



基于SiPM读出的塑料闪烁体探测器时间性能研究

周冰倩 章学恒 方芳 闫铎 唐述文 余玉洪 王世陶 张永杰 刘相满 赵亦轩 金树亚 刘忠 孙志宇

Time Performance Study of Plastic Scintillator Detector with SiPM Readouts

ZHOU Bingqian, ZHANG Xueheng, FANG Fang, YAN Duo, TANG Shuweng, YU Yuhong, WANG Shitao, ZHANG Yongjie, LIU Xiangman, ZHAO Yixuan, JIN Shuya, LIU Zhong, SUN Zhiyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC53>

引用格式:

周冰倩, 章学恒, 方芳, 闫铎, 唐述文, 余玉洪, 王世陶, 张永杰, 刘相满, 赵亦轩, 金树亚, 刘忠, 孙志宇. 基于SiPM读出的塑料闪烁体探测器时间性能研究[J]. 原子核物理评论, 2020, 37(3):749–756. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC53

ZHOU Bingqian, ZHANG Xueheng, FANG Fang, YAN Duo, TANG Shuweng, YU Yuhong, WANG Shitao, ZHANG Yongjie, LIU Xiangman, ZHAO Yixuan, JIN Shuya, LIU Zhong, SUN Zhiyu. Time Performance Study of Plastic Scintillator Detector with SiPM Readouts[J]. Nuclear Physics Review, 2020, 37(3):749–756. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC53

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于SiPM的新型起始时间探测器研制

Development of a New-typed Start-time Detector Based on SiPM

原子核物理评论. 2019, 36(3): 343–350 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.343>

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>

闪烁体探测器中光的衰减通式(英文)

A Universal Formula for Light Attenuation of Scintillator Detector

原子核物理评论. 2019, 36(1): 78–84 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.078>

低本底液闪中子探测器的材料测试研究

Study of Material used in Liquid Scintillator Detector with Low Background

原子核物理评论. 2017, 34(3): 604–610 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.604>

用于兰州彭宁离子阱的多反射飞行时间质量分析器的设计和优化

Design and Optimization of A Multi-reflection Time-of-flight Mass Spectrometer for LPT

原子核物理评论. 2017, 34(3): 624–629 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.624>

应用于热中子的nTHGEM探测器性能研究

Performance Study of nTHGEM Detector for Thermal Neutron

原子核物理评论. 2018, 35(2): 172–178 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.172>

文章编号: 1007-4627(2020)03-0749-08

基于 SiPM 读出的塑料闪烁体探测器时间性能研究

周冰倩^{1,2}, 章学恒^{1,2,†}, 方芳^{1,2}, 闫铎^{1,2}, 唐述文^{1,2}, 余玉洪^{1,2}, 王世陶^{1,2}, 张永杰^{1,2},
刘相满^{1,2,3}, 赵亦轩^{1,2}, 金树亚^{1,2}, 刘忠^{1,2}, 孙志宇^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049;

3. 河南工业大学电气工程学院, 郑州 450001)

摘要: 研究了基于硅光电倍增管 (SiPM) 双端读出的面积为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的薄塑料闪烁体探测器的时间性能。 ^{239}Pu 放射源测试结果显示: (1) 在多支 SiPM 串连读出方式下, 随着 SiPM 数量的增加, 探测器时间分辨逐渐变好; (2) 在固定 12 支 SiPM 数量不变的情况下, 并联支路越多, 探测器时间分辨越差; (3) 采用快时间塑料闪烁体并增加其厚度, 可有效提高探测器时间分辨; (4) 采用比束斑尺寸更大的塑料闪烁体, 可有效提高探测器时间分辨的位置均匀性; (5) 对于 1 mm 厚的 EJ232 塑料闪烁体探测器, 在单端 12 支 SiPM 串行连接的情况下, 可获得好于 131 ps 的时间分辨。这一研究对 RIBLL2 起始时间探测器的升级改造具有重要的指导意义。

关键词: 起始时间探测器; 塑料闪烁体; 硅光电倍增管; 时间分辨

中图分类号: O571.1

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC53

1 引言

自 20 世纪 80 年代起, 放射性核束开始被广泛应用于极端同位旋条件下核素的结构及性质研究, 并取得了许多重要成果^[1-2], 这使得放射性核束物理已成为当前核物理研究的热门领域之一, 同时也促进了放射性核素产生装置的发展。世界上各大核物理实验室均已建立了各具特色的放射性次级束流产生装置, 兰州重离子研究装置 (Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL) 中的第二条放射性次级束流线 (The Second Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou, RIBLL2)^[3] 就是这些装置中一条典型的弹核碎裂型次级束流产生装置, 可提供大量能量在几百 MeV/u 量级的放射性次级束流, 是国际上极少数可以开展中高能次级束物理实验研究的场所之一。

清楚的粒子鉴别是开展次级束物理研究的重要保障。RIBLL2 采用了常用的 $B\rho$ -TOF- ΔE 方法^[4] 实现粒子鉴别, 利用现有的粒子鉴别探测器系统, RIBLL2 已实现了 $A < 40$ 核区核素的鉴别, 并在此核区开展了系列次级束物理实验, 取得了一些重要成果^[5-9]。为了拓展研究

内容, 如研究 $N=40$ “翻转岛”区^[10] 的核素结构及性质, 需要 RIBLL2 能够在 $A \approx 80$ 的较高质量区提供次级束流并实现粒子鉴别, 这对 TOF 探测器提出了较高的要求。碎片质量分辨 σ_A 与 TOF 探测器时间分辨 σ_{TOF} 间的关系可由下式描述^[4]:

$$\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{B\rho}}{B\rho}\right)^2 + \left(\frac{\gamma^2 \sigma_{\text{TOF}}}{\text{TOF}}\right)^2, \quad (1)$$

