自研塑料闪烁体与 EJ-276D 的对比测试研究

秦翊童[1]　梁勇飞[2]　王靖恺[2]　刘晓波[1]

1（中国工程物理研究院核物理与化学研究所　绵阳　621900）

2（四川大学 物理学院　成都　610065）

摘要　塑料闪烁体作为一种重要的中子探测晶体，已被广泛地应用于无损检测、反应堆监测、核物理等领域。采用光电倍增管（Photomultiplier Tube，PMT）和高速数字化仪搭建测试平台，对两种配方的尺寸分别为∅2.54 cm×2.54 cm、∅5.08 cm×5.08 cm的正圆柱体自研塑闪（Self-developed Plastic Scintillator，SD-PS）和对应尺寸EJ-276D的辐射响应性能进行了对比测试。首先使用^{137}Cs源对各塑闪进行能量刻度，得到相对发光产额，验证测试方法引入的重复性偏差小于5%。然后用^{252}Cf快响应电离室对4个塑闪的n-γ甄别能力进行测试，并分别用4个塑闪测量^{252}Cf的中子γ飞行时间谱，得到品质因子（Figure of Merit，FoM）、相对探测效率、定时精度以及γ误甄别率。结果表明，∅2.54 cm×2.54 cm自研塑闪与对应尺寸的EJ-276D相比光产额相当，FoM在60~640 keVee内最大低10%，探测效率低19%；∅5.08 cm×5.08 cm自研塑闪与对应尺寸EJ-276D相比光产额低15%，FoM在60~640 keVee内最大低26%，探测效率低25%；∅2.54 cm×2.54 cm和∅5.08 cm×5.08 cm自研塑闪的定时精度分别为0.87 ns和1.25 ns，优于EJ-276D的1.00 ns和1.38 ns；所有塑闪在120 keVee能量阈值下的γ误甄别率均不超过1%。测试结果表明，∅2.54 cm×2.54 cm自研塑闪的辐射测量性能接近EJ-276D产品。

关键词　塑料闪烁体，相对发光份额，中子-γ甄别，探测效率，飞行时间，定时精度

中图分类号　TL812^{+}.1

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250300

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250300

Comparative study between self-developed plastic scintillators and EJ-276D

QIN Yitong[1]　LIANG Yongfei[2]　WANG Jingkai[2]　LIU Xiaobo[1]

1(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry*, *China Academy of Engineering Physics*, *Mianyang 621900*, *China*)

2(*School of Physics*, *Sichuan University*, *Chengdu 610065*, *China*)

Abstract　**[Background]** As one of the important neutron-sensitive scintillators, plastic scintillator has been widely used in applications such as non-destructive testing, reactor monitoring, and nuclear physics. **[Purpose]** This study aims to conduct comparative performance tests between self-developed plastic scintillators (SD-PS) and off-the-shelf EJ-276D plastic scintillators. **[Methods]** Firstly, a testing platform was established using a photomultiplier tube (PMT) and a high-speed digitizer to comparatively evaluate the radiation response performance of ∅2.54 cm×2.54 cm and ∅5.08 cm×5.08 cm self-developed right cylindrical plastic scintillators with two different formulations, alongside EJ-276D scintillators of same corresponding sizes. Then, energy calibration was performed for each scintillator using a ^{137}Cs source to determine the relative light output to confirm less than 5% reproducibility of the test method. Finally, a ^{252}Cf fission ionization chamber was employed to assess the neutron-γ discrimination capability of the four plastic scintillators, and each scintillator was also utilized to measure the neutron-γ time-of-

国家自然科学基金(No.U1967205)资助

第一作者：秦翊童，男，2003年出生，2025年毕业于四川大学，现为硕士研究生，研究领域为辐射探测技术

通信作者：刘晓波，E-mail：13881190590@163.com

收稿日期：2025-07-27，修回日期：2025-12-22

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U1967205)

First author: QIN Yitong, male, born in 2003, graduated from Sichuan University in 2025, master student, focusing on nuclear radiation detection

Corresponding author: LIU Xiaobo, E-mail: 13881190590@163.com

Received date: 2025-07-27, revised date: 2025-12-22

flight spectrum of the ^{252}Cf source, from which the Figure of Merit (FoM), relative detection efficiency, timing accuracy, and γ misidentification rate were derived. **[Results]** The comparison results indicate that the light yield of the ∅2.54 cm×2.54 cm SD-PS is comparable to that of the corresponding EJ-276D, with the FoM lower less than 10% at most in the 60~640 keVee energy range and detection efficiency lower by 19%. The ∅5.08 cm×5.08 cm SD-PS shows a 15% lower light yield compared to the corresponding EJ-276D, with the FoM lower by up to 26% and detection efficiency lower by 25% over the same energy range. The timing accuracies of the ∅2.54 cm×2.54 cm and ∅5.08 cm×5.08 cm SD-PS are 0.87 ns and 1.25 ns, respectively, which are superior to those of EJ-276D (1.00 ns and 1.38 ns). For all scintillators, the γ misidentification rate remains below 1% at an energy threshold of 120 keVee. **[Conclusions]** Across all five evaluated metrics, the ∅2.54 cm×2.54 cm SD-PS demonstrates overall performance on par with or superior to EJ-276D, confirming the viability of the domestic formulation as a commercial-grade alternative for neutron detection. The ∅5.08 cm×5.08 cm SD-PS exhibits a consistent performance deficit across light yield, neutron-γ discrimination, and detection efficiency, indicating that further optimization of the large-volume fabrication process is needed.

Key words Plastic scintillator, Relative light yield, Neutron-γ discrimination, Detection efficiency, Time of flight, Timing accuracy

在核能发电、国家安全、高能物理等军用或民用领域，准确地探测、识别、量化各类辐射都至关重要[1–2]。以^{3}He作为探测气体的气体探测器和液体闪烁体探测器一直以来都被用于中子探测。但是^{3}He稀缺且价格昂贵[3]，液体闪烁体含有易燃有毒物质而导致应用场景受限[4]，这促使人们积极寻找新的用于中子探测的固态材料。塑料闪烁体成本低廉、无毒、耐辐照、易于加工且机械性能好，成为了中子探测领域的研究热点。在应用方面，塑料闪烁体可用于中子成像、核材料识别及反应堆监测等领域[5–7]，由塑料闪烁体组成的阵列探测器还可用于高能物理实验及核医学成像[8]。在制备方面，Zaitseva等[9]早在2012年就制备出了与有机液体闪烁体相当的高n-γ甄别能力的塑料闪烁体。他们的研究表明，塑闪进行n-γ甄别的物理过程与液闪和有机晶体中的物理过程类似。而国内对于塑闪的制备和研究则起步较晚。四川大学塑闪研究团队已经探索出制备具有n-γ甄别能力的塑料闪烁体的工艺，并且对自研塑闪和EJ-299-33A进行了能量刻度和n-γ甄别能力对比测试[10]，测试表明自研的∅5.08 cm×5.08 cm塑料闪烁体与同尺寸的商用塑料闪烁体EJ-299-33A性能相当。

