



## CsI(Tl)探测阵列的升级及测试

万文武 楼建玲 朱宏渝 夏博龙 葛浩煜 叶沿林

### Upgrade and Test of the CsI(Tl) Detection Array

WAN Wenwu, LOU Jianling, ZHU Hongyu, XIA Bolong, GE Haoyu, YE Yanlin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC58>

#### 引用格式:

万文武, 楼建玲, 朱宏渝, 夏博龙, 葛浩煜, 叶沿林. CsI(Tl)探测阵列的升级及测试[J]. *原子核物理评论*, 2024, 41(1):445–452. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC58

WAN Wenwu, LOU Jianling, ZHU Hongyu, XIA Bolong, GE Haoyu, YE Yanlin. Upgrade and Test of the CsI(Tl) Detection Array[J]. *Nuclear Physics Review*, 2024, 41(1):445–452. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC58

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于SiPM双端读出的 $\gamma$ 射线探测器研究

Study of the  $\gamma$ -Ray Detector of Dual-ended Readout Based on SiPM

原子核物理评论. 2020, 37(3): 757–764 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC03>

#### LaBr<sub>3</sub>(Ce)-CsI(Tl)紧凑式叠层反康伽马探测器研制

Study on Compton-suppressed Phoswich Gamma-ray Detector of LaBr<sub>3</sub>(Ce)-CsI(Tl)

原子核物理评论. 2023, 40(1): 73–77 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022021>

#### 基于FPGA的数字反符合 $\gamma$ 谱仪系统设计

Design of Digital Anti-coincidence  $\gamma$  Spectrometer System Based on FPGA

原子核物理评论. 2019, 36(4): 456–461 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.456>

#### ALICE实验内径迹系统探测器升级

Inner Tracking System Upgrade for the ALICE Experiment

原子核物理评论. 2020, 37(3): 734–741 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC51>

#### 用于GPPD谱仪的大面积闪烁体中子探测器性能测试

Performance Test of the Array Scintillator Detector with a Large Area for GPPD

原子核物理评论. 2019, 36(2): 190–196 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.190>

#### CEE-TPC中GEM读出探测器传输性能实验研究

Experimental Research on Transmission Performance of GEM Readout Detector in CEE-TPC

原子核物理评论. 2020, 37(3): 765–770 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC46>

文章编号: 1007-4627(2024)01-0445-08

# CsI(Tl) 探测阵列的升级及测试

万文武, 楼建玲<sup>†</sup>, 朱宏渝, 夏博龙, 葛浩煜, 叶沿林

(北京大学物理学院和核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 在中低能放射性核束物理实验中, 硅和 CsI(Tl) 探测器通常组成 Si-CsI(Tl) 望远镜, 利用  $\Delta E-E$  方法鉴别带电粒子。CsI(Tl) 探测器的光输出大小、光输出均匀度以及配套的获取系统等对其性能和望远镜的粒子鉴别能力有重要影响。本工作尝试从改换 CsI(Tl) 晶体的包装材料、光电转换设备等方面提高光输出, 改善探测器的长期稳定性和楔形探测器的光输出不均匀度; 还测试对比了不同获取系统对 CsI(Tl) 探测器性能的影响, 结果表明, 最优参数下的数字化获取系统在能量分辨率和获取效率方面优于传统获取系统。

**关键词:** CsI(Tl) 探测器; 光输出; 能量分辨率; 数字化获取系统; 梯形滤波

中图分类号: O571.53

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC58

## 0 引言

原子核物理是物理学的一个重要分支。过去一百多年, 核物理的研究主要集中在 300 多个稳定原子核。随着加速器技术的发展, 放射性核束 (Radioactive Beams, RIB) 的研究逐步成为核物理研究的热点<sup>[1]</sup>。RIB 使人们观察到了更加丰富的原子核结构, 拓展了人们对于原子核内部运动规律的认识并检验了已有的核物理模型。

RIB 实验中会用到多种不同类型的探测器, 其中掺铯碘化铯 (CsI(Tl): Thallium-activated caesium iodide crystal detectors) 是一种被广泛使用的闪烁体探测器<sup>[2-4]</sup>。相比于其他闪烁体, CsI(Tl) 晶体具有密度大、单位体积阻止本领强、成本低、不易潮解、方便存储等优点。在中低能核物理实验中, 硅探测器 (Si) 和 CsI(Tl) 探测器通常组成 Si-CsI(Tl) 望远镜, 利用  $\Delta E-E$  方法鉴别带电粒子。其中 Si 探测器通常作为穿透探测器测量粒子的  $\Delta E$ , CsI(Tl) 探测器通常作为阻停探测器测量粒子的剩余能量  $E$ 。很多实验室都研制了 Si-CsI(Tl) 望远镜探测阵列, 例如: LASSA<sup>[5]</sup>, MUST2<sup>[6]</sup>, FARCOS<sup>[7]</sup> 等。在 CsI(Tl) 探测器的性能研究方面, 国内有很多单位也开展了模拟及测试工作<sup>[8-9]</sup>。

北京大学核物理实验组也研制了用于直接核反应实验的 Si-CsI(Tl) 望远镜探测阵列, 包含两套方形和两套圆环望远镜<sup>[10-11]</sup>, 并且成功实现了  $Z=1$  和  $Z=2$  带电粒子的鉴别<sup>[11-12]</sup>。但是, 实验中我们也发现了 CsI(Tl)