式中: A 为碎片质量数; $\sigma_{B\rho}/B\rho$ 为磁刚度测量精度; TOF 为飞行时间; γ 为相对论洛伦兹因子。RIBLL2 束线的色散函数为 $11.69\text{ mm}\%$ ^[6], 若位置探测器的位置分辨为 1 mm, 那么理想情况下碎片的磁刚度测量精度 $\sigma_{B\rho}/B\rho$ 可达到 8.55×10^{-4} 。对于能量为 400 MeV/u 的次级束流, γ 值为 1.429, 经过 42 m 的飞行距离^[6], TOF 值为 196.1 ns, 根据式 (1), 若 σ_A 按 0.2 计算, 实现 $A=80$ 核素的鉴别, TOF 的时间分辨要好于 $\sigma_{\text{TOF}} \sim 225.6\text{ ps}$ 。若假设起始和停止时间探测器具有相同的分辨, 那么则需要起始和停止时间探测器的时间分辨要达到 159.5 ps 才能满足粒子鉴别的要求。

当前 RIBLL2 的 TOF 探测器系统, 起始时间探测

收稿日期: 2020-01-13; 修改日期: 2020-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1732137, U1832122); 中国科学院青年创新促进会项目 (2018449); 中国科学院开放研究项目; 国家重点研发计划项目 (2018YFA0404402)

作者简介: 周冰倩 (1993-), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: zhoubcq@impcas.ac.cn

† 通信作者: 章学恒, E-mail: zhxh@impcas.ac.cn。

器是由光电倍增管单端读出的尺寸为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 0.3\text{ cm}$ 的大面积塑料闪烁体探测器, 停止时间探测器是由光电倍增管双端读出的尺寸为 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}\times 0.3\text{ cm}$ 的塑料闪烁体探测器^[6]。起始时间探测器具有较大的面积和较薄的厚度, 较大的面积是为了满足束斑尺寸的要求, 较薄的厚度是为了有效减小穿过束流的角度和能量发散, 保证碎片传输效率。塑料闪烁体面积越大、厚度越薄, 闪烁光的收集效率越低, 越不利于得到好的时间分辨; 另外, 由于探测器安装空间狭小且 RIBLL2 束线对真空度的要求高 ($\sim 10^{-7}\text{ Pa}$), 起始时间探测器被安装在特制的真空盒中, 有限的空间使得探测器只能由单支光电倍增管单端读出, 这种结构造成了探测器测量的时间信息与碎片穿过位置相关, 影响了时间分辨, 使得 RIBLL2 粒子鉴别能力受限^[7]。因此, 为了提高现有 RIBLL2 起始时间探测器的时间分辨, 在要求尽可能多地收集闪烁光的同时, 还要在有限的空间内实现塑料闪烁体的双端读出, 以消除位置信息对时间测量精度的影响。

硅光电倍增管 (silicon photomultiplier, SiPM) 是一种新型的光电探测器件, 由工作在盖革模式下的雪崩二极管阵列组成, 相较于光电倍增管, 其具有结构紧凑、价格便宜、对磁场不敏感等特点, 已被广泛应用于塑料闪烁体飞行时间探测器的研制, 并取得了较好的结果^[11–15]。紧凑的结构可有效节省探测器的占用空间, 因此, SiPM 特别适合于 RIBLL2 起始时间探测器的研制。然而, 由于单支 SiPM 有效面积较小 (典型最大尺寸 $\sim 0.6\text{ cm}\times 0.6\text{ cm}$), 为了尽可能多地收集闪烁光, 需

要采用多支 SiPM 进行读出, 多支 SiPM 一般可通过串行或并行的方式进行连接以减少电子学通道数节约成本。串行或并行连接在电路上可以将多支 SiPM 等效为一个大面积的 SiPM, 其中串行连接会使等效 SiPM 的总电容变小, 输出信号具有较快的上升时间和较小的幅度; 相反, 并行连接会使等效 SiPM 的总电容变大, 输出信号具有较慢的上升时间及较大的幅度^[16]。快的上升时间, 利于获得好的时间分辨; 低的信号幅度, 会使探测器信噪比变差从而影响时间分辨, 因此, 在实际应用中, 需要优化多支 SiPM 的连接方式, 在获得快的信号上升时间的同时, 还要使信号具有足够大的幅度。

本文拟对采用 SiPM 双端读出的面积为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的薄塑料闪烁体探测器的时间性能进行研究。通过改变 SiPM 数量、优化 SiPM 连接方式以及选择塑料闪烁体型号及厚度等方法进行性能测试, 以期获得较好的时间分辨, 为将来 RIBLL2 起始时间探测器的升级改造提供必要的技术支持。

2 研究方案

为了研究 SiPM 读出的大面积薄塑料闪烁体探测器的时间性能, 我们研制了测试样机。测试样机选用了美国 Eljen Technology 公司生产的两种型号的塑料闪烁体, 表 1 列出了两种塑料闪烁体的型号、尺寸、以及一些相关参数^[17]。两种塑料闪烁体具有 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的有效面积和相对较薄的厚度, 满足 RIBLL2 起始时间探测器所需的尺寸要求。

表 1 样机两种塑料闪烁体的相关参数

型号	尺寸/(cm×cm×cm)	发光效率/(photons·MeV ⁻¹ ·e ⁻)	最大发射波长/nm	上升时间/ns	衰减时间/ns
EJ212	10×10×0.05	10 000	423	0.9	2.4
EJ232	10×10×0.1	8 400	370	0.35	1.6

测试样机采用多支 SiPM 双端读出, SiPM 型号为中国滨松公司生产的 S13360-3050PE。表 2 列出了其在室温条件下相关性能参数^[18], 其光谱响应的峰值波长为 450 nm , 可有效匹配塑料闪烁体的发射光谱。

SiPM 将被固定在特制的 PCB 电路板上, 通过跳线可方便地改变 SiPM 的数量及连接方式。SiPM 与塑料闪烁体之间采用硅脂耦合, 测试中将工作于室温条件下。

表 2 S13360-3050PE 性能参数 (25 °C)

有效面积/(cm×cm)	相素点个数	光谱响应范围/nm	峰值波长 λ_p /nm	光子探测效率 $\lambda=\lambda_p$ /%	增益	击穿电压 V_B /V	工作电压/V
0.3×0.3	3 600	320~900	450	40	1.7×10^6	53 ± 5	V_B+3

