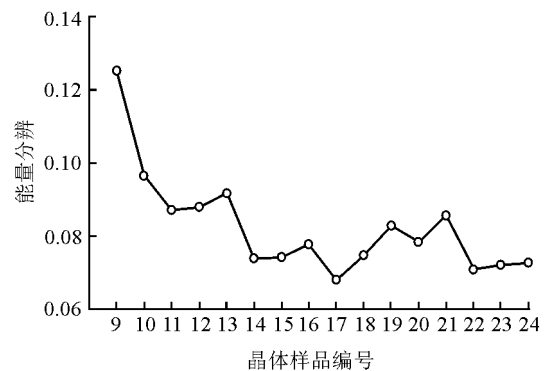


图3 APD 读出晶体样品的能量分辨测试结果

Fig. 3 Test result of energy resolution for CsI(Tl) crystal samples by APD readout

测量结果表明: 大部分CsI (TI) 晶体的能量分辨小于10%, 因此, 将其性能在 $^{137}\text{Cs}$ 放射源产生的662 keV能量的 $\gamma$ 射线测试要求其能量分辨小于10%的视为合格产品。

## 3 结论

由1 024块CsI (TI) 晶体组成的一高能量分辨的 $\gamma$ 探测球的一部分正在中国科学院近代物理研究所组装。通过对近代物理研究所生产的CsI (TI) 晶体结合APD (S8664-1010) 组成 $\gamma$ 射线探测器的性能进行测试, 得到了CsI (TI) 晶体光输出非均匀性和能量分辨合格的标准。在此标准下对 $\gamma$ 探测球的六分之一所需的1 024块CsI (TI) 晶体全部进行了测试。结果表明, 晶体的合格率达94%以上。

## 参考文献:

- [1] ZHU Renyuan. Precision crystal calorimetry in high energy physics[J]. Nucl Phys B, 1999, 78(Suppl.): 219-203.
- [2] BROSE J, DAHLINGER G, SCHUBERT K R, et al. Properties of CsI(Tl) crystals and their optimization for calorimetry of high energy photon[J]. Nucl Instrum Methods A, 1998, 417: 311-324.
- [3] AUBERT B, BAZAN A, BOUCHAM A, et al. The BABAR detector[J]. Nucl Instrum Methods A, 2002, 479: 1-116.
- [4] ABASHIAN A, GOTOW K, MORGAN N, et al. The Belle detector[J]. Nucl Instrum Methods A, 2002, 479: 117-232.
- [5] BAKTASH C, HALBERT M L, LEE I Y, et al. Study of spin-temperature effects using energy-ordered continuum gamma-ray spectroscopy technique[J]. Nucl Phys A, 1990, 520: 555c-565c.
- [6] CHIN M P W, SEWERYNIAK D, ALKHORAYEF M, et al. Variation of  $3\gamma$ -to- $2\gamma$  ratio from  $^{18}\text{F}$  in haematological components measured using the gamma sphere[J]. Nucl Instrum Methods A, 2009, 604: 331-334.
- [7] JANSSENS R V F. Nuclear structure at the limits: Continued exploration with gamma sphere[J]. Nucl Phys A, 2005, 751: 244c-247c.
- [8] JANSSENS R V F. The structure of high-Z nuclei from studies with gamma sphere at ATLAS[J]. Nucl Phys A, 2001, 682: 54c-64c.
- [9] JOHN P G, KIM L, ALKHORAYEF M, et al. Oxide targets for gamma sphere[J]. Nucl Instrum Methods A, 2006, 561: 104-106.
- [10] MATTHEW J R. Light collection uniformity of lead tungstate crystals for the CMS electromagnetic calorimeter endcaps[D]. UK: University of London and the Diploma of Imperial College, 2003.
- [11] TETIANA H, PETER K, MARTIN K, et al. A study of the impact of radiation exposure on the uniformity of large CsI(Tl) crystals for the BABAR detector[J]. Nucl Instrum Methods A, 2004, 535: 452-456.