探测器存在的一些问题, 例如: 光输出幅度低、阈值高、分辨差等。针对这些问题, 我们计划基于 CsI(Tl) 的探测原理升级 CsI(Tl) 探测阵列。CsI(Tl) 探测器的基本工作原理为: 核辐射与 CsI(Tl) 晶体发生相互作用后沉积能量并激发介质的原子。受激原子退激到基态时发射光脉冲, 即闪烁光。闪烁光子经过闪烁体的传输后到达闪烁体读出面, 经过光电转换设备转换为电荷信号后被电子学系统处理和获取系统记录。由此可见, 影响 CsI(Tl) 探测器的性能的因素有: 1) 晶体本身的发光性能; 2) 光在闪烁体中的传输过程; 3) 光在光电转换设备上的收集; 4) 电荷信号的处理和记录等。因素 (1) 由 CsI(Tl) 晶体的生产厂商控制, 我们没有办法改变。本文主要通过改换 CsI(Tl) 晶体的包装材料、包装方式以及获取电路来升级 CsI(Tl) 探测阵列。

## 1 CsI(Tl) 探测器及其性能

### 1.1 CsI(Tl) 探测器阵列介绍

我们设计了 4.0 cm×4.0 cm×4.0 cm 的方形 CsI(Tl) 探测器, 组成 2×2 的阵列, 匹配一块尺寸为 64.0 mm×64.0 mm 的方形双面硅微条探测器 (DSSD)。两组方形望远镜需要 8 个 CsI(Tl) 探测器, 但我们制作了 9 块, 多余的 1 块备用。为了和环形双面硅微条探测器 (ADSSD) 组成望远镜阵列<sup>[10]</sup>, 并节约靶室内部空间, 我们设计了特定尺寸的楔形 CsI(Tl) 晶体来搭建环形望远镜阵

收稿日期: 2023-08-21; 修改日期: 2024-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12275007, U1867214, 11775004); 北京大学核物理与核技术国家重点实验室开放课题 (NPT2021ZZ01)

作者简介: 万文武 (2001-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 从事原子核与粒子物理研究; E-mail: 2301110138@pku.edu.cn

<sup>†</sup> 通信作者: 楼建玲, E-mail: jllou@pku.edu.cn

列<sup>[13]</sup>。2个一组，匹配1块ADSSD。我们制作了24块楔形CsI(Tl)探测器，匹配12块ADSSD后构成两个圆形的Si-CsI(Tl)望远镜阵列。方形和楔形CsI(Tl)探测阵列的实物照片见图1。

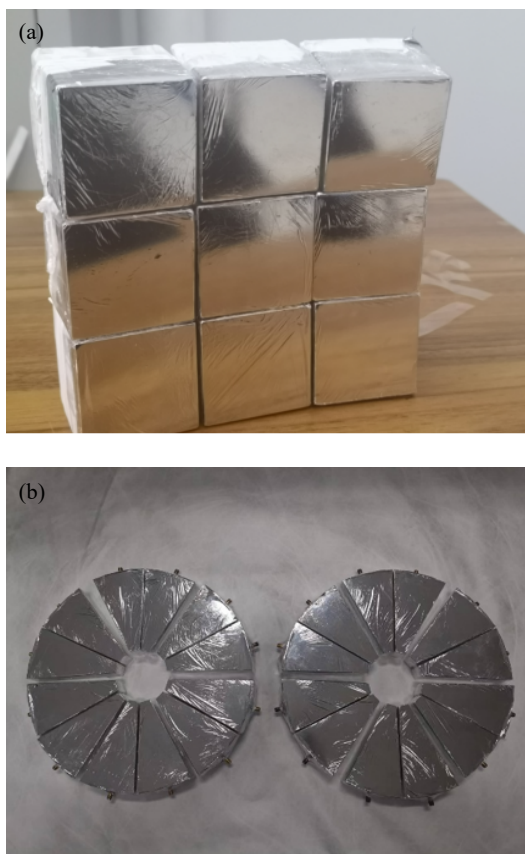


图1 方形(a)和楔形(b)CsI(Tl)探测器阵列的照片

### 1.2 单个CsI(Tl)探测器的细节

单纯的CsI(Tl)晶体并不能作为探测器使用，需要加入合适的光子传输和收集系统。通过对CsI(Tl)晶体长期的应用和调研，我们对两种CsI(Tl)晶体的包装方式如图2所示。粒子的入射面使用2 μm厚的镀铝Mylar膜覆盖，在减少入射粒子能损的同时又能反射晶体内部产生的闪烁光子减少漏光。薄膜覆盖过程中需要尽量绷紧并紧贴闪烁体表面。方形闪烁体的粒子入射面和光子收集面相对。为了匹配环形ADSSD，楔形闪烁体的粒子入射面位于晶体侧面；为了节省空间，且不影响其他探测器的安装，收集面位于楔形晶体底部。不管是方形还是楔形闪烁体，光电转换设备使用的都是灵敏面积为28 mm×28 mm的硅光电二极管(Si PIN Photodiode, PD)<sup>①</sup>。PD体积很小可以节省空间，且在光子收集和光电转换上具有很高的效率。PD和晶体之间使用光学硅脂耦合以减少光子的全反射损失，提高光收集效率。硅

脂的性能及耦合方式会极大影响CsI(Tl)探测器的光输出幅度及长期稳定性。除了粒子入射面和光收集面以外，晶体的其余部分使用三层Tyvek纸进行包装。Tyvek纸为一种漫反射材料，有一定的概率将各个角度散射的光子反射到PD的灵敏面积上，提高探测器的光输出。之前对方形CsI(Tl)的测试结果表明，Tyvek纸的性能优于生料带、镀铝Mylar膜等<sup>[14]</sup>。最后需要使用生料带和透明胶带对包装材料进行加固，使其和晶体表面紧密贴合并在使用的过程中不脱落。我们可以从改换包装材料、耦合材料以及PD等从减少光传输损失和增大光收集两个方面来升级CsI(Tl)探测器。

