

n/γ 双粒子反应深度探测器设计与性能表征

赵冬¹ 梁旭文¹ 张荣华¹ 黑大千² 贾文宝¹ 单卿¹ 凌永生¹

1(南京航空航天大学 材料科学与技术学院 南京 210000)

2(兰州大学 核科学与技术学院 兰州 730000)

摘要 n/γ射线双粒子反应深度(Depth of Interaction, DOI)探测器可以实现中子与γ射线甄别并记录粒子在探测器中的反应位置,在对特殊核材料等危险放射性物质的定位成像研究中发挥着重要作用。传统的放射性定位成像装置都依赖具有n/γ射线甄别能力的探测器阵列,从而导致成像测量装置结构复杂、成本高。针对此问题,设计了一种基于EJ276塑料闪烁体(Φ3 cm×15 cm)的双粒子反应深度探测器,采用硅光电倍增管在闪烁体两端进行信号读出,并综合利用两端信号幅度与飞行时间对比进行粒子反应位置确定。利用Am-Be中子源和¹³⁷Cs γ源对探测器进行参数优化和分辨率刻度,结果显示:该探测器在灵敏区内探测效率均匀性较好,反应位置分辨率约4.4 cm。

关键词 反应深度探测器, 塑料闪烁体, n/γ甄别, 位置分辨率

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070402

Design and calibration of a depth-of-interaction detector for neutrons and gamma rays

ZHAO Dong¹ LIANG Xuwen¹ ZHANG Ronghua¹ HEI Daqian² JIA Wenbao¹ SHAN Qing¹
LING Yongsheng¹

¹(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

²(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract [Background] Recently, global concerns regarding the illicit transportation and trafficking of nuclear materials and other radioactive sources have increased, leading to increased demands for efficient and rapid security and non-proliferation technologies. The International Atomic Energy Agency's Incident and Trafficking Database has reported 3 235 confirmed incidents involving nuclear and other radioactive materials out of regulatory control from 1993 to 2017. Of these incidents, 278 are associated with trafficking or malicious use of materials such as highly enriched uranium, plutonium, and plutonium-beryllium neutron sources. Therefore, developing depth-of-interaction detector for neutrons and gamma rays is important for effective control of nuclear and radiation materials at national and international cross points such as borders, ports, and airports. [Purpose] This study aims to design a depth-of-interaction detector for neutrons and gamma rays and characterize its performance. [Methods] Hereby, an EJ276 plastic scintillator (Φ3 cm×15 cm) coupled with two silicon photomultipliers (SiPMs) in both sides was designed as

国家自然科学基金(No.11975121)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(No.KYCX22_0354)资助

第一作者: 赵冬, 男, 1994年出生, 2020年于南京航空航天大学获硕士学位, 现为博士研究生, 研究领域为辐射探测及核分析技术

通信作者: 贾文宝, E-mail: jjawb@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2023-03-11, 修回日期: 2023-04-27

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11975121), the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No.KYCX22_0354)

First author: ZHAO Dong, male, born in 1994, graduated from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics with a master's degree in 2020, doctoral student, focusing on radiation detection and nuclear analysis technology

Corresponding author: JIA Wenbao, E-mail: jjawb@nuaa.edu.cn

Received date: 2023-03-11, revised date: 2023-04-27

a depth-of-interaction detector for neutrons and gamma rays. The short gate time was optimized to achieve better neutron/gamma-ray discrimination, and the reaction position was determined based on the amplitude ratio and time of flight (TOF) difference between signals from two sides. Finally, Am-Be neutron source and ^{137}Cs γ source were applied to detector parameter optimization and resolution calibration for performance characterization. **[Results]** Experimental results demonstrate that good consistency in the detection efficiency of the detector at different incident positions, where the resolution of the one-dimensional reaction position is approximately 4.4 cm. **[Conclusions]** The designed depth-of-interaction detector can be used to replace detector arrays in neutron scatter cameras and coded-aperture imagers to reduce costs and system complexity.