近年来美国Eljen Technology公司对EJ-299-33A进行了持续改进，推出过渡产品EJ276和目前商用的机械强度更高、光学性能更稳定、n-γ甄别能力更优秀的新型塑料闪烁体EJ-276D[11]。

四川大学塑闪研究团队使用新移波剂配方（激光染料）制备出了新一批性能优秀的∅2.54 cm×2.54 cm自研塑闪。为了对其辐射测量性能进行综合评估，本文采用光电倍增管（Photomultiplier Tube，PMT）和高速数字化仪搭建测试平台，对新老两种配方的∅2.54 cm×2.54 cm、∅5.08 cm×5.08 cm正圆柱体自研塑闪和对应尺寸EJ-276D的辐射响应性能进行了对比测试。相比文献[10]，本文增加测试方法重复性偏差的验证，将测试等效电子能量下限降低到60 keVee（keVee为等效电子能量单位，表示射线在闪烁体中沉积能量产生的光输出，与某能量的电子所产生的光输出相等时，对应的电子能量），并且增加了探测效率、定时精度和γ误甄别率等指标的比较，使得测试结果更能反映自研塑闪的综合性能。

1 实验材料及方案

1.1 塑料闪烁体

实验用到的塑料闪烁体为自研∅2.54 cm×2.54 cm和∅5.08 cm×5.08 cm正圆柱形塑料闪烁体（分别为2024年新配方制备和2021年老配方制备）以及Eljen Technology公司对应尺寸的EJ-276D。自研塑料闪烁体主要由单体基底聚苯乙烯（Polystyrene，PS），第一发光物质2，5-二苯基恶唑（2，5-Diphenyloxazole，PPO）和移波剂通过热聚合的方式制备。其中，∅2.54 cm×2.54 cm自研塑闪添加的移波剂为浓度0.2%的激光染料，∅5.08 cm×5.08 cm自研塑闪添加的移波剂为浓度0.2%的7-二乙氨基-4-甲基香豆素（7-Diethylamino-4-methylcoumarin，MDAC）。为提高探测效率及防止闪烁体雾化，各塑闪都用聚四氟乙烯生料带包裹[12]，只露出底面，如图1所示。本文中自研塑闪（Self-developed Plastic Scintillator）用“SD-PS”替代；两种不同的尺寸（∅2.54 cm×2.54 cm、∅5.08 cm×

5.08 cm）分别用2.54 cm和5.08 cm替代。

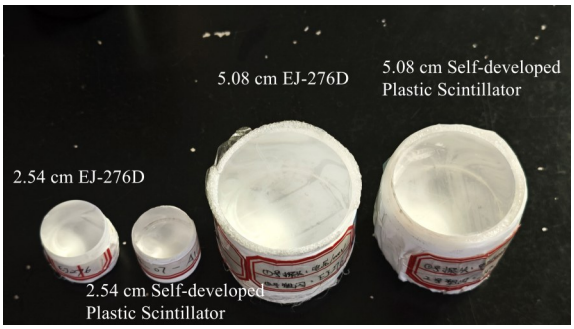


图1 两种尺寸的自研塑闪及EJ-276D实物图
Fig.1 Snapshot of the self-developed plastic scintillators and the EJ-276D of two different sizes

1.2 实验仪器及实验方案

实验选用的光电倍增管为滨松R6231-100，上升时间8.5 ns，渡越时间48 ns。将每个塑料闪烁体通过在底面涂抹硅脂与此光电倍增管分别耦合并逐一进行测试。采集卡选用中科采象PXIe-1048，模数转换（Analog-to-Digital Converter，ADC）深度为14 bit，采样率500 MSPS。探测器输出的信号由采集卡采集和在线脉冲分析，获得脉冲触发时间、前沿恒比定时时间、峰位、峰值、长短门波形积分值等波形特征数据，后续使用MATLAB对数据进行处理。能量刻度选用^{137}Cs源，中子源为^{252}Cf快响应电离室[13]（在实验日裂变率为$28.5\times10^3\cdot s^{-1}$）。图2为实验平台示意图，放射源正对塑闪中心。

1.3 能量刻度及测试方法重复性验证

首先将2.54 cm EJ-276D与光电倍增管耦合，塑闪中心与^{137}Cs源保持水平且相距8.4 cm。经调试得到使探测器输出信号幅度合适的高压为−965 V。此后的测试保持高压不变。依次更换4个塑闪，测量得到每个塑闪的脉冲长积分（对整个信号的积分）-计数谱（图3），并对谱图中康普顿坪[14–15]进行拟合，

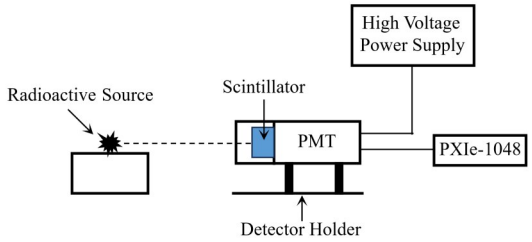


图2 实验平台示意图
Fig.2 Schematic diagram of the experimental setup

以坪区右侧峰值计数的75%所在位置作为康普顿坪边缘，对应的能量为478 keV[16]。

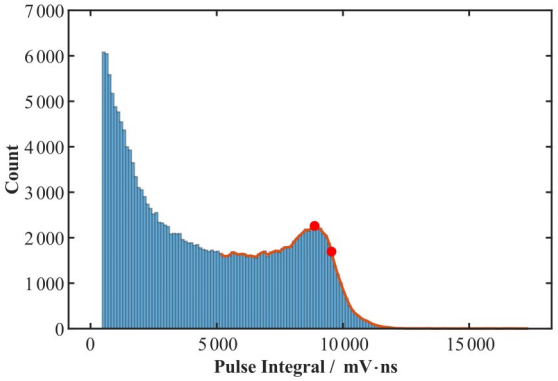


图3 2.54 cm EJ-276D的脉冲长积分-计数谱
Fig.3 Pulse integral-count spectrum for the 2.54 cm EJ-276D

测试方法重复性主要有两个因素：单次测量的重复性；手动涂抹硅脂将塑闪与光电倍增管耦合及拆装塑闪的重复性。依次装上4个塑闪，每个塑闪分别重复测量3次，再重复拆装并测量3次，观察测得的康普顿坪边缘积分值是否发生较大变化。测试结果如表1所示。可见，两个测试中各塑闪的相对标准偏差均不超过2%，最大偏差均不超过5%，证明这套测试方法具有较好的稳定性。取表1拆装测试中4个塑闪的平均康普顿坪边缘积分值用作能量刻度值。

表1 探测器重复性及拆装稳定性测试结果
Table 1 Results of the detector repeatability and reassembly stability test