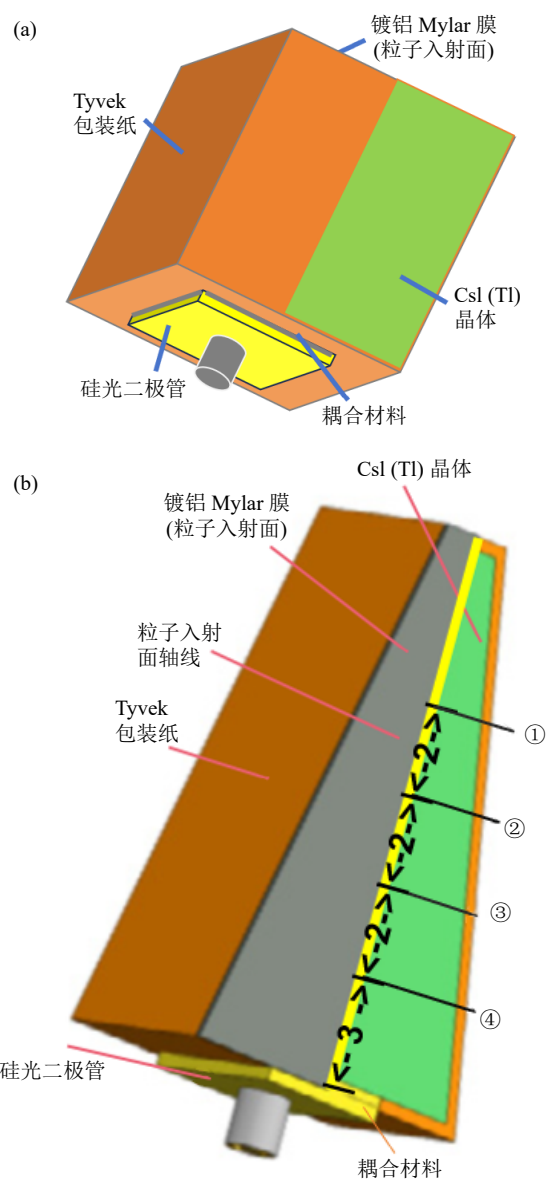


图2 方形(a)和楔形(b)CsI(Tl)探测器的包装示意图  
图(b)中的数字代表放射源的照射位置，位置1, 2, 3, 4距离PD的垂直距离分别为9, 7, 5, 3 cm。

① <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/S3584-08/index.html>

### 1.3 单个 CsI(Tl) 探测器的性能

CsI(Tl) 探测器的性能主要取决于光输出大小和能量分辨率。探测器的能量分辨率定义为: 探测器测量到的单能峰的半高宽 (FWHM) 除以峰道址  $V$ , 即

$$\text{Resolution}(\%) = \frac{\text{FWHM}}{V} \times 100\%, \quad (1)$$

其中:  $V$  的大小正比于探测器的光输出。在其他条件相同的情况下, 光输出越高, 探测器的能量分辨越好。能量分辨率的数值越低, 对不同能量粒子的分辨效果越好。

对于长达 110 mm 的楔形 CsI(Tl) 探测器来说, 放射源和束流的测试结果表明: 光输出的大小随着发光位置的变化而变化, 即光输出不均匀 (Light output non-uniformity)<sup>[15]</sup>。在实验中, 粒子会从不同位置入射, 最终得到的能谱为粒子在各个位置入射的叠加, 光输出不均匀会导致能谱展宽变大和能量分辨性能下降。为了衡量光输出大小随位置变化的剧烈程度, 我们引入了参量  $\Delta LO$ , 定义如下:

$$\Delta LO = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i} \times 100\%, \quad (2)$$

其中:  $N$  为测试位置的总数;  $C_i$  为第  $i$  个位置使用准直孔测量得到的能谱峰位值;  $C_{\max}$  和  $C_{\min}$  分别为峰位的最大值和最小值。测试位置共 4 个, 等间隔的取在图 2(b) 中粒子入射面的中轴线上, 按照距 PD 距离由远到近依次标记为位置 1, 2, 3, 4。 $\Delta LO$  为光输出极大极小值的差和平均值的比值, 其数值越小, 说明探测器的光输出不均匀度越小, 性能越好。

## 2 CsI(Tl) 探测器的升级

### 2.1 包装材料的升级

除了镀铝 Mylar 膜覆盖的粒子入射面和与 PD 相接触的光子收集面外, CsI(Tl) 晶体的其他表面部分都需要使用反射材料包装, 以降低光子在闪烁体中的传输损失, 提高光传输效率。合适的包装材料还可以提高 CsI(Tl) 闪烁体探测器的光输出均匀度, 提高整体的能量分辨率, 从而进一步提高 Si-CsI(Tl) 望远镜的粒子鉴别能力。

Tyvek 纸既不是纯粹的全反射材料, 也不是纯粹的漫反射材料, 广泛用于规则尺寸的闪烁体探测器的包装上。已有的对比测试的结果表明, 方形的 CsI(Tl) 晶体在使用 Tyvek 纸时, 性能最佳<sup>[14]</sup>。所以, 第一次物理实验时, 我们也使用了 Tyvek 纸包装长的楔形 CsI(Tl)

晶体。但是 Geant4 的模拟结果表明, 对于楔形闪烁体来说, 使用增强反射膜 (Enhanced Specular Reflector film, ESR) 时, 光输出幅度更大<sup>[13]</sup>。ESR 膜<sup>[16]</sup> 是一种全反射材料, 具有良好的镜面特性和高反射性能。它能够被轻易弯折, 是一种新型的闪烁体探测器的包装材料, 已经用于长的楔形 CsI(Tl) 晶体的包装<sup>[15]</sup>。因此, 我们尝试使用 ESR 膜对方形和楔形 CsI(Tl) 晶体进行包装, 并和 Tyvek 纸包装的晶体的性能进行对比。测试电路见文献<sup>[14]</sup>, 但是晶体的尺寸要远远大于文献<sup>[14]</sup>。对比测试时, 使用了单能的  $^{241}\text{Am}$  源, 发射 5.486 MeV 的  $\alpha$  粒子。