Key words Depth-of-interaction detector, Plastic scintillator, Neutron/gamma-ray discrimination, Position resolution

特殊核材料与其他放射源的非法贩运与使用对各国公众安全造成严重威胁,据国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)统计,1993~2017年间,全球共发生3 235件非法的核(放射性)材料失控事件,其中278件涉及高浓缩铀、钚和钚铀中子源等^[1]。在这类情况下,尤其是在港口、机场和海关等空旷场所,放射性成像技术成为特殊核材料测量和定位的高效可靠的技术手段,从而得到世界上主要国家的重视和广泛研究^[2]。可用于对n/ γ 射线同时测量的常用定位成像装置包括:中子散射相机^[3]、编码孔射线相机^[4]及时序编码孔射线相机^[5]等。此类装置都较依赖具有n/ γ 射线甄别能力的探测器阵列,导致成像测量装置结构复杂、成本高。

反应深度探测器是指对粒子在探测器中的反应位置具有一维分辨能力的探测器。由于反应深度探测器可以确定粒子在探测器中的反应位置,从而可以减少探测器阵列中的探测器个数,简化测量装置的结构设计,在核医学、特殊核材料检测^[6]及暗物质探测等领域有着广泛的应用需求。反应深度探测器的结构设计主要分为单端信号^[7]读出与双端信号读出^[8]两种。由于双端信号读出具有更高的位置准确度与空间分辨率,在反应深度探测器中具有广泛的应用。在PET (Positron Emission Tomography)研究^[9-10]中,通常通过比较两端信号的幅度差异来给出粒子在探测器中的反应位置^[11];在一些尺寸较大的反应深度探测器设计中,也有通过两端信号的到达时间来判断反应位置。将反应深度探测器应用于n/ γ 射线成像装置^[12]中可以大大减小成像装置中探测器系统的复杂程度,并且反应深度探测器的空间分辨率越高,成像装置的图像重建效果越好。为实现中子与 γ 射线的同时测量与成像,应选择具有n/ γ 射线甄别能力的探测器。

本研究中,对n/ γ 射线双粒子反应深度探测器进行设计与性能表征,将尺寸为 $\Phi 3\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ EJ276

塑料闪烁体作为反应深度探测器的探测材料,利用硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM)在探测器进行双端信号读出,并采用电荷比较法进行n/ γ 射线甄别;利用钚铀中子源对探测器的射线甄别时间参数设置进行优化,并利用准直 γ 源对探测器的相对探测效率及位置分辨能力进行刻度;在位置分辨中,综合利用信号幅度比较法与飞行时间(Time of flight, TOF)比较法更准确地确定粒子在探测器中的反应位置,其一维位置分辨率约为4.4 cm。

1 装置与方法

1.1 探测器结构设计

为实现中子与 γ 射线的同时测量与甄别,此反应深度探测器选择圆柱形EJ276塑料闪烁体为辐射灵敏材料,其整体结构如图1所示,探测器外形尺寸为 $\Phi 3.5\text{ cm}\times 21\text{ cm}$,其中EJ276塑料闪烁体的尺寸为 $\Phi 3\text{ cm}\times 15\text{ cm}$;探测器铝外壳的厚度为1.5 mm,铝壳与闪烁体之间的光反射材料为0.12 mm白色尼龙+50 μm 镀铝膜;选择SiPM (SensL, ARRAYJ-60035-4P)在探测器两端进行信号读出,其灵敏区边长为12.46 mm。测量过程中,中子或 γ 射线与探测器反应产生的闪烁光被位于两端的SiPM分别收集,由于SiPM略小于探测器端面,信号收集过程中会有部分光子未能被其收集。

SiPM工作电压为+24.1~+30 V,由低压电源(RIGOL, DP832)进行供电,其输出信号进入数字化多道分析器(DT5730, CAEN)进行处理,该数字谱仪可记录两端信号的幅度、形状(Power Spectral Density, PSD值)以及发生时刻。在后续粒子甄别、位置分辨分析中利用上述信息获取反应粒子的能量、类型及反应位置等信息。