闪烁体 Scintillator	平均康普顿坪边缘积分值 Mean integral value at the Compton edge / mV·ns		标准差 Standard deviation / mV·ns		相对标准偏差 Relative standard deviation		最大偏差 Maximum deviation	
	重复测试 Repeated test	拆装测试 Reassembly test	重复测试 Repeated test	拆装测试 Reassembly test	重复测试 Repeated test / %	拆装测试 Reassembly test / %	重复测试 Repeated test / %	拆装测试 Reassembly test / %
2.54 cm EJ-276D	9 410	9 527	24	90	0.3	0.9	0.6	2.2
2.54 cm自研塑闪 2.54 cm SD-PS	9 430	9 573	169	111	1.8	1.2	4.2	2.8
5.08 cm EJ-276D	8 447	8 449	70	65	0.8	0.8	2.0	1.9
5.08 cm自研塑闪 5.08 cm SD-PS	7 353	7 194	67	124	0.9	1.7	2.0	4.1

2 测试项目

2.1 相对光产额

闪烁体的光产额与^{137}Cs的脉冲长积分-计数谱中康普顿坪边缘对应积分值大小成正比。光产额越大，表明闪烁体的发光强度越大。可以通过确定一个标准塑闪，再将其他待测塑闪的康普顿坪边缘积分值与标准塑闪相比的方式来得到相对光产额。

2.2 n-γ甄别能力

n-γ甄别能力测试使用封装于电离室底部的^{252}Cf源进行。塑闪中心与^{252}Cf源保持水平且相距15 cm。后续使用电荷积分法进行n-γ甄别。电荷积分法在计算量小的同时具有较好的甄别效果，且受信号尾部震荡的影响较小[17]。以信号峰值为起始点，分别设置一个时间窗较短的短门和一个时间窗较长的长门，计算信号尾部积分$Q_{\mathrm{long}}-Q_{\mathrm{short}}$与长门积分$Q_{\mathrm{long}}$的比值可以得到脉冲形状甄别（Pulse Shape Discrimination，PSD）参数：

$$\mathrm{PSD}=\frac{Q_{\mathrm{long}}-Q_{\mathrm{short}}}{Q_{\mathrm{long}}} \tag{1}$$

由于快中子在探测器中产生的脉冲衰减时间明显长于γ射线，故其计算出的PSD值也会大于γ射线，以此实现n-γ甄别[18]。长门、短门的选取会影响闪烁体的n-γ甄别效果，其甄别效果可以用品质因子（Figure of Merit，FoM）表示。它的值为PSD甄别谱（图5）中两峰距离与两峰半高宽之和的比值[10]。FoM值越大，表明甄别效果越好。

2.3 中子γ飞行时间

^{252}Cf快响应电离室是一种具有定时功能的电离室。它能准确给出^{252}Cf裂变定时信号，即中子或γ射线放出时的信号。中子或γ射线飞行一段时间后被塑闪探头探测，取得中子或γ到达时刻的信号。γ射线以光速飞行，中子飞行速度则取决于它的能量。通过记录每个粒子的飞行时间可得到飞行时间谱，用于评价探测器的定时精度或检验其n-γ甄别效果。定时方式为数字恒比定时，触发阈值选为信号前沿幅度的50%。实验用长8.5 m的信号线缆将电离室的信号引出，塑闪探测器的信号线长3.1 m，塑闪中心与封装于电离室底部的^{252}Cf源保持水平且相距15 cm。

3 结果与讨论

3.1 相对光产额测试结果

利用表1拆装测试中4个塑闪的平均康普顿坪边缘积分值可以得到其他塑闪相对于2.54 cm EJ-276D的相对光产额，如表2所示。可见，2.54 cm自研塑闪的光产额与对应尺寸EJ-276D相当，5.08 cm自研塑闪的光产额是对应尺寸EJ-276D的85%。5.08 cm塑闪由于体积更大，对闪烁光子的自吸收较2.54 cm塑闪更强，因此光产额均低于2.54 cm塑闪。除开尺寸的影响，5.08 cm自研塑闪的发光性能也不如2.54 cm自研塑闪，这是因为：1）制备5.08 cm自研塑闪时的工艺还不够成熟，闪烁体内部存在细小的裂纹和气泡；2）新移波剂配方（激光染料）对于塑闪发光性能的提升大于旧移波剂MDAC（7-二乙氨基-4-甲基香豆素）。

表2 各塑料闪烁体的相对光产额
Table 2 Relative light yields of the plastic scintillators

闪烁体 Scintillator	相对光产额 Relative light yield
2.54 cm EJ-276D	1
2.54 cm自研塑闪 2.54 cm SD-PS	1
5.08 cm EJ-276D	0.89
5.08 cm自研塑闪 5.08 cm SD-PS	0.76

3.2 n-γ甄别能力及相对探测效率测试结果

3.2.1 电荷积分法长短门的选取

通过反复调整每个塑闪对应的长短门，优先关注低能区甄别效果优劣，最终找到了使每个塑闪甄别效果最优的长短门参数（表3）。之后的测试保持该参数不变。

表3 各塑料闪烁体的最优长短门
Table 3 Optimal long and short gate for each plastic scintillator

闪烁体 Scintillator	短门 Short gate / ns	长门 Long gate / ns
2.54 cm EJ-276D	40	360
2.54 cm自研塑闪 2.54 cm SD-PS	40	360
5.08 cm EJ-276D	44	400
5.08 cm自研塑闪 5.08 cm SD-PS	44	320

3.2.2 n-γ甄别能力

甄别结果如图4所示，能量下阈设为60 keVee。将每个塑闪的甄别结果从低能到高能划分为8个紧密相连的能区（能区分别为60~81 keVee，81~128 keVee、128~175 keVee、175~291 keVee、291~407 keVee、407~524 keVee、524~640 keVee，最后一

个能区范围从640 keVee开始直到每个塑闪测得的最大能量，图中菱形的点就是每个能区的中心），对每个能区的数据进行双高斯拟合，得到中子、γ峰的分界点以及中子峰的上边界点（如图5，展示了128~175 keVee能区的拟合过程），同时计算每个能区的FoM因子。再分别拟合各分界点和边界点，得出图4中的两条拟合曲线，两曲线之间即为甄别出的中子。可以看出随着能量升高，塑闪的n-γ甄别效果越好，4个塑闪在600 keVee以上都能清晰地甄别中子和γ。所以在评价其性能时，需重点关注低能区的甄别效果。