图 3(a) 和 (b) 分别显示了方形 CsI(Tl) 探测器在不同包装材料下的光输出和能量分辨率结果。横轴代表不同 CsI(Tl) 晶体的标号, 纵轴分别代表光输出和能量分辨率的大小。需要说明的是, ESR 膜的结果是三个不同晶体多次包装测试结果的平均值。结果表明: 包装材料为 Tyvek 纸时, 方形 CsI(Tl) 晶体光输出和能量分辨都明显好于 ESR 膜。可能的原因是: 对于规则晶体来说, 镜面反射容易增加闪烁光在闪烁体中的反射次数, 增大传输距离和光传输损失, 减少传输到收集面的效率。因此, 镜面反射的 ESR 膜没有 Tyvek 纸好。

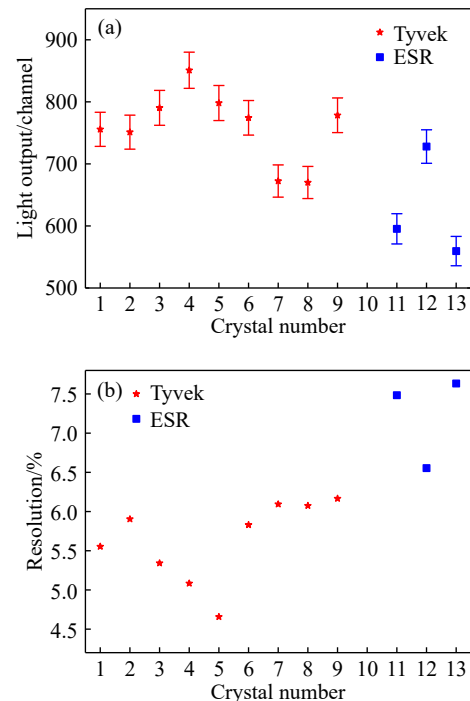


图 3 两种包装材料下方形 CsI(Tl) 探测器的光输出 (a) 和能量分辨率 (b) 对比图

对于楔形 CsI(Tl) 探测器来说, 两种包装材料下不同位置的光输出和能量分辨率的对比见图 4(a) 和 (b)。横轴代表  $\alpha$  粒子的不同入射位置, 1, 2, 3, 4 分别表示在

晶体轴线上(如图2(b)中所示)距离PD为9, 7, 5, 3 cm时的四个入射位置。在测试时, 不同入射位置前面放置了直径为1.2 cm的准直孔,  $^{241}\text{Am}$ 源发射的5.486 MeV的 $\alpha$ 粒子只能从准直孔穿过到达CsI(Tl)闪烁体的入射面。纵轴为源置于不同位置时测量得到的能谱峰位, 即探测器的光输出大小。图4(a)为多次重复实验后两种包装材料下的最佳光输出效果, 可以观察到80  $\mu\text{m}$ 的ESR膜在这四个位置的光输出大小都高于Tyvek纸。根据这些实验结果和式(2), 我们得到ESR膜的 $\Delta LO$ 值为11.5%, Tyvek纸的 $\Delta LO$ 值为12.7%。由于“楔形闪烁体的聚光效应”<sup>[17]</sup>, 距离读出器件越远, 光收集量越多的现象和参考文献中的模拟结果<sup>[12]</sup>一致。由图4(b)可以看出两种包装材料具有类似的能量分辨率, 且能量分辨率随测试位置和PD之间距离的减小变差的趋势。由源的面积大小、准直孔的大小以及源的摆放位置等因素带来的系统误差约为0.2%。考虑到系统误差后, 能量分辨率随位置的变化趋势并不明显。结合图4(a)和(b)的测试结果, ESR膜包装楔形CsI(Tl)晶体时具有更高的光输出和更好的光输出均匀度, 且能量分辨率基本不变差。文献[13]给出了具体的物理解释: 即楔形有聚光的作用, 镜面反射可以减少光在闪烁体中的传输次数和传输距离, 进而减少光传输损失增大光输出。实际的探测器阵列中, 粒子需要从各个位置入射, 更好的光输出均

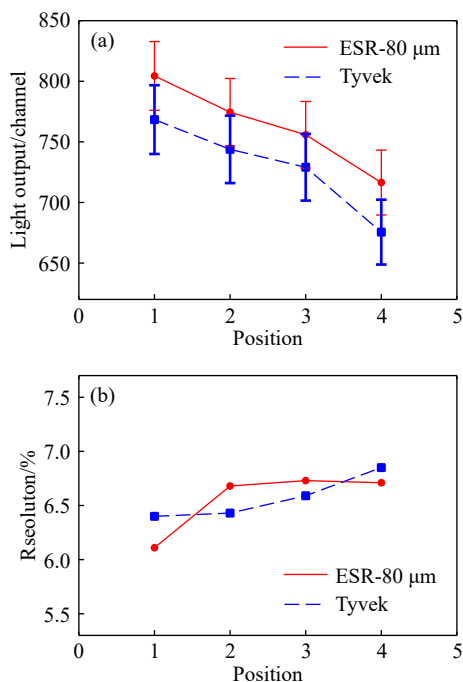


图4 两种包装材料下楔形CsI(Tl)探测器的光输出(a)和能量分辨率(b)对比图

横轴的数字代表不同的测试位置, 与图2(b)中的放射源照射位置一一对应。

匀度和更高的光输出有利于粒子鉴别能力。基于以上测试结果, 我们采用ESR膜作为楔形CsI(Tl)探测器的包装材料。

## 2.2 长期稳定性测试

依据我们以前的对比测试结果<sup>[14]</sup>, 我们选择了光学硅脂作为PD和CsI(Tl)晶体之间的耦合剂, 以减少光子在空气中的全反射损失, 提高光收集效率。硅脂有一定的粘性, 操作得当, 可以保持很长时间的稳定性。但是, 硅脂也会随着时间的增长风干老化, 影响耦合性能, 降低探测器的光输出。另外, 随着制作时间的增长, CsI(Tl)探测器在使用的过程中可能会出现包装材料松散等情况, 降低光输出, 进而影响探测器的性能。实际的RIB实验通常需要持续数十天, 这就要求CsI(Tl)探测器的性能在物理实验时间内保持稳定。