图 1 给出了待测样机的 SiPM 读出电路及相应电子学框图。测试过程中会采用多支 SiPM 串行连接方式对闪烁光进行读出, 因此样机的高压电源需要具有较大的工作电压及工作电流, 我们选用了德国 Wiener 公司生

产的 EHS F030P 电源模块提供高压, 其可提供最大 $+3\ 000\text{ V}$ 的工作电压和 3 mA 的工作电流, 以及 $<10\text{ mV}$ 电源纹波, 这些指标可满足 SiPM 的供电要求。高压模块提供的高压将经过一个 $1.5\text{ k}\Omega$ 的保护电阻加到 SiPM

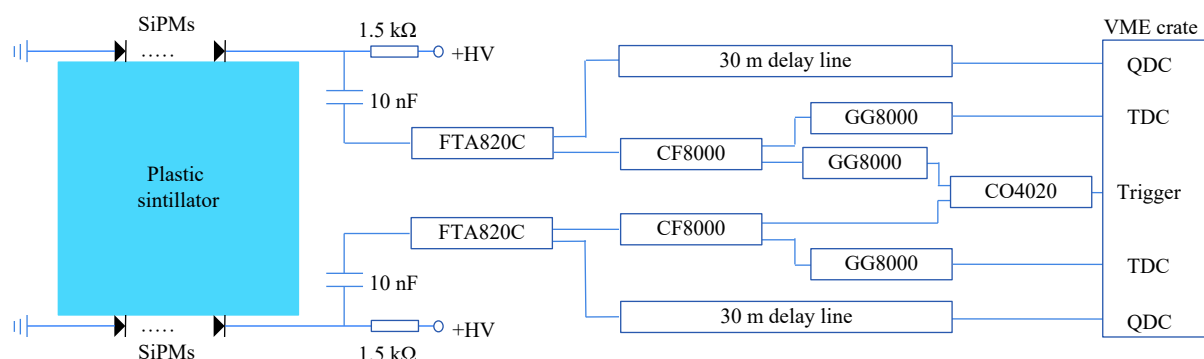


图1 (在线彩图) SiPM 读出电路及样机测试电子学框图

阵列上，阳极信号经过一个 10 nF 的隔直电容输入到具有 20 倍增益的快时间放大器 FTA820C 上。小的电容容值，可以有效减小读出电路的 RC 常数，使信号获得快的上升时间，利于时间测量。快时间放大器输出的信号将被分为两路，其中一路经过 30 m 长的延迟线后送入 VME 获取系统中的 CAEN V965 QDC 模块记录其电荷量；另一路经过 CF8000 恒分甄别、GG8000 延迟后送入 CAEN V755 TDC 模块中记录时间信息。CF8000 的触发比为 0.4，内部延迟时间将根据信号的上升时间进行调整，调整依据为信号上升时间的 0.6 倍；TDC 量程设置为 150 ns，对应道宽为 36.6 ps。样机两端信号经过符合后，提供给 VME 数据获取系统作为系统的触发信号。

样机的性能测试是在常温下、大气环境中利用 ^{239}Pu α 源测试完成的。 ^{239}Pu 可衰变产生 5.157 MeV 的 α 射线，高的射线能量可产生较大的输出信号，有效提高测试效率。由于 α 粒子射程较短，为了使 α 粒子能量能够尽可能多地沉积到塑料闪烁体中，两种塑料闪烁体的外表面均未包装反射层。测试前，选取一张与塑料闪烁片同等大小、厚度 $\sim 0.5\text{ mm}$ 的矩形硬纸片，以中心为起点，在水平和竖直两个方向上每间隔 2 cm 标记一个点，共得到 25 个标记点，将这 25 个标记点用针扎成 $\sim \varnothing 3\text{ mm}$ 的小孔，然后将此硬纸片轻覆于塑料闪烁上。测试过程中将 α 源直接置于硬纸片的各个小孔上，利用小孔对 α 射线进行准直，通过对不同位置的时间信息进行测量，可研究粒子入射位置对时间分辨的影响。

3 研究内容及结果分析

3.1 SiPM 数量以及连接方式对时间分辨的影响研究

增加 SiPM 数量，会使其与塑料闪烁体的接触面积增大，利于闪烁光的收集，提高时间分辨。另外，在 SiPM 数量一定情况下，不同的连接方式会影响探测器的输出波形，如串行连接会使信号上升时间变快，利于

获得好的时间分辨，然而串行连接会使信号的幅度减小、信噪比变差从而影响时间分辨。因此，为了研究 SiPM 数量及连接方式对样机时间性能的影响，我们做了六组对比实验。前四组实验均为 SiPM 串行连接，数量分别为单端 3 支、单端 6 支、单端 9 支、以及单端 12 支。后两组实验单端 SiPM 的数量均为 12 支，其中一组先将相邻的 3 支 SiPM 进行串联，然后再将串联后的四路进行并联；另外一组将相邻的 6 支 SiPM 进行串联后再进行并联。六组实验中均选用了型号为 EJ212 的塑料闪烁体，闪烁体均双端读出。实验中， α 源将被置于塑料闪烁体中心，两端 SiPM 单独供电，其工作电压将根据 SiPM 数量及连接方式进行改变。

对于双端读出的塑料闪烁体探测器，左、两端接收到闪烁光子的时间 t_L 和 t_R 可由下式描述^[19]：

$$t_L = \text{tof} + \frac{\frac{L}{2} - x}{v}, \quad (2)$$

$$t_R = \text{tof} + \frac{\frac{L}{2} + x}{v}, \quad (3)$$

式中： tof 为粒子击中探测器的时间； L 为塑料闪烁体的长度； x 为坐标原点位于塑闪中心时粒子击中位置的坐标； v 为光子在闪烁体中的有效传播速度。将上面两式相加可得到 tof 值：

$$\text{tof} = \frac{(t_L + t_R)}{2} - \frac{\frac{L}{2}}{v}, \quad (4)$$

式中 tof 值与粒子击中位置无关，故在下面的分析中我们将使用 $\sigma_{(t_L+t_R)/2}$ 来表征样机时间分辨的好坏。

图2给出了各组实验条件下 $\sigma_{(t_L+t_R)/2}$ 随 SiPM 阵列工作电流的变化关系，当多支 SiPM 并联时，其工作电流为单路分支的工作电流。可以看出，随着 SiPM 工作电流的增加，样机的时间分辨逐渐变好；在串联模式下，样机的时间分辨随着 SiPM 数量的增加而逐渐变好，当单端 SiPM 数量达到 12 支时，样机的时间分辨可好于