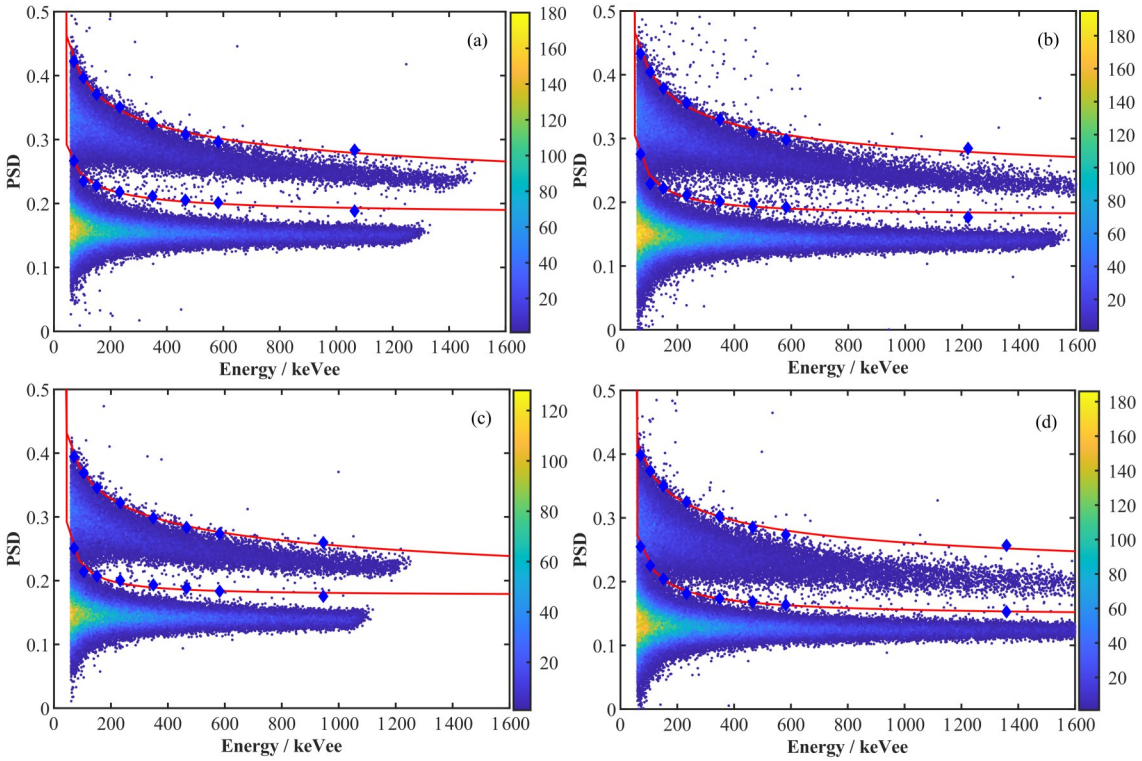


图4 PSD散点图（彩图见网络版） (a) 2.54 cm EJ-276D，(b) 5.08 cm EJ-276D，(c) 2.54 cm自研塑闪，(d) 5.08 cm自研塑闪
Fig.4 PSD scatter plots (color online) (a) 2.54 cm EJ-276D, (b) 5.08 cm EJ-276D, (c) 2.54 cm SD-PS, (d) 5.08 cm SD-PS

图6是4个塑闪的分能区FoM因子比较（能区划分与图4相同，为方便比较，将最后一个点统一到同一个能量）。在能量低于640 keVee的低能区，2.54 cm自研塑闪的n-γ甄别能力已经与对应尺寸EJ-276D相当接近，FoM值仅比EJ-276D平均低0.14，且能量越低差距越小。5.08 cm自研塑闪生产批次较早，工艺和配方不够成熟，导致n-γ甄别能力显著低于对应尺寸的EJ-276D，其FoM值在低于640 keVee的各能区中比EJ-276D平均低0.37。对于2.54 cm EJ-276D、2.54 cm自研塑闪以及5.08 cm EJ-276D，它们的FoM因子在100 keVee时分别为1.43、1.33和1.30，均大于1.27，表明它们已经能在100 keVee这样的低能区清晰地甄别中子和γ射线。而对于5.08 cm自研塑闪，它的FoM因子在能量接近200 keVee时才大于1.27。在640 keVee以上的高能区，各塑闪的FoM因子出现了下降，这并不是因为其甄别能力下降，而是能区范围太宽所导致的。

图7分别统计了2.54 cm、5.08 cm自研塑闪的分能区FoM值与相应尺寸的EJ-276D的相对差异。可以看到，2.54 cm自研塑闪在各能区与EJ-276D的差距不超过11%，最大偏差出现在524~640 keVee能区，达到了10.4%。5.08 cm自研塑闪与EJ-276D的差距则更大，且总体呈现出相对偏差随着能量的上升而先增大后减小的趋势，最大值为26.3%，对应的能区为407~524 keVee。

为了验证本文所搭建测试平台的可靠性，对比了其他学者使用电荷积分法对EJ-276的n-γ甄别能力的测试结果。Pinilla-Orjuela等[19]将2.54 cm圆柱体EJ-276与光电倍增管滨松R11265U耦合，用CAEN公司的v1761采集卡（采样率4 GSPS）采集来自^{252}Cf源的脉冲信号，将每200 keVee划分为一个能区计算FoM因子。Grodzicka-Kobylka等[20]将5.08 cm圆柱体EJ-276与滨松R6233-100耦合，用CAEN公司的采集卡DT5730（采样率500 MSPS）采集来自Pu-Be中子源的脉冲信号，选取各能点的上下10%作为能区范围来计算FoM因子。Hai等[21]将

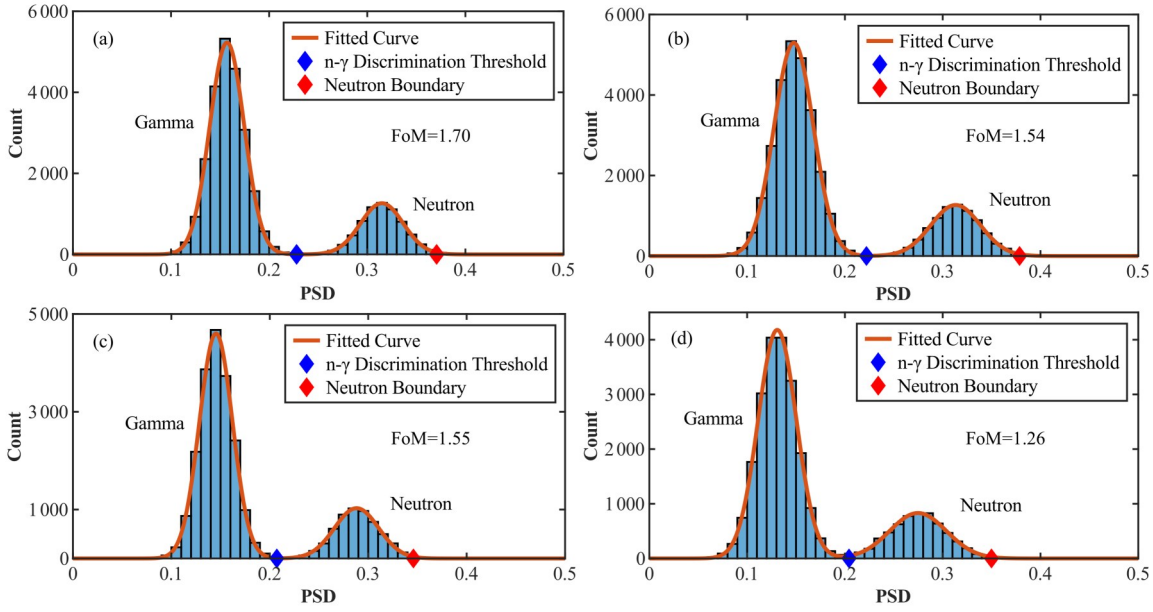


图5 128~175 keV能区的PSD甄别谱（彩图见网络版） (a) 2.54 cm EJ-276D，(b) 5.08 cm EJ-276D，(c) 2.54 cm自研塑闪，(d) 5.08 cm自研塑闪