为了验证制作好的CsI(Tl)探测器的性能是否稳定, 我们在半个月的时间内对同一块方形CsI(Tl)探测器进行了9次重复测量, 结果如图5所示。图5的横坐标为测量次数, 数字越大代表测量时间距离制作时间越长; 纵坐标为每次测量时光输出大小, 误差为统计误差。九次测量的条件均保持一致, 例如: 放射源及其摆放位置、电子学参数以及测量时长等。由此可见, 方形CsI(Tl)探测器的光输出幅度随着测量次数的增长没有明显的变化趋势, 且在误差范围内保持一致。该结果表明在目前的包装耦合方式下, 探测器的性能可以保持长期的稳定, 能够胜任RIB物理实验。

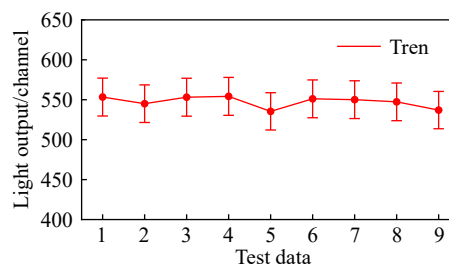


图5 方形CsI(Tl)探测器的光输出随测量次数的变化

## 2.3 光电转换设备的升级计划

Geant4的模拟结果表明<sup>[13]</sup>, 光输出的大小与光电转换设备的表面积大小密切相关: 光电转换设备的表面积越接近光收集面的面积, 光输出越大, CsI(Tl)探测器的性能越好。目前采用的PD是市场上能够买到的表面积最大的。如果要增加光电转换设备的面积, 只能更换为其他类型的设备, 例如: 近些年来新研发的硅光电倍增管(SiPM)。不同于只有光电转换功能的PD, SiPM类似于传统的光电倍增管, 还有光电子的倍增功能, 能更好地输出小能量沉积时产生的少量光子信号, 降低探

测器的阈值。SiPM的体积和PD相当,都远远小于光电倍增管,可以用于空间狭小的真空靶室。单个SiPM的表面积较小,通常不超过 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,但是SiPM很容易组成不同形状和尺寸的阵列,更好地匹配闪烁体探测器的光输出面。例如,楔形CsI(Tl)探测器的光输出面尺寸为 $69.5\text{ mm}\times 31.0\text{ mm}$ ,我们计划购置 $3\times 7$ 的SiPM阵列覆盖整个晶体的读出面,替代只占读出面36%的PD。但是, SiPM增益的温度依赖性、 $3\times 7$ 阵列信号的读出等问题,还需要详细的测试。期待下一次的物理实验中,我们能采用升级为SiPM阵列的CsI(Tl)探测器。

### 3 获取系统的升级

上一节从CsI(Tl)探测器本身对其性能进行了升级测试,本节将从电子学和获取系统方面着手,提升CsI(Tl)探测器的性能。我们计划使用数字化获取系统Pixie-net替代传统的电子学获取系统。Pixie-net是XIA公司生产的、四通道、桌面版的数字化仪器,采样率为250 MHz。Pixie-net不需要专门的XIA机箱和控制器,直接和电脑连接后就可以工作<sup>[18]</sup>。Pixie-net可以替代放大器、甄别器、脉冲幅度分析器等多个传统电子学插件。Pixie-net可以用于采集信号波形,测量能量,完成脉冲形状分析,并且可以实现各通道之间的触发、符合和反符合。它适用于包括气体、闪烁体、半导体在内的各种类型的探测器<sup>[18]</sup>。相比于传统的获取系统, Pixie-net具有更强的通用性,并且操作更简便<sup>[18]</sup>。

#### 3.1 测试电路及信号观测

测试电路如图6所示。我们按图6中的顺序连接好实验电路,并将用户电脑和Pixie-net的Linux内核相连接。测试中,我们使用了 $^{239}\text{Pu}$ - $^{241}\text{Am}$ 的混合 $\alpha$ 源,可以同时发射能量为5.155, 5.486 MeV的 $\alpha$ 粒子。该放射源是一个直径为1.2 cm的面源。

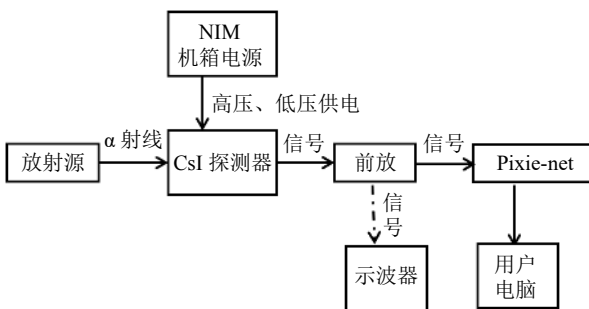


图6 Pixie-net 数字化仪的测试电路图

给PD加压后,可以通过ADC traces模块实时查看输入Pixie-net的实时信号,其中横坐标的值代表采样点的数量,两个采样点的间隔为200 ns,总的宽度为

8 000个采样点,即最多可以显示1.6 ms内的实时输入波形。纵坐标的值为ADC总量程平均分成的份数,代表信号幅度的大小,测试所用Pixie-net的ADC为12位的,所以纵坐标的最大值是4 096。图7为一个信号脉冲的实时波形放大图。该信号的上升时间(约 $4.37\text{ }\mu\text{s}$ )、衰减时间(约 $7.63\text{ }\mu\text{s}$ )等特征和示波器观察到的结果一致,说明我们捕获到了正确的脉冲信号。实验中只使用了3通道,因此图7只在3通道上观察到脉冲信号。