150 ps; 在单端 SiPM 为 12 支且数量保持不变的情况下, 并联支路越多, 样机的时间分辨越差。

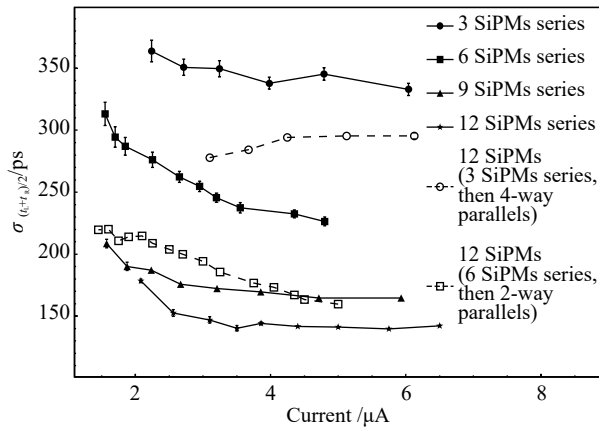


图 2 不同 SiPM 数量及连接方式下样机时间分辨随工作电流的变化关系

SiPM 输出信号的幅度正比于工作电压与击穿电压之差^[18], 而此电压之差正比于工作电流, 故 SiPM 阵列的工作电流越大, 表明其输出信号幅度越大, 大的信号有利于好的时间分辨的获得, 因此样机的时间分辨随着工作电流的增大而逐渐变好, 但当信号幅度达到一定程度后, 信号幅度对时间分辨的影响变弱。可以看出, 在单端为 9 支和 12 支 SiPM 串联时, 当工作电流达到 $\sim 3 \mu A$ 后, 样机的时间分辨已趋于饱和。

波形分析是理解时间分辨性能好坏的有效手段。实验中我们使用型号为 Tektronix MSO 5204B 示波器 (带宽 2 GHz、采样率 10 GS/s) 采集了信号波形, 并对波形进行了分析, 提取了信号的上升时间、半高宽及信号幅度等信息, 见图 3, 其中图 (a) 为采集到的不同 SiPM 连接方式下典型的信号波形, 图 (b)、(c)、(d) 分别为提取得到的不同 SiPM 数量及连接方式下信号波形的上升