Fig.5 PSD discrimination spectrum at 128~175 keV (color online) (a) 2.54 cm EJ-276D, (b) 5.08 cm EJ-276D, (c) 2.54 cm SD-PS, (d) 5.08 cm SD-PS

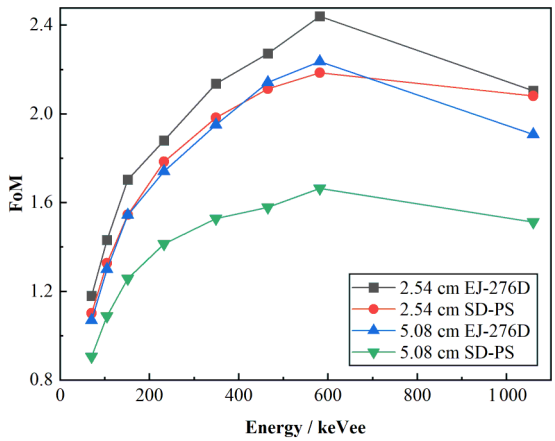


图6 4个塑闪的分能区FoM值对比（彩图见网络版）
Fig.6 Comparison of FoM values in segmented energy regions for four plastic scintillators (color online)

14 mm×40 mm×14 mm的长方体EJ-276与滨松R6236-01耦合，用采集卡DRS-4（采样率2 GSPS）采集来自^{252}Cf的脉冲信号，以20 keVee为一个能区（只有第一个能区范围为50 keVee）来计算FoM因子。图8展示了上述文献测得的EJ-276的分能区FoM因子与本文所测EJ-276D的分能区FoM因子的变化趋势对比结果。

可以看到，本文对2.54 cm EJ-276D的测试结果要优于Pinilla-Orjuela等[19]对EJ-276的测试结果；本文对5.08 cm EJ-276D的测试结果在300 keVee附近不如Grodzicka-Kobylka等[20]对EJ-276的测试结果，但在其他能区与其相当。Hai等[21]对长方体EJ-276的测试结果则远不如其他研究。这说明本文所搭建的测试平台具有良好的性能和可靠性，能够准确地评价待测塑闪的n-γ甄别能力。

3.2.3 相对探测效率

由于4个塑闪都在相同的实验条件下测试，可以通过统计每个塑闪的中子、γ计数率来得到自研塑闪与EJ-276D的探测效率差距，如表4所示。其中，2.54 cm塑闪测试时间为1 800 s，5.08 cm塑闪测试时间为300 s，以2.54 cm EJ-276D为标准，能量阈值设定为120 keVee。

可见，2.54 cm自研塑闪的γ、中子探测效率均为对应尺寸EJ-276D的81%；5.08 cm自研塑闪的γ、中子探测效率分别为对应尺寸EJ-276D的77%和73%。将4个塑闪进行了尺寸测量和称重，称重结果如表4所示。2.54 cm自研塑闪与2.54 cm EJ-276D的尺寸没有偏差，质量测量显示2.54 cm自研塑闪相对于2.54 cm EJ-276D的质量偏差为−28.0%；5.08 cm EJ-276D的尺寸没有偏差，而5.08 cm自研塑闪的实际测量直径比标准尺寸偏小0.51 cm，质量测量5.08 cm自研塑闪为101.20 g（若修正到标准尺寸的质量为111.22 g），修正后与5.08 cm EJ-276D的质量偏差为−14.8%；可以看出，自研塑闪相比EJ-276D密度略偏低，单位体积上原子数量更少，中子、γ射线与其发生相互作用而被探测到的概率偏低，是造成其探测效率差异明显的重要原因。

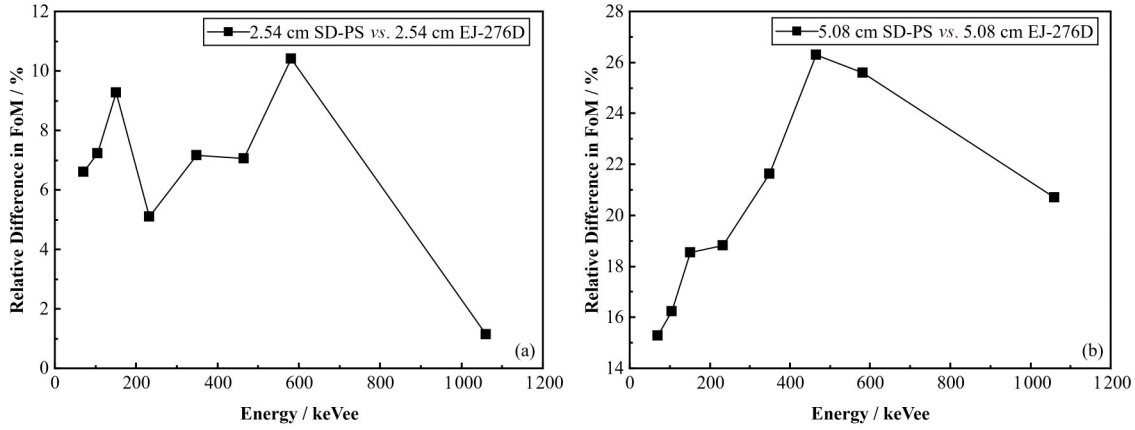


图7 同尺寸自研塑闪与EJ-276D的分能区FoM值相对差异 (a) 2.54 cm塑闪,(b) 5.08 cm塑闪
Fig.7 Relative deviations of FoM value between the self-developed plastic scintillators and EJ-276D of the same size (a) 2.54 cm plastic scintillators, (b) 5.08 cm plastic scintillators