我们还可以通过实时能谱图(MCA spectra)界面监测Pixie-net获取的实时能谱,横轴为道址,最大为32 k,纵轴为计数值。可以根据实时能谱图上的噪声大小和能谱形状,粗略调整Pixie-net系统的测量参数。另外,我们还可以通过实时运行状态(run statistics)界面刷新获得系统的运行时间、输入输出计数率、滤波死时间等信息,以实现数字化获取系统的实时监控。

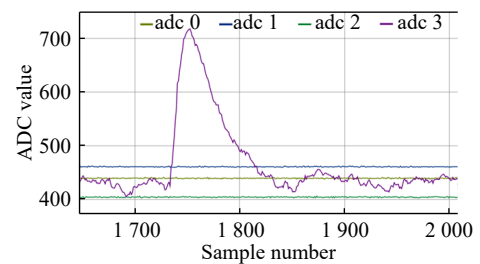


图7 Pixie-net 数字化仪的实时输入信号

#### 3.2 Pixie-net的工作原理

CsI(Tl)探测器的输出信号经过前置放大器后接入Pixie-net进行测试。前放为电荷灵敏型放大器,可以输出幅度和粒子能量呈正比关系的电压信号。如图7所示,前放输出信号具有快速上升的前沿和指数衰减的后沿,可以表示为

$$V_x(t) = A(e^{-t/\tau} - e^{-t/\theta}), \quad (3)$$

其中: $A$ 为信号的最高幅度; $\theta$ 为信号的上升时间; $\tau = RC$ ,为指数衰减时间。在记录信号的幅度之前,类似的原始信号往往需要通过滤波提高信噪比。传统的模拟电子学,一般通过主放的一级微分和多级积分,将前放的输出信号整形为三角或者高斯脉冲后再被多道分析器记录;数字化系统,主要通过波形采样将前放信号转为数据集,随后再通过一定的算法对前放信号进行滤波。

Pixie-net采用了梯形滤波方式(Trapezoidal Filtering, TF),计算公式可以表示为<sup>[18]</sup>

$$LV_{x,k} = \sum_{i=k-L+1}^k V_i - \sum_{i=k-2L-G+1}^{k-L-G} V_i, \quad (4)$$

其中： $V_i$ 为采样点 $i$ 的幅度； $L$ 为滤波长度； $G$ 为阶跃区间长度，等式左侧的 $L$ 为归一化系数。这种方法可以看作阶跃区域之后“ $L$ ”个“ $V_i$ ”的幅度平均值减去阶跃区域之前“ $L$ ”个“ $V_i$ ”的幅度平均值，也被称为移动平均数(Moving Average)操作。我们需要根据信号的特点选择合适的 $L$ 和 $G$ 的大小，在提高信噪比的同时防止信号的堆积。在理想情况下，滤波输出信号为对称的梯形，上升时间和下降时间均为 $L$ ，梯形平台的持续时间为 $G$ 。Pixie-net 数字化仪内部有两个梯形滤波器，快速滤波器和慢速滤波器(或者能量滤波器)。前者的 $L$ 和 $G$ 很短，用于检测真实信号的到来；后者的 $L$ 和 $G$ 较长，用于测量信号的幅度或者能量信息。

### 3.3 Pixie-net 数字化仪的参数及优化

Pixie-net 数字化仪的滤波参数对测试结果有很大的影响，需要根据实际输入信号的特征，设置合适的测量参数，才能尽可能正确地记录探测器的信号，且保持探测器的优良性能。同时，合适的参数，还可以减少获取系统的死时间，提升获取系统的计数率。根据 Pixie-net 数字化仪的 TF 滤波原理和 CsI(Tl) 的信号特征，并结合测试经验，我们发现影响 CsI(Tl) 探测器分辨的主要参数有：1) 快速滤波的阈值， $L$  和  $G$ 。即触发阈值(TRIGGER-Threshold)，快速滤波上升时间(TRIGGER-RISETIME)和快速滤波平台时间(TRIGGER-FLATTOP)。这些参数主要影响获取系统的死时间(或者计数率)，需要结合信号特点和噪声水平进行仔细调节；2) 能量滤波器的 $L$ 和 $G$ 。即能量滤波上升时间(ENERGY-RISETIME)和能量滤波平台时间(ENERGY-FLATTOP)。 $L$ 的长度适中时，探测器具有最好的能量分辨； $G$ 需要长于典型信号的上升时间；3) 衰减时间(TAU)：衰减时间用于校正前一个脉冲下降斜坡上的脉冲能量。如果 $\tau$ 偏离最佳值，能谱将变宽。理论上最佳的衰减时间即为输入信号的衰减时间。

在初步寻找找到了一套适合于 CsI(Tl) 探测器的测量参数之后，我们通过控制变量法对比研究了一些变量对探测性能的影响，包括加在 PD 上的偏压，快速滤波上升时间，能量滤波上升时间，能量滤波平台时间，衰减时间等。对比测试时，我们选用了方形 CsI(Tl) 探测器。

测试结果表明快速滤波上升时间和阈值对获取事件数目(或者获取系统的死时间)的影响最大，具体结果如图 8 所示。从图 8(a)中可以看出，在阈值保持最低值设置时，获取系统记录的有效事件数目随着快速滤波上升时间的增加而增加，其中最长的时间取在 0.456  $\mu\text{s}$  是由

于仪器本身的限制。我们可以利用 TF 滤波原理结合信号特征解释这个现象：快速滤波上升时间过短时，快速滤波输出信号的幅度过小，导致难以通过设置良好的阈值区分噪声和真实信号。大量噪声和真实信号会一起产生触发获取系统，导致触发率过高、死时间增大，进而导致大量真实信号被丢失、漏记。当快速滤波上升时间逐渐增加时，快速滤波输出信号的幅度逐渐超过噪声，获取系统的触发率逐渐降低，死时间减少，大多数真实事件都被记录下来。因此在当前的条件下，我们选择 0.456  $\mu\text{s}$  为最佳的快速滤波上升时间。这个时间远大于系统推荐的 0.1~0.2  $\mu\text{s}$  的时间，可能的主要原因是 CsI(Tl) 探测器的输出信号慢且幅度小。