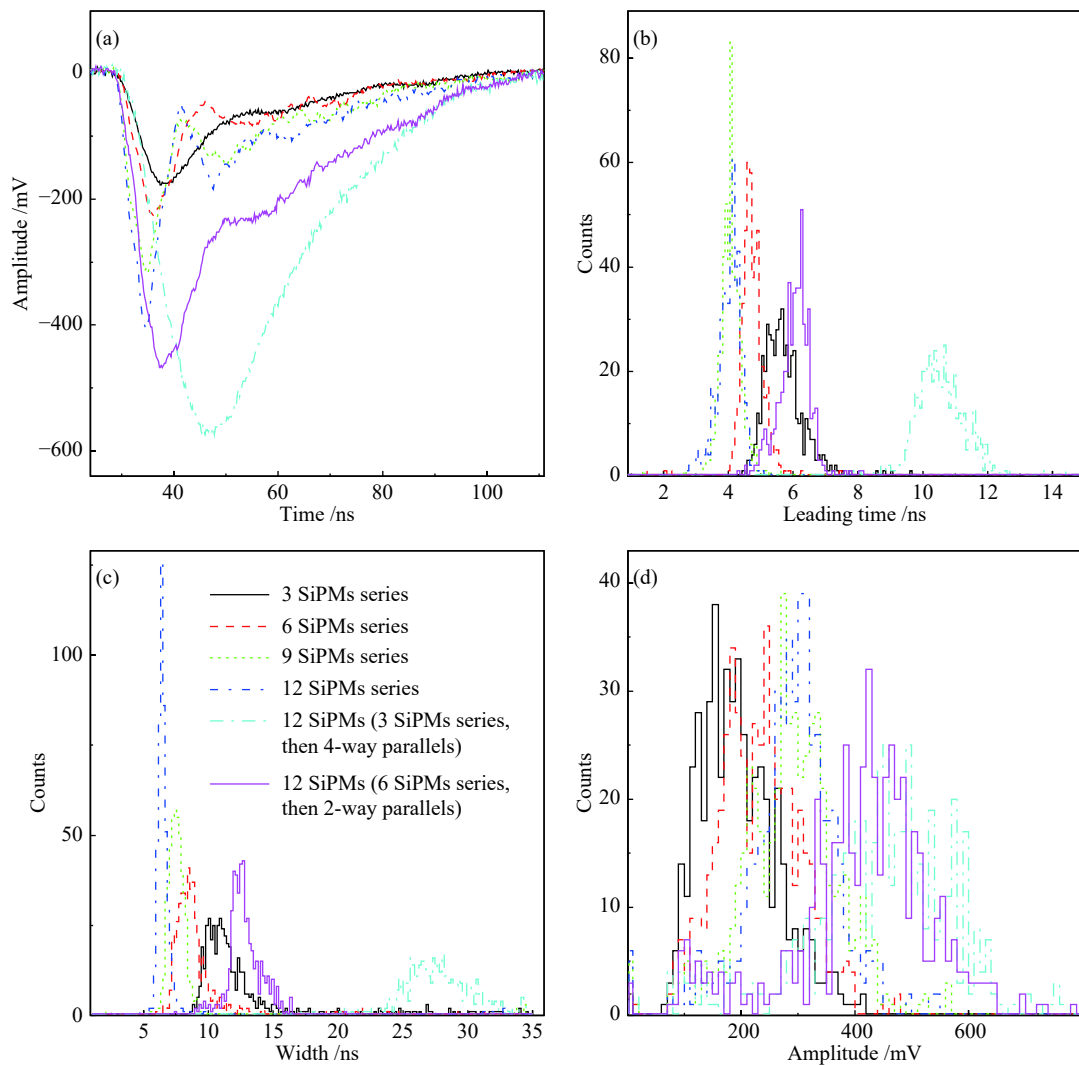


图 3 (在线彩图) 不同读出方式下输出信号的波形分析

(a) 为示波器采集的不同 SiPM 连接方式下典型的信号波形, (b)、(c)、(d) 分别为不同连接方式下信号波形的上升时间、半高宽、以及信号幅度分布。

时间、半高宽、以及信号的幅度分布。信号的上升时间定义为信号幅度由 10% 上升至 90% 所需的时间，半高宽定义为信号的一半幅度所对应的宽度。为了便于比较，在采集波形时，我们将六组测试实验的工作电流均设置为 $\sim 4.8 \mu\text{A}$ 。

由图 3 可以看出，在串联模式下，随着串联 SiPM 数量的增加，信号的上升时间由 $\sim 5.8 \text{ ns}$ 降为 $\sim 4.0 \text{ ns}$ ，宽度由 $\sim 12 \text{ ns}$ 降为 $\sim 7 \text{ ns}$ ，幅度由 $\sim 160 \text{ mV}$ 升为 $\sim 300 \text{ mV}$ 。串联 SiPM 的数量越多，等效 SiPM 的总电容越小，使得探测器的 RC 常数越小，导致输出信号的上升时间和宽度分别越小和越窄。然而 SiPM 数量的增加，使得其接收到的闪烁光产额增加，从而引起输出信号幅度的不降反增。快的上升时间和大的信号幅度，均利于探测器时间分辨的提高，所以采用 12 支 SiPM 串联时，样机获得了最好的时间分辨。另外，比较发现，在将 SiPM 的串联数量由 9 支增加至 12 支时，信号的上升时间、宽度以及信号幅度等均只是获得了有限的改善，导致图 2 中由 9 支串联增加至 12 支串联时，样机时间分辨也只是获得了有限的提高，这说明在使用 12 支 SiPM 串联读出时，SiPM 数量对样机时间性能的影响已趋于饱和。

在 SiPM 数量保持 12 支不变的情况下，在并联支路由 2 路变为 4 路后，信号的上升时间由 $\sim 6 \text{ ns}$ 升至 $\sim 10.5 \text{ ns}$ ，宽度由 $\sim 12 \text{ ns}$ 升至 $\sim 27 \text{ ns}$ ，信号幅度略有上升 $\sim 420 \text{ mV}$ 。并行连接支路越多，使得等效 SiPM 的总电容越大，输出信号的上升时间越慢，造成样机的时间分辨越差。

总之，通过改变 SiPM 数量及不同的连接方式对样机时间性能进行了测试，发现采用 12 支 SiPM 串行连接时，样机获得了好于 150 ps 的时间分辨，而且继续增加 SiPM 数量，对提高时间分辨的影响有限。

3.2 塑料闪烁体型号及尺寸对时间分辨的影响研究

在 3.1 节中，测试发现在采用 12 支 SiPM 串行连接时，样机可以获得较好的时间分辨，而继续增加 SiPM 数量，对提高时间分辨的影响有限。因此，在本节中，我们固定上述读出方式不变，测量表 1 中 EJ212 和 EJ232 两种型号和厚度的塑料闪烁体的时间分辨，研究塑料闪烁体型号及厚度等对时间分辨的影响，以期获得更好的结果。测试中，将 α 源置于硬纸片的 25 个孔洞上，对不同位置进行时间测量。

图 4(a) 和 (b) 分别给出了两种塑料闪烁体不同位置处的时间分辨 $\sigma_{(t_L+t_R)/2}$ 。可以看出 EJ212 闪烁体各个位置的时间分辨分布在 $120 \sim 150 \text{ ps}$ 之间，而 EJ232 各个位置的时间分辨分布在 $80 \sim 100 \text{ ps}$ 之间，其时间分辨要

明显好于 EJ212 塑料闪烁体。表 1 中给出两种塑料闪烁体相关的性能参数，其中 EJ232 塑料闪烁体的上升时间为 0.35 ns ，好于 EJ212 闪烁体 0.9 ns 的上升时间，快的上升时间有利于时间分辨的改善。另外，两种塑料闪烁体的有效面积相同，但 EJ232 厚度是 EJ212 厚度的两倍，厚度的增加，使得闪烁光可通过较少的反射传输到两端 SiPM 阵列上，减小闪烁光传输损失，利于光产额的提高。当入射粒子击中塑料闪烁体后，产生的闪烁光向两端传输，传输到两端的电荷量 q_L 和 q_R 可由下式描述 [4]：

$$q_L = q_0 e^{\left(-\frac{L/2+x}{\lambda}\right)}, \quad (5)$$

$$q_R = q_0 e^{\left(-\frac{L/2-x}{\lambda}\right)}, \quad (6)$$

式中： q_0 为粒子击中后产生的总电荷量； L 为塑料闪烁体长度； x 坐标原点位于塑闪中心时粒子击中位置的水平坐标； λ 为衰减长度。根据上面两式可得：

$$X = -0.5 \cdot \lambda \cdot \ln \left(\frac{q_L}{q_R} \right). \quad (7)$$

图 4(c) 和 (d) 分别给出了两种塑料闪烁体的水平位置 X 与 $-0.5 \times \ln(q_L/q_R)$ 之间的关系，利用线性拟合可得到两者的衰减长度 λ ，其中 EJ212 衰减长度为 $(4.95 \pm 0.20) \text{ cm}$ ，EJ232 的衰减长度为 $(8.73 \pm 0.49) \text{ cm}$ 。EJ232 具有相对较长的衰减长度，使得闪烁光传输至 SiPM 的几率增加，利于光产额的收集，提高信号幅度，获取好的时间分辨。