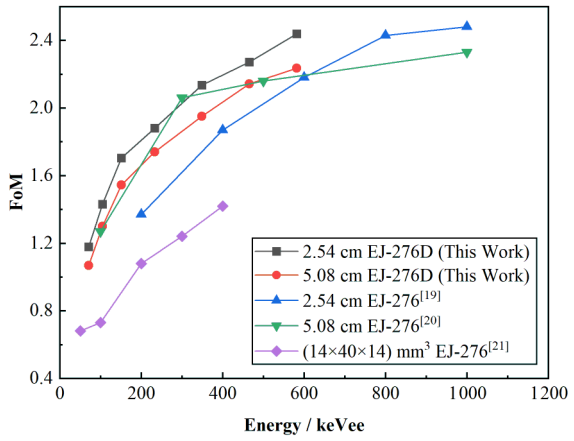


图8 文献[19–21]中EJ-276的分能区FoM值与本文的对比(彩图见网络版)
Fig.8 Comparison of segmented energy-region FoM values for EJ-276 between this study and reported results in Ref.[19–21] (color online)

3.3 飞行时间法测试结果

3.3.1 飞行时间谱及定时精度

在飞行时间测试时,不仅每个粒子的飞行时间会被记录,长门积分Q_{long}和短门积分Q_{short}也仍会被记录。所以每个粒子都包含飞行时间、PSD值和等效电子能量这三个主要信息。将§3.2.2中已经得到的两条甄别曲线作为判据,就可以得到由电荷积分法判选出的包含飞行时间信息的中子、γ信号。

4个塑闪测得的^{252}Cf中子γ飞行时间谱如图9所示。测量时间均为300 s,能量阈值设定为120 keVee。可以看到,飞行时间谱中左侧窄高的峰即为γ峰,右侧展宽较大的为中子峰。图中的两条虚线分别是由电荷积分法所判选出的包含飞行时间信息的中子和γ射线,拟合线是对γ峰的高斯拟合,用于计算γ峰的峰位和半高宽(Full Width at Half Maximum,FWHM),同时得到标准差σ,黑实线则代表所有信号的飞行时间-计数谱。由于放射源与塑闪中心的距离为15 cm,所以理想情况下所有γ射线的飞行时间均为0.5 ns,但是由于探测器信号产生和传输过程中时间涨落的影响产生了一定的离散,形成了图9中峰位在0.5 ns并具有一定半高宽的γ峰。γ峰的半高宽就代表了这一套系统的定时精度。

表4 4个塑闪的相对探测效率
Table 4 Relative detection efficiency of the four plastic scintillators

闪烁体 Scintillator	γ计数率 Gamma count rate / s^{-1}	中子计数率 Neutron count rate / s^{-1}	相对γ探测效率 Relative γ detection efficiency	相对中子探测效率 Relative neutron detection efficiency	质量 Mass / g
2.54 cm EJ-276D	68.3	17.8	1	1	18.66
2.54 cm自研塑闪 2.54 cm SD-PS	55.4	14.4	0.81	0.81	13.44
5.08 cm EJ-276D	488	129	7.14	7.25	130.57
5.08 cm自研塑闪 5.08 cm SD-PS	375	94.4	5.49	5.30	101.20

除射线本身的飞行时间外,闪烁体发出闪烁光子、信号在光电倍增管和线缆中的传输都会产生延迟,电离室的开门信号传输也同理。在程序中手动设置开门信号通道和塑闪探测器信号通道的电子学延迟参数,让采集卡每个通道的信号定时时间减去电子学延迟参数,就可以得到γ峰峰位在0.5 ns的飞

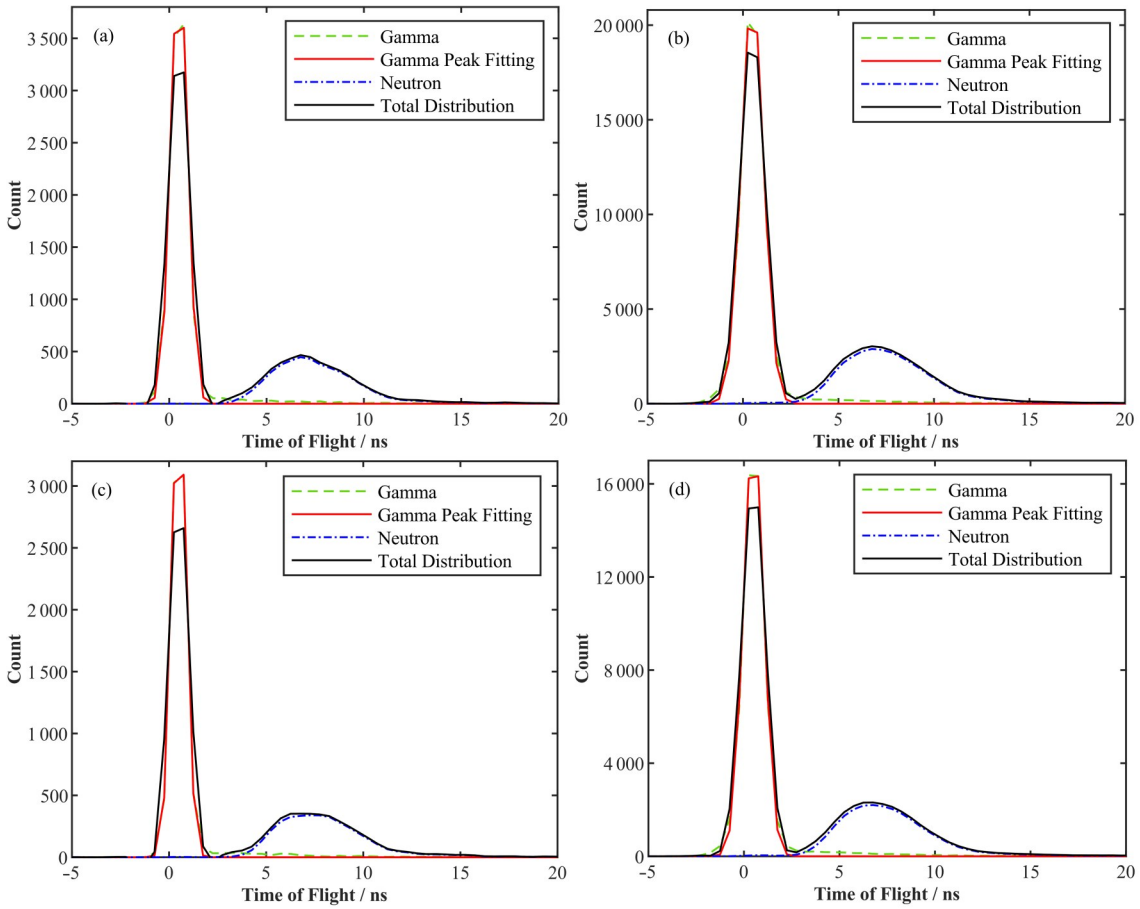


图9 飞行时间谱（彩图见网络版） (a) 2.54 cm EJ-276D，(b) 5.08 cm EJ-276D，(c) 2.54 cm 自研塑闪，(d) 5.08 cm 自研塑闪
Fig.9 Time-of-flight spectrua (color online) (a) 2.54 cm EJ-276D, (b) 5.08 cm EJ-276D, (c) 2.54 cm SD-PS, (d) 5.08 cm SD-PS