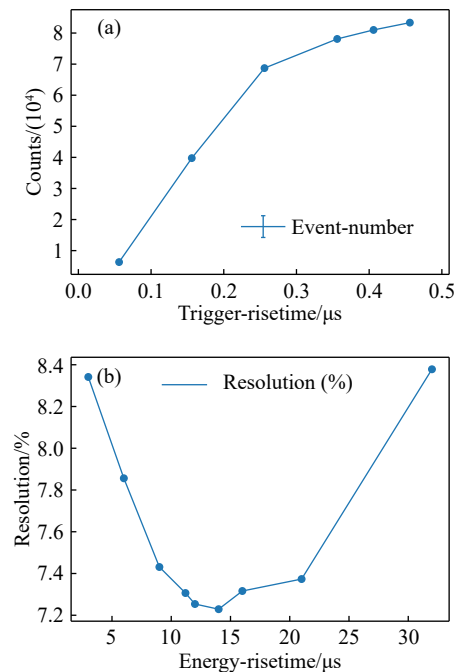


图 8 快速滤波上升时间对获取事件数目的影响(a)；能量滤波上升时间对能量分辨率的影响(b)

慢速(或者能量)滤波的上升时间对 CsI(Tl) 探测器的能量分辨率影响最大，结果见图 8(b)。可以看出能量分辨率随着上升时间的增加先下降后上升，可能的原因为：梯形算法的滤波输出为一种平均效应的结果。当上升时间过短时，参与平均计算的区域过短，导致不能反应出信号的完整特征；当上升时间过长时，参与平均计算的区域过长，会把基线噪音的部分也包含进来，同时还会大大增加获取系统的死时间，丢失真实事件。这两种情况都会导致滤波效果变差，并最终反映为能量分辨率变差。对于 CsI(Tl)，能量滤波上升时间可以选择为 13~15  $\mu\text{s}$ ，也远远大于说明书上推荐的几  $\mu\text{s}$ 。

其他测量参数在合适的范围内对事件数和能量分辨率的影响较小，并没有反映出明显的变化趋势。通过总

结测试结果, 得到的 CsI(Tl)探测器的测量参数见表 1。因为楔形 CsI(Tl)探测器的读出 PD 和输出信号都类似于方形的, 所以表 1 中的最佳参数也适用。

表 1 CsI 探测器的最佳参数

参数	最佳设定值
PD 电压	50~90 V
快速滤波上升时间	0.456 $\mu$ s
能量滤波上升时间	13~15 $\mu$ s
能量滤波平台时间	4~5 $\mu$ s
衰减时间	5~7 $\mu$ s

### 3.4 获取系统的对比

我们使用表 1 中的最优参数分别对方形 CsI(Tl)探测器和楔形 CsI(Tl)探测器进行了测量。作为参照, 我们还在相同的实验条件下使用传统电子学插件测试了这两种不同形状的探测器, 测试电路见文献 [14]。图 9 中为方形 CsI(Tl)探测器的测量结果对比。由于测试采用的是 Am-Pu 混合  $\alpha$  源, 因此得到的能谱具有两个高斯峰。从图 9 看, 传统电子学系统呈模糊的两个峰, 但是 Pixie-net 获取系统可以清晰的将两个高斯峰分开, 分辨率略好于传统获取系统。

为了得到方形 CsI(Tl)探测器的能量分辨率, 可以对得到的能谱进行基于高斯函数的非线性最小二乘法拟合。我们假定 CsI(Tl)探测器对 5.155, 5.486 MeV 的  $\alpha$

粒子的能量分辨率相同, 即假定能谱曲线的方程具有以下形式:

$$f(x) = a_1 e^{-\frac{(x-b_1)^2}{2\sigma_1^2}} + a_2 e^{-\frac{(x-b_2)^2}{2\sigma_2^2}}, \quad (5)$$

通过拟合图 9(a) 和 (b), 得到方形 CsI(Tl)探测器的能量分辨率分别为 7.6% 和 6.4%。定量来看, 使用数字化获取系统得到的 CsI(Tl)探测器的能量分辨率好于传统获取。需要指出的是, 测试使用的方形 CsI(Tl)探测器是 Tyvek 纸包装的。

利用同样的方法, 我们还对比测试了楔形 CsI(Tl)探测器, 结果总结在表 2。可以看出, 对于这两种 CsI(Tl)探测器, Pixie-net 获取系统无论是在有效事件数, 还是在能量分辨率上都略优于传统获取系统。

表 2 测量结果对比

测量方式	方形 CsI 探测器		楔形 CsI 探测器	
	Pixie-net	传统获取	Pixie-net	传统获取
能量分辨率/%	6.42	7.59	9.67	10.35
事件数/N	73 148	71 518	77 688	76 398

## 4 总结

CsI(Tl)闪烁体探测器是放射性核束物理实验中的一种常用探测器。北京大学核物理实验组已经建立了基于 Si-CsI(Tl)的望远镜阵列, 利用  $\Delta E-E$  方法, 实现了  $Z=1$  和  $Z=2$  的轻带电粒子的鉴别, 但也发现了 CsI(Tl)探测阵列中存在的问题。针对这些问题, 本文从 CsI(Tl)探测器本身和获取系统两方面对 CsI(Tl)探测阵列进行了测试和升级。通过对 Tyvek 纸和 ESR 增强反射膜两种包装材料的对比测试, 发现: 对于楔形 CsI(Tl)闪烁体来说, ESR 膜具有更高的光输出和更好的光输出均匀度; 但是对于方形 CsI(Tl)闪烁体来说, Tyvek 纸的效果更好。通过长期稳定性测试发现, 在现有的包装耦合方式下, CsI(Tl)探测器的性能适用于放射性核束物理实验。我们使用 Pixie-net 数字化仪对 CsI(Tl)探测器进行了测试, 得到了一组最佳运行参数。在最佳参数下, Pixie-net 数字化仪得到的分辨优于传统电子学系统。未来, 我们计划采用拥有更大灵敏面积的 SiPM 来进一步提升 CsI(Tl)探测器的性能; 同时采用数字化获取系统记录 CsI(Tl)探测器的波形, 尝试脉冲波形法甄别带电粒子。