探测器各个位置时间分辨分布均匀性的好坏，直接影响着探测器整体的时间分辨。我们以各个位置时间分辨的极大值与极小值之差和两者的平均值之比来表征样机时间分辨分布均匀性的好坏。EJ212 和 EJ232 两种塑料闪烁体的时间分辨分布的均匀度分别为 24.3% 和 22.1%，在去除周边的测试点后，中心区域 ($6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$) 的均匀度可达到 10.4% 和 13%。周边各点时间分辨差异较大的原因主要是由于入射位置在周边时，对与位置点相近的一些 SiPM，其闪烁光接收立体角变大，而对其它一些 SiPM，其闪烁光收集角度可能变小，这使得各个 SiPM 收集闪烁光的差异变大，从而引起了周边各点具有较大的时间分辨差异，这个差异造成了样机整体时间分辨均匀性变差。因此，在实际应用过程中，我们可以采用比束斑尺寸更大的塑料闪烁体，使束流击中位置位于塑料闪烁体中心，这样可以有效保证束流击中位置的时间分辨具有好的均匀性，利于探测器整体时间分辨的提高。

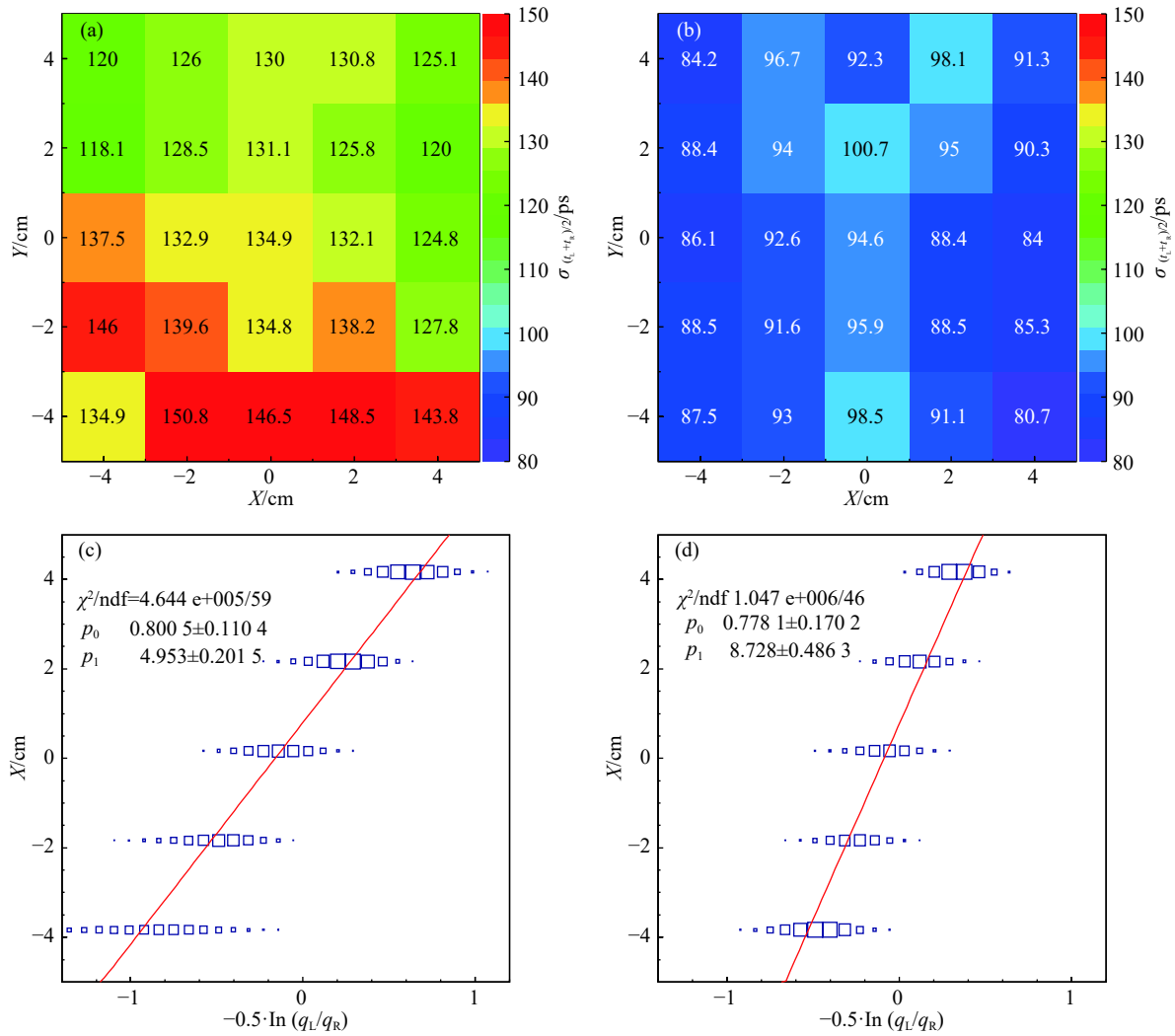


图 4 (在线彩图) 塑料闪烁体型号及尺寸对探测器时间分辨的影响研究

(a) 和 (b) 分别为 EJ212 和 EJ232 种塑料闪烁体各个位置的时间分辨; (c) 和 (d) 为两种塑料闪烁体的衰减长度, 其中红色实线为线性拟合结果。

3.3 粒子击中位置对整体时间分辨的影响研究

粒子击中位置会影响 SiPM 接收闪烁光的效率, 使得探测器时间分辨与位置相关, 造成探测器整体时间分辨变差。本节利用上述 12 支 SiPM 串联读出 EJ232 塑料闪烁体时的实验数据, 研究粒子击中位置对样机整体时间分辨的影响。

在上述测量中, 获取系统的触发信号是由两端符合提供的。在符合时, CO4020 的输出信号是以塑料闪烁体的一端信号作为基准的, 这样使得测量的各个位置的 $\sigma_{(t_L+t_R)/2}$ 值与测量位置相关, 见图 5(a), 其给出了 $\sigma_{(t_L+t_R)/2}$ 与水平位置 X 的关系。利用线性函数拟合可修正水平位置 X 对 $\sigma_{(t_L+t_R)/2}$ 的影响, 图 5(c) 中黑色实线为修正后的探测器整体时间谱, 红色实线为高斯拟合结果, 可以看到样机整体时间分辨为 (130.9 ± 0.3) ps。