行时间谱。电离室的电子学延迟设置为13 ns。表5是4个塑闪的飞行时间谱测试结果。

从表中可以看到，2.54 cm自研塑闪测得的γ峰半高宽为0.87 ns，比对应尺寸EJ-276D低0.13 ns；5.08 cm自研塑闪测得的γ峰半高宽为1.25 ns，比对应尺寸EJ-276D低0.13 ns。这说明两种尺寸自研塑闪的定时精度均优于EJ-276D。

表5 4个塑闪的定时精度及电子学延迟参数
Table 5 Timing accuracy and electronic delay parameters of the four plastic scintillators

闪烁体 Scintillator	2.54 cm EJ-276D	2.54 cm自研塑闪 2.54 cm SD-PS	5.08 cm EJ-276D	5.08 cm自研塑闪 5.08 cm SD-PS
γ峰半高宽 FWHM of the γ peak / ns	1.00	0.87	1.38	1.25
γ峰位 Gamma peak position / ns	0.51	0.51	0.49	0.50
高斯拟合标准差σ Standard deviation σ of the gaussian fit / ns	0.43	0.37	0.58	0.53
电子学延迟 Electronic delay / ns	33.14	31.47	36.14	35.27

3.3.2 γ误甄别率

从图4的散点图中可以看到，中子峰和γ峰之间分布着许多散点，甚至两峰在底部完全相连，此时两曲线之间甄别出的中子就有可能实际上是γ射线。即电荷积分法判选为中子的信号，实际上在飞行时间谱中处于γ射线的区域。为了确定飞行时间谱的中子、γ区域范围，需要找到两个区域的分界点。记γ峰位为t_{peak}，则认为$t_{peak}+3\sigma$就是中子、γ飞行时间的分界点。分界点左侧为γ区域，右侧为中子区域。根据表5的数据可以计算出各塑闪所测飞行时间谱

的中子、γ飞行时间分界点如下：2.54 cm EJ-276D为1.8 ns，2.54 cm自研塑闪为1.62 ns，5.08 cm EJ-276D为2.23 ns，5.08 cm自研塑闪为2.09 ns。统计这部分误甄别信号的计数率，即可得到γ误甄别率：

$$M = \frac{n_{\gamma/n}}{n_n} \tag{2}$$

式中：$n_{\gamma/n}$是将γ误甄别为中子的计数率；n_n是总的中子计数率。

测试结果如表6所示，2.54 cm自研塑闪和EJ-276D的γ误甄别率保持在0.2%左右，几乎不会产生误判；5.08 cm自研塑闪和EJ-276D的γ误甄别率则不超过1%。如果再将能量阈值提高，γ误甄别率将进一步减小，直至脉冲形状甄别能够完全无误地甄别出中子、γ。

表6 4个塑闪的γ误甄别率
Table 6 Gamma misidentification rates of the four plastic scintillators

闪烁体 Scintillator	2.54 cm EJ-276D	2.54 cm自研塑闪 2.54 cm SD-PS	5.08 cm EJ-276D	5.08 cm自研塑闪 5.08 cm SD-PS
中子计数率 Neutron count rate / s^{-1}	16.0	13.3	119	88.8
γ误甄别为中子的计数率 Count rate of γ misidentified as neutron / s^{-1}	0.033	0.027	1.18	0.89
γ误甄别率 Gamma misidentification rate / %	0.21	0.20	0.99	1.00

3.3.3 塑料闪烁体脉冲信号下降时间对系统定时的影响

虽然4个塑闪都是用同一套探测系统进行测试，但是从表5中可以看出，它们的电子学延迟参数并不相同，且总体呈现5.08 cm塑闪延迟高于2.54 cm塑闪的规律。由于不同塑闪的尺寸、配方不同，产生脉冲信号的上升时间、下降时间等参数也会不同，这会对探测系统的定时产生影响。为了测得每个塑闪的信号特征参数，将探测器的信号线接入示波器。放入^{137}Cs源，打开示波器的上升时间、下降时间、脉宽、幅度测量功能，表7中的数据是由每个塑闪分别采集大于一万个波形后取平均值得到的。为过滤掉噪声，得到形状完整、幅度较大的波形，示波器触发阈值设置为100 mV。

表7 4个塑闪脉冲信号的特征参数
Table 7 Characteristic parameters of the pulse signals from the four plastic scintillators

闪烁体 Scintillator	脉宽 Pulse width / ns	下降时间 Fall time / ns	上升时间 Rise time / ns	幅度 Amplitude / mV
2.54 cm EJ-276D	22.958	7.415 3	30.646	243.24
2.54 cm自研塑闪 2.54 cm SD-PS	18.402	6.292 2	27.965	267.00
5.08 cm EJ-276D	25.142	8.773 5	31.852	220.68
5.08 cm自研塑闪 5.08 cm SD-PS	24.518	8.459 3	31.218	194.51

可以看到，2.54 cm和5.08 cm自研塑闪的信号前沿下降时间和脉宽均小于对应尺寸的EJ-276D。但是2.54 cm自研塑闪的脉冲幅度略大于对应尺寸的EJ-276D，使得其波形积分面积（对应发光产额）与EJ-276D相当。2.54 cm自研塑闪的下降时间最短，为6.292 2 ns，由于数字化仪采用了前沿数字恒比定时技术，越快的下降沿会带来定时精度的提升，使得2.54 cm自研塑闪拥有最优的定时精度。这可通过信号下降时间与电子学延迟之间的线性关系进行验证，如图10所示，得到的拟合直线为y=1.866 3x+19.569 3，判定系数R^2为0.989 3，具有较好的拟合优度，也说明电子学延迟与不同塑闪各自的信号下降时间有线性关联。

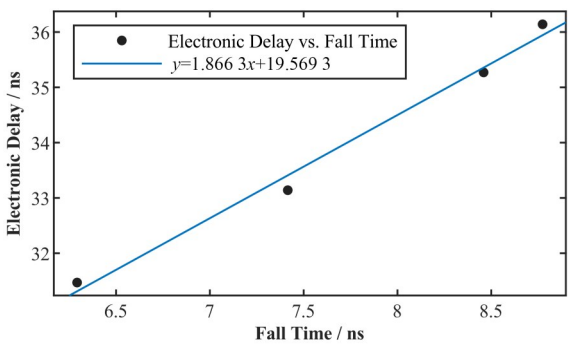


图10 4个塑闪的信号下降时间与电子学延迟关系拟合
Fig.10 Fitting of the relationship between signal fall time and electronic delay for the four plastic scintillators