1.2 反应深度探测器原理

基于双端信号读出的一维反应位置分辨是依靠分析两端信号的差异实现的^[13],当粒子在探测器的

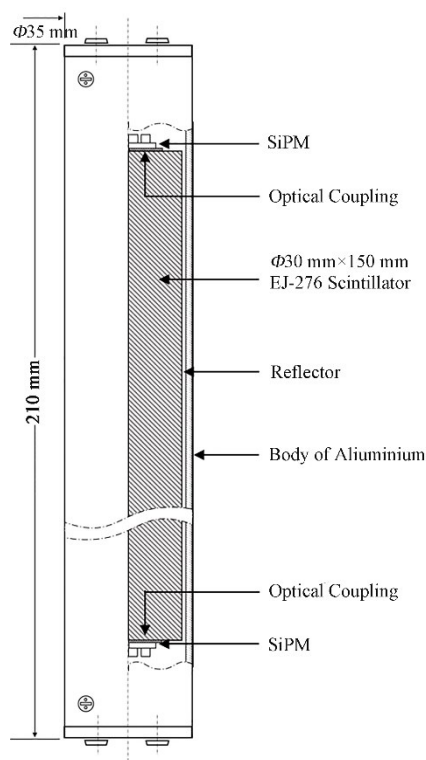


图1 反应深度探测器结构示意图
Fig.1 Structural schematic of the depth-of-interaction detector structure

不同位置反应时,两端收集信号的到达时刻与幅度存在差异,因此,可以利用这些差异对反应位置进行确定。

1.2.1 信号幅度比较法

此方法实现反应位置确定的基础是探测器两端读出信号的幅度差异,如图2所示,假设探测器的长度为 $2l$,坐标原点为探测器中心,粒子与探测器发生反应的位置,即闪烁光的产生位置坐标为 z ,光信号由光电转换器件在两端面进行收集,柱面包裹光反射材料,在以下分析中可将其反射率视作100%,假设在某次事件中,产生的闪烁光光子个数为 $2P$,闪烁光向 4π 方向发射,探测器壁假定为全反射材料,向两端传输的光子个数均为 P ,光子在产生位置向两端面传输时,由于闪烁体材料本身对其有一定的衰减作用,假设线性衰减系数为 μ ,当探测器直径相对其长度可忽略时,向两端的衰减长度分别为 $l-z$ 与 $l+z$,那么探测器两端收集到的光子数分别为

$$P_1 = P \cdot e^{-\mu(l-z)} \quad (1)$$

$$P_2 = P \cdot e^{-\mu(l+z)} \quad (2)$$

经光电转换器件后,两端输出的信号幅度 A_1, A_2 正比于 P_1, P_2 ,此时,粒子反应位置的坐标 z 可由式(3)计算:

$$z = \frac{1}{2\mu} \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (3)$$

结合上述分析,基于信号幅度比较法的反应深度探测器的位置分辨率与闪烁体的发光效率及光衰减长度相关。

1.2.2 飞行时间比较法

飞行时间比较法的原理则更为简单,由于反应发生位置距离两端光电转换器件距离有差异,则两端信号的读出时间存在差异,即信号到达两端的时间与反应位置到两端的距离相关。同样假设反应位置的坐标为 z ,距离两端的长度分别为 $l-z$ 与 $l+z$,光子在闪烁体中传播的速度为 c ,那么光子到达探测器两端的时刻分别为:

$$t_1 = (l-z)/c \quad (4)$$

$$t_2 = (l+z)/c \quad (5)$$

由光电转换器件记录两端信号的发生时刻,粒子反应位置的坐标 z 可由式(6)计算:

$$z = \frac{c \cdot (t_2 - t_1)}{2} \quad (6)$$

结合上述分析,基于飞行时间比较法的反应深度探测器的位置分辨率与光子在闪烁体中的传播速度相关,在实际应用中还将受到电子学系统分辨时间^[14]的影响。

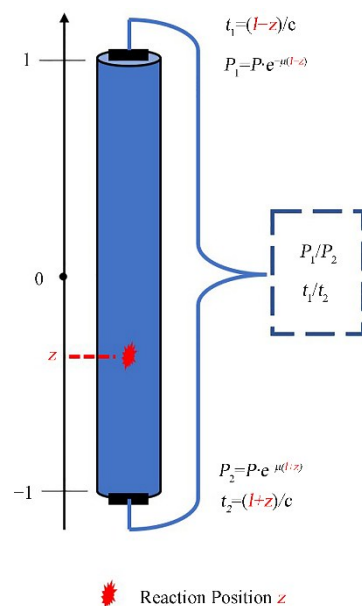


图2 反应深度探测器结构示意图
Fig.2 Structural diagram of the depth-of-interaction detector structure