这一结果可满足 RIBLL2 束线实现 $N=40$ “翻转岛”区核素粒子鉴别的要求。

图 5(b) 给出了水平位置修正后的 $\sigma_{(t_L+t_R)/2}$ 与垂直位置 Y 的关系, 可以看出经过水平位置修正后 $\sigma_{(t_L+t_R)/2}$ 仍与垂直位置相关。同样可利用线性函数对垂直位置的影响进行修正, 见图 5(c) 中的绿色实线谱, 高斯拟合后可得到 (93.1 ± 0.2) ps 的整体时间分辨。在去除电子学及获取系统约 40.0 ps 的时间分辨后, 样机本征时间分辨可好于 85 ps。

综上, 对于面积为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 、厚度为 0.1 cm 的 EJ232 塑料闪烁体, 在采用单端 12 支 SiPM 串行连接的双端读出方式下, 样机整体时间分辨可达到 131 ps, 这一结果可满足 RIBLL2 起始时间探测器的升级改造要求。另外, 数据分析显示, 在经过垂直位置修正后, 样机可以得到好于 85 ps 的本征时间分辨。因此, 在实际应用

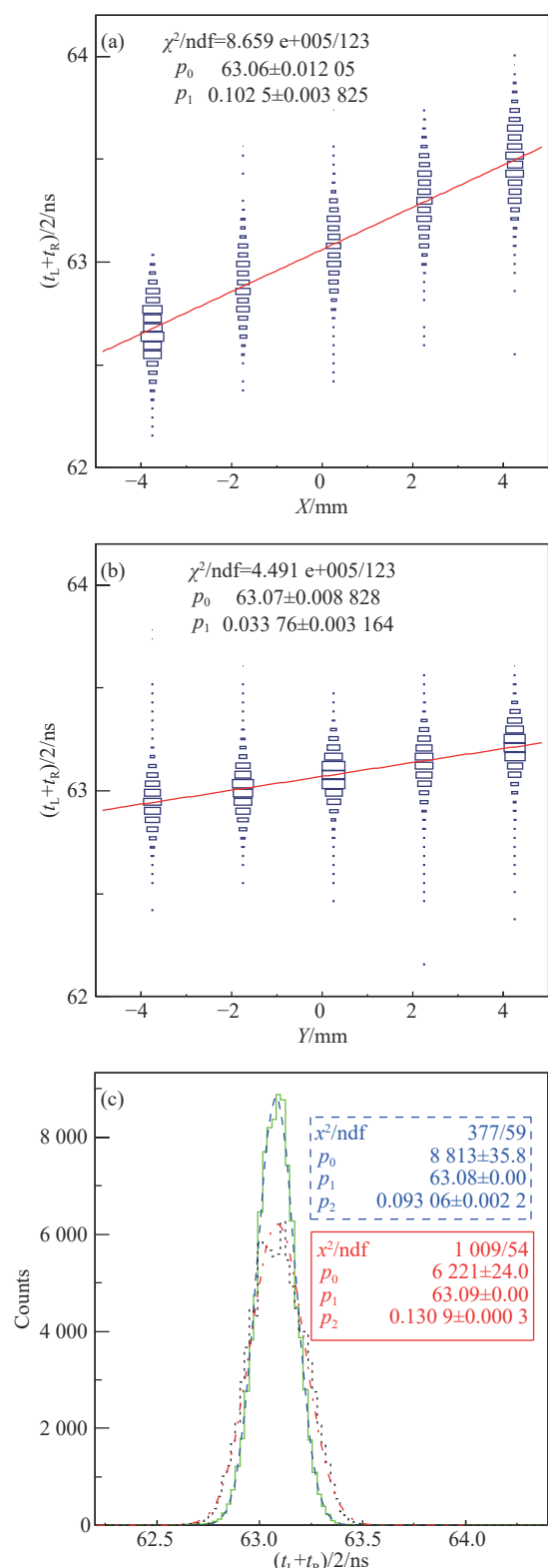


图5 (在线彩图)位置修正对探测器整体时间分辨的影响研究

(a) 为 EJ232 塑料闪烁体两端时间的平均值与水平位置的关系, 图中红色实线为线性拟合结果; (b) 为水平位置修正后的两端时间平均值与垂直位置的关系, 红线为线性拟合结果; (c) 为经过修正后样机的整体时间分辨。

过程中, 建议采用四端读出的方式, 根据电荷量消除水平、垂直位置的影响, 可更有效地提高探测器整体时间分辨。

4 结论

受安装空间影响, 当前 RIBLL2 起始时间塑料闪烁体探测器采用了单端读出的方式, 束流击中位置会影响探测器的时间分辨, 使得目前 RIBLL2 只能在 $A < 40$ 低质量区开展实验研究, 降低了束线性能。SiPM 具有紧凑的结构, 可有效节省探测器的占用空间, 有望在有限的空间内实现探测器的双端读出, 消除入射位置信息对时间分辨的影响, 因此, SiPM 特别适合于 RIBLL2 起始时间探测器的升级改造。

本文通过测试, 研究了基于 SiPM 双端读出的大面积塑料闪烁体探测器的时间性能。首先, 通过改变 SiPM 数量及连接方式对样机的时间分辨进行了测试, 结果显示, 在采用 12 支 SiPM 串行连接时, 样机可以获得较好的时间分辨, 而继续增加 SiPM 数量, 对提高时间分辨的影响有限; 其次, 在固定 12 支 SiPM 串行连接的读出方式不变的情况下, 对不同型号和厚度的面积均为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 塑料闪烁体探测器的时间性能进行了研究, 发现具有快上升时间和较大厚度的塑料闪烁体具有更好的时间分辨; 再次, 受粒子击中位置对 SiPM 接收闪烁光效率的影响, 样机周边各点的时间分辨具有较大差异, 造成了样机整体时间分辨均匀度变差, 建议在应用过程中采用比束斑尺寸更大的塑料闪烁体, 使束流击中位置位于塑料闪烁体中心, 这样可以保证探测器各个位置的时间分辨具有好的均匀性; 最后, 对于面积为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 、厚度为 0.1 cm 的 EJ232 塑料闪烁体, 在采用单端 12 支 SiPM 串行连接的双端读出方式下, 样机整体时间分辨可达到 131 ps , 在经过垂直位置修正后, 样机可以得到好于 85 ps 的本征时间分辨, 因此, 建议在实际应用过程中采用四端读出。