4 结语

本文搭建基于光电倍增管和数字化仪的测试平台，采用^{137}Cs源和^{252}Cf中子源对2.54 cm和5.08 cm自研塑料闪烁体和对应尺寸的EJ-276D进行了对比测试。结果表明，相比同尺寸EJ-276D，采用新配方的2.54 cm自研塑闪的光产额与其相当，n-γ甄别能力偏低，最大偏差不超过11%，探测效率偏低19%，定时精度优于EJ-276D；而采用老配方的5.08 cm自研塑闪的光产额、n-γ甄别能力及探测效率均显著低于同尺寸的EJ-276D，但其定时精度优于EJ-276D。此外，四个塑闪均不超过1%的γ误甄别率也验证了这套探测系统具有良好的性能。

本研究证明自研2.54 cm塑闪的配方较优，其产品性能已经接近国际上商用塑闪EJ-276D的水平，可为后续新批次塑闪的研发和改进提供参考。

作者贡献声明 秦翊童负责测试平台搭建与调试，进行实验及数据处理分析，撰写论文；梁勇飞负责研制自研塑料闪烁体的配方和工艺；王靖恺负责自研塑闪制备；刘晓波提供总体实验方案，指导结果分析，负责论文的审阅与修订。

参考文献

1 张泽青, 李乾利, 张志军, 等. 中子探测用闪烁材料研究进展[J]. 自然杂志, 2022, **44**(4): 301–315. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2022.04.005.
ZHANG Zeqing, LI Qianli, ZHANG Zhijun, *et al*. Research progress of scintillation materials for neutron detection[J]. Chinese Journal of Nature, 2022, **44**(4): 301–315. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2022.04.005.

2 Hajagos T J, Liu C, Cherepy N J, *et al*. High-Z sensitized plastic scintillators: a review[J]. Advanced Materials, 2018, **30**(27): 1706956. DOI: 10.1002/adma.201706956.

3 Cieślak M, Gamage K, Glover R. Critical review of scintillating crystals for neutron detection[J]. Crystals, 2019, **9**(9): 480. DOI: 10.3390/cryst9090480.

4 Zaitseva N P, Glenn A M, Mabe A N, *et al*. Recent developments in plastic scintillators with pulse shape discrimination[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **889**: 97–104. DOI: 10.1016/j.nima.2018.01.093.

5 He S, Wan P Y, Li H C, *et al*. Hot exciton-based plastic scintillator engineered for efficient fast neutron detection and imaging[J]. Advanced Functional Materials, 2025, **35**(29): 2503688. DOI: 10.1002/adfm.202503688.

6 De Stefano R, Pérot B, Carasco C, *et al*. Pulsed neutron interrogation with PVT plastic scintillators to detect nuclear materials[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **976**: 164276. DOI: 10.1016/j.nima.2020.164276.

7 Sutanto F, Classen T M, Dazeley S A, *et al*. SANDD: a directional antineutrino detector with segmented ^{6}Li-doped pulse-shape-sensitive plastic scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **1006**: 165409. DOI: 10.1016/j. nima. 2021.165409.

8 赵红赟, 孔洁, 杨海波, 等. 用于新型塑料闪烁体阵列探测器的多通道前端读出电子学设计[J]. 原子能科学技术, 2016, **50**(3): 545–552. DOI: 10.7538/yzk.2016.50.03.0545.
ZHAO Hongyun, KONG Jie, YANG Haibo, *et al*. Design of multi-channel front-end readout electronics applied for new plastic scintillator array detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, **50**(3): 545–552. DOI: 10.7538/yzk.2016.50.03.0545.

9 Zaitseva N, Rupert B L, PaweŁczak I, *et al*. Plastic scintillators with efficient neutron/gamma pulse shape discrimination[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, **668**: 88–93. DOI: 10.1016/j.nima.2011.11.071.

10 宋云, 左晶鑫, 梁勇飞, 等. 自研塑料闪烁体探测器中子/γ甄别能力测试[J]. 核技术, 2023, **46**(3): 030403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030403.
SONG Yun, ZUO Jingxin, LIANG Yongfei, *et al*. Neutron/gamma discrimination performance test for self-developed plastic scintillation detectors[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(3): 030403. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2023.hjs.46.030403.

11 Eljen Technology. EJ-276D - Pulse Shape Discrimination Plastic Scintillator[EB/OL]. (2023-05-20) [2025-05-05]. https://eljentechnology. com/products/plastic-scintillators/ej-276.

12 Kouzes R T, Cho H M, Cowles C C, *et al*. Investigations of degradation and encapsulation of plastic scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **954**: 161791. DOI: 10.1016/j.nima.2019.01.018.

13 张翼, 李建胜, 金宇, 等. ^{252}Cf快响应电离室裂变中子、γ飞行时间谱测量[J]. 核动力工程, 2008, **29**(5): 91 – 93.
ZHANG Yi, LI Jiansheng, JIN Yu, *et al*. Measurement of ^{252}Cf fast ionization chamber fission neutron and γ ray TOF spectrum[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, **29**(5): 91 – 93.

14 Stevanato L, Fabris D, Hao X, *et al*. Light output of EJ228 scintillation neutron detectors[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2011, **69**(2): 369 – 372. DOI: 10.1016/j.apradiso.2010.10.022.

15 Siciliano E R, Ely J H, Kouzes R T, *et al*. Energy calibration of gamma spectra in plastic scintillators using Compton kinematics[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2008, **594**(2): 232 – 243. DOI: 10.1016/j. nima. 2008. 06.031.

16 Shin T. Fast-neutron multiplicity counting techniques for nuclear safeguards applications[D]. USA: University of Michigan, 2019.

17 张少东, 金宝亮, 张小东. 基于液闪EJ301研制的中子探测器的性能测试[J]. 核技术, 2024, **47**(8): 080402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080402.
ZHANG Shaodong, JIN Baoliang, ZHANG Xiaodong. Evaluation of self-developed neutron detector based on EJ301 liquid scintillator[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(8): 080402. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2024. hjs. 47. 080402.

18 Balmer M J I, Gamage K A A, Taylor G C. Comparative analysis of pulse shape discrimination methods in a ^{6}Li loaded plastic scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, **788**: 146 – 153. DOI: 10.1016/j.nima.2015.03.089.

19 Pinilla-Orjuela M I, Mesick K E, Bloser P F, *et al*. Performance evaluation of pulse shape discrimination capable organic scintillators for space applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, **1053**: 168309. DOI: 10.1016/j.nima.2023.168309.

20 Grodzicka-Kobylka M, Szczesniak T, Adamowski L, *et al*. Comparison of an OGS/Polystyrene scintillator (BSO-406) with pure OGS (BSO-100), EJ-276, EJ-309, and M600 scintillators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2025, **1077**: 170559. DOI: 10.1016/j.nima.2025.170559.

21 Hai V H, Dang N M, Phuc N T T, *et al*. Enhancing neutron/gamma discrimination in the low-energy region for EJ-276 plastic scintillation detector using machine learning[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2025, **72**(3): 225 – 230. DOI: 10.1109/tns.2024.3456863.