在上述反应深度探测器的原理分析中做了一些理想化处理,例如假设探测器壁的光反射率为100%、忽略了探测器直径的影响并认为到达端面的光子全部被收集。由于上述理想化的处理,所以理

论推导系数 $1/2\mu$ 及 $c/2$ 并不能直接应用于反应位置计算,在两种方法中计算反应位置的相关系数都需要进行实验刻度。

为了实现更好的探测器位置分辨率,本研究中将使用信号幅度-飞行时间比较法对粒子反应位置进行分析。信号幅度-飞行时间比较法不是一种新的粒子反应位置分辨方法,而是综合利用上述两端信号在幅度及飞行时间上的差异,在上述两个维度上进行差异分析,从而进一步提高探测器的位置分辨能力。

1.3 实验装置

本研究中,利用 Am-Be 中子源进行探测器的中子与 γ 射线脉冲形状甄别实验,Am-Be 中子源的活度为 1.11×10^{10} Bq,实验装置结构俯视图如图 3 所示,其中不同材料由不同颜色标出。其中石蜡尺寸为 $85 \text{ cm} \times 85 \text{ cm} \times 85 \text{ cm}$,Am-Be 中子源距离出口位置约为 18 cm ,准直器直径为 10 cm 。准直器出口处为中子与 γ 的混合场,即除中子外,还存在伴生 γ 射线及中子与周围材料产生的次生 γ 射线。由于铅对中子的慢化以及周围材料的散射,在中子源出口处存在热中子与超热中子,但快中子仍占主要部分;出口处含有包括 Am-Be 中子源的伴生 γ 射线 (4.439 MeV) 以及大量中子与结构材料反应产生的次生 γ 射线。

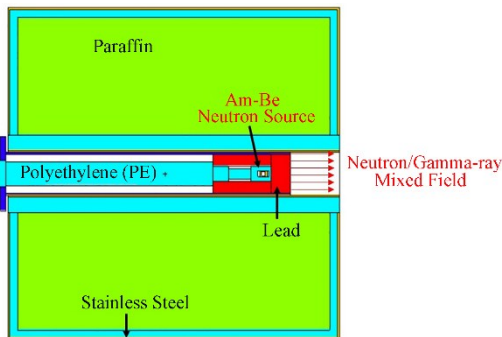


图3 n/γ射线甄别实验装置示意图

Fig.3 Schematic of the n/γ ray discrimination experimental setup

相对探测效率及位置分辨能力测试实验装置由铅准直体、准直体位移平台、探测器支架及铅屏蔽体组成,上述各部件均固定于光学平台上。其中,铅准直体整体尺寸为 $4 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,准直口宽度为 0.5 cm ,高度为 3 cm ,深度为 5 cm ,测试时,放射源固定于准直口中心;准直体固定于准直体位移平台上,位移平台可移动范围为 25 cm ,位移精度可达 0.1 mm ;探测器支架用于固定探测器,使探测器中心高度与准直口中心高度平齐;探测器上侧、下侧及后侧由铅块

进行本底辐射屏蔽,降低本底射线计数影响。实验时,将 Cs-137 源固定于准直口中央,以 1 cm 为步长移动放射源,每组测量时间设置为 5000 s ,共测量 15 组。