### 参考文献:

- [1] LI G, TAN Z W, LOU J L, et al. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3): 426. (in Chinese)  
(李根, 谭智威, 楼建玲, 等. *原子核物理评论*, 2020, 37(3): 426.)
- [2] CARBONI S, BARLINI S, BARDELLI L, et al. *Nucl Instr and*

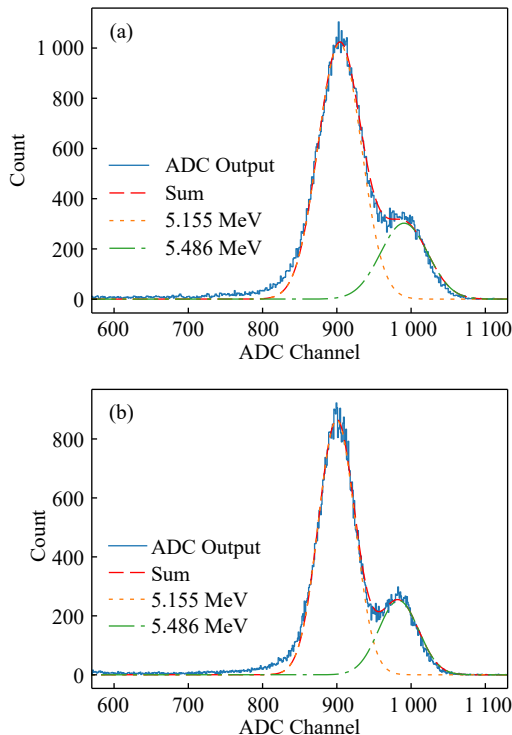


图 9 传统电子学插件和多道测量得到的能谱图 (a); Pixie-net 数字化仪测量得到的能谱图 (b)



- Meth A, 2012, 664: 251.
- [3] ROUT P C, DATAR V M, CHAKRABARTY D R, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2019, 925: 184.
- [4] LIU Y, CHEN C P, LI H B, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2002, 482: 125.
- [5] DAVIN B, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2001, 473: 302.
- [6] BEAUMEL E, et al. *The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*, 2005, 25: 287.
- [7] ACOSTA L, ANDOLINA R, et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 730: 012001.
- [8] YUE K, XU H S, LIANG J J, et al. *Nuclear Physics Review*, 2010, 27(4): 445. (in Chinese)  
(岳珂, 徐珊瑚, 梁晋洁, 等. *原子核物理评论*, 2010, 27(4): 445.)
- [9] JIAO L, JIN S L, LI J X, et al. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34(2): 190. (in Chinese)  
(焦磊, 金仕纶, 李加兴, 等. *原子核物理评论*, 2017, 34(2): 190.)
- [10] LOU J L, YE Y L, YANG Z H, et al. *Chin Sci Bull*, 2023, 68(9): 12. (in Chinese)  
(楼建玲, 叶沿林, 杨再宏, 等. *科学通报*, 2023, 68(9): 12.)
- [11] ZHU H Y, LOU J L. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34: 159.
- [12] LI G, LOU J L, YE Y L, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2021, 1013: 165637.
- [13] LI G. Study on Elastic Scattering of Single-neutron Halo Nucleus  $^{15}\text{C}$  on Deuterons and Property Investigation of the Wedge-shaped CsI(Tl) Crystals[D]. Beijing: Peking University, 2021.
- [14] MA L Y, HUA H, LU F, et al. *Chin Phys C*, 2009, 33: 176.
- [15] KNYAZEV A, PARK J, GOLUBEV P, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2019, 940: 393.
- [16] Enhanced Specular Reflector Films[EB/OL]. [2023-07-06]. <https://www.3m.com>.
- [17] SND K. T. BRINKMANN S D, DREXLER P, et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 1840: 928.
- [18] Pixie-net User Manual[EB/OL]. [2023-07-06]. <https://s3.us-west-1.amazonaws.com/download.xia.com/products/pixie-net/documents/manuals/XIA-Pixie-Net-MAN-Users-Manual-2018-02-06.pdf>.

## Upgrade and Test of the CsI(Tl) Detection Array

WAN Wenwu, LOU Jianling<sup>†</sup>, ZHU Hongyu, XIA Bolong, GE Haoyu, YE Yanlin

(School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** In radioactive nuclear beam physical experiments with middle and low incident energies, the CsI(Tl) detectors are usually combined with the silicon detectors to make up of the Si-CsI(Tl) telescopes to identify charged particles using the  $\Delta E-E$  method. The performance of CsI(Tl) detector and the particle identification property of Si-CsI(Tl) telescope depend on the light output amount, light-output uniformity, as well as data acquisition system (DAQ). In this paper, we try to change the covering materials and the photon-electron conversion devices of the CsI(Tl) detector to increase the light output, improve the detection long-term stability and the light output uniformity of the wedged CsI(Tl) detector. Moreover, we test and compare the properties of Cs(Tl) detectors using different DAQ systems, which show that the energy resolution and the counting effective are better if the digital DAQ with the best parameters set is used for the Cs(Tl) detector.

**Key words:** CsI(Tl) detector; optical output; energy resolution; digital acquisition system; trapezoidal filter

Received date: 21 Aug. 2023; Revised date: 23 Jan. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (12275007, U1867214, 11775004); State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University (NPT2021ZZ01)

<sup>†</sup> Corresponding author: LOU Jianling, E-mail: [jlou@pku.edu.cn](mailto:jlou@pku.edu.cn)