塑料闪烁体 TOF 探测器的时间分辨与粒子穿过探测器的能损密切相关, 能损越大, 闪烁体产生的闪烁光越多, 探测器越容易获得好的时间分辨。根据 Bethe-Block 公式, 在 RIBLL2 能区 ($200 \sim 400 \text{ MeV/u}$), 粒子能损与粒子电荷数的平方成正比、与粒子速度的平方成反比, 即入射粒子电荷数越低、能量越高, 其能损越小。以较高能量和较低电荷数的 400 MeV/u 的 ^{12}C 为例, LISE++ 计算结果显示粒子穿过 1 mm 厚的塑料闪烁体时产生的能损 $\sim 11.16 \text{ MeV}$, 其远大于样机测试时的 α 粒子能量, 因此, 在 RIBLL2 实验中, 只要产生粒子的

电荷数大于或等于 6, 那么其均可在 TOF 探测器中沉积足够大的能量, 使其获得比 α 源测试结果更好的时间分辨, 满足 RIBLL2 束线对 $N=40$ “翻转岛”区较重核素的粒子鉴别要求。这一研究将为 RIBLL2 起始时间探测的升级改造提供重要的技术支持。

参考文献:

- [1] TANIHATA I, HAMAGAKI H, HASHIMOTO O, et al. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 2676.
- [2] MOTOBAYASHI T, IKEDAA Y, ANDO Y, et al. *Phys Lett B*, 1995, 346: 9.
- [3] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2002, 488: 11.
- [4] FUKUDA N, KUBO T, OHNISHI T, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2013, 317: 323.
- [5] ZHAO Jianwei, SUN Baohua. *Nuclear Physics Review*, 2018, 35(4): 362. (in Chinese)
(赵建伟, 孙保华. *原子核物理评论*, 2018, 35(4): 362.)
- [6] SUN Baohua, ZHAO Jianwei, ZHANG Xueheng, et al. *Science Bulletin*, 2018, 63: 78.
- [7] SUN Z Y, YAN D, WANG S T, et al. *Phys Rev C*, 2014, 90: 037601.
- [8] SUN Y Z, WANG S T, SUN Z Y, et al. *Phys Rev C*, 2019, 99: 024605.
- [9] ZHAO Y X, SUN Y Z, WANG S T, et al. *Phys Rev C*, 2019, 100: 044609.
- [10] ADRICH P, AMTHOR A. M, BAZIN D, et al. *Phys Rev C*, 2008, 77: 054306.
- [11] YUREVICH V I, AGAKICHIEV G N, SERGEEV S V, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2018, 912: 294.
- [12] CATTANEO P W, DE GERONE M, GATTI F, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 828: 191.
- [13] STEINBERGER W M, RUCHM L, DI-FULVIO A, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2019, 922: 185.
- [14] REINHARDT T P, GOHL S, REINICKE S, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 816: 16.
- [15] CHENG Zehui, YU Yuhong, SUN Zhiyu, et al. *Nuclear Physics Review*, 2019, 36(3): 343. (in Chinese)
(程泽辉, 余玉洪, 孙志宇, 等. *原子核物理评论*, 2019, 36(3): 343.)
- [16] SCHEUERMANN R, STOYKOV A, RENKER D, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2007, 581: 443.
- [17] Organic Scintillators for Tomorrow's Technology[EB/OL]. [2019-09-01]. <http://eljentechnology.com>.
- [18] 滨松中国[EB/OL]. [2019-09-01]. <http://hamamatsu.com.cn>.
- [19] KOUZNETSOV V, LAPIK A, CHURIKOVA S, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2002, 487: 396.

Time Performance Study of Plastic Scintillator Detector with SiPM Readouts

ZHOU Bingqian^{1,2}, ZHANG Xueheng^{1,2,†}, FANG Fang^{1,2}, YAN Duo^{1,2}, TANG Shuweng^{1,2}, YU Yuhong^{1,2},
WANG Shitao^{1,2}, ZHANG Yongjie^{1,2}, LIU Xiangman^{1,2,3}, ZHAO Yixuan^{1,2},
JIN Shuya^{1,2}, LIU Zhong^{1,2}, SUN Zhiyu^{1,2}

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

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China;

3. College of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In this paper the time performance of a plastic scintillator detector with an area of 10 cm×10 cm and read out by multiple silicon photomultipliers (SiPMs) at both ends was studied. The results tested with a ²³⁹Pu source are shown as: (1) the time resolutions became better gradually with the increase of the quantities of SiPMs connected in series; (2) when the number of 12 SiPMs was fixed, the time resolutions got worse as the number of parallel branches were increased; (3) the detector time resolutions can be effectively improved by using a fast-time plastic scintillator and adding its thickness; (4) to improve the positional uniformity of the time resolution, the scintillator with larger dimensions than beam spots should be used; (5) a resolution less than 131 ps was achieved with a 0.1 cm thickness EJ232 scintillator detector read out on each side by 12 SiPMs connected in series. This study has importance significance for the upgrading of the start detector at RIBLL2.

Key words: time-of-flight detector; plastic scintillator; silicon photomultiplier; time resolution

Received date: 13 Jan. 2020; Revised date: 09 Apr. 2020

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(U1732137, U1832122); Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2018449); Open Research project of the Chinese Academy of Sciences; National Key R&D Program of China(2018YFA0404402)

† Corresponding author: ZHANG Xueheng, E-mail: zhxh@impcas.ac.cn.