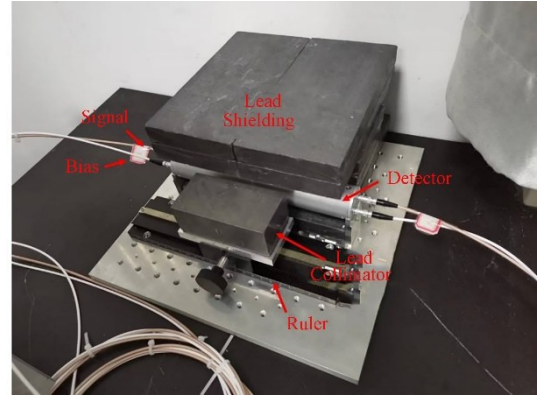


图4 相对探测效率及位置分辨能力测试实验装置图
Fig.4 Snapshot of experimental setup for the relative detection efficiency and position resolution tests

2 结果与讨论

2.1 n/γ射线甄别

为实现中子与 γ 射线的双粒子测量,可实现 n/γ 射线甄别是对探测系统最基本要求。脉冲形状甄别技术主要用于中子与 γ 射线之间的甄别,简称 n/γ 甄别^[15-16]。主要针对某些闪烁体探测器以及充 H 或 He-3 的正比计数管,可以根据 n/γ 射线在探测器中产生的脉冲形状差别来进行中子与 γ 射线的区分^[17]。本研究中,选择脉冲形状甄别中的电荷比较法进行 n/γ 甄别,PSD 值由式(7)计算。

$$\text{PSD} = \frac{Q_s}{Q} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} i(t) dt}{\int_0^{t_2} i(t) dt} \quad (7)$$

式中: Q_s 为信号慢组份积分值; Q 为信号总积分值; $i(t)$ 为 t 时刻电流信号强度; t_1 为慢组份积分开始时刻; t_2 为积分结束时刻,即 $0 \sim t_1$ 为短门时间, $0 \sim t_2$ 为长门时间。

因此,总信号与慢组份的时间设置对甄别效果有着重要的影响,在探测器后续刻度实验前需要对电荷比较法中的积分时间窗进行优化设置。实验时将探测器置于 Am-Be 中子源出口位置处,根据探测器输出脉冲信号形状,将长门时间设置为 2800 ns ,通过优化短门时间 ($300 \sim 1100 \text{ ns}$) 以实现更好的粒子甄别效果。在不同短门时间设置下,探测器两端输出信号的 PSD 分布如图 5 所示。由于中子相较于 γ 射线产生的信号慢组份占比更多,其 PSD 值更高。

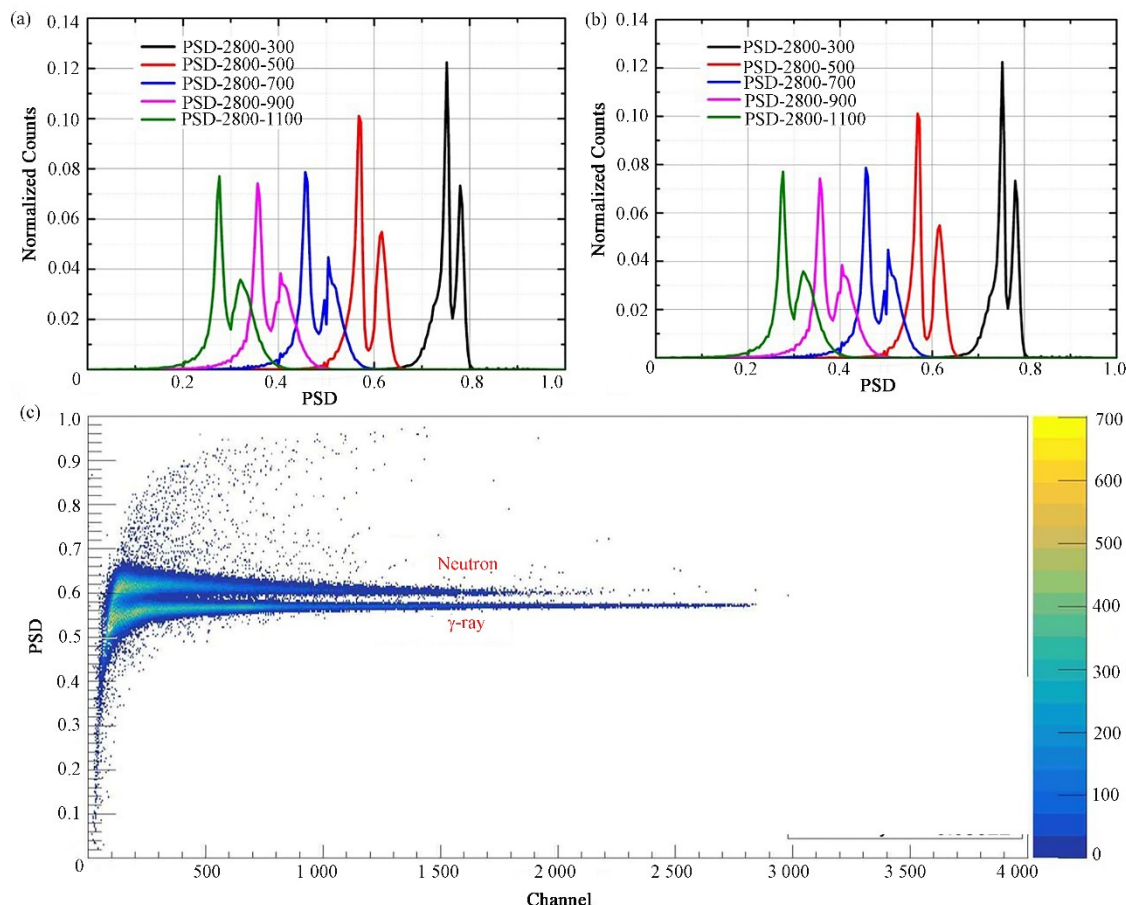


图5 不同短门时间设置下的两端信号甄别效果(a,b)及短门时间为500 ns时一端信号的PSD-Channel散点图(c)
 Fig.5 PSD distribution under different short gate times (a, b) and PSD-channel scatterplot under a short gate time of 500 ns (c)

由图5可以看出,中子与γ信号的PSD峰并非严格高斯分布,甚至在部分参数设置下形状偏差较大,因此,利用品质因子(Figure of Merit)评价粒子甄别效果会有失偏颇^[18];因此,在本研究中利用n-γ信号重叠区域在全部信号中的占比来评价不同参数设置下的甄别效果,即认为在实际应用时此部分重叠区域信号由于无法区分粒子类型而舍弃,此参数(中子伽马信号重叠区域占比)越低,被认为可达到越好的粒子甄别效果,在相同测量条件下获取的可利用中子或γ计数越多。据此选择长门时间为2 800 ns,短门时间为500 ns。

2.2 相对探测效率

由于探测器采取双端信号读出,将双端信号进行符合作为一个事件,而不同反应位置导致符合率不同。也就是说探测器不同部位的探测效率不同,同样利用对探测器的扫描测量对探测器不同位置的相对探测效率进行实验刻度。探测器的相对探测效率可由式(8)计算:

$$\varepsilon = \frac{N_p}{N_0} \quad (8)$$

式中: N_p 为射线在位置 P 入射时的探测器符合计数; N_0 为射线在探测器中心位置处入射时探测器的符合计数。即将射线入射探测器中心时的相对效率记作1。相对探测效率也反映了粒子在探测器不同位置反应时两端信号的符合率。

利用准直Cs-137放射源的在探测器不同位置入射时的计数率测量结果,进行相对效率计算,结果如图6所示。

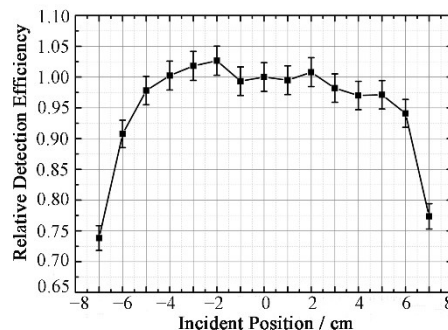


图6 粒子在不同位置入射时的相对探测效率
 Fig.6 Relative detection efficiency at different incident positions

由图6可以看出,在探测器中心12 cm范围内相对探测效率均在90%以上,在10 cm范围内相对探测效率均在97%以上。即在探测器的大部分体积内具有较平均的探测效率,只有在探测器两端的1 cm范围内的相对探测效率较低,约为75%。

2.3 位置分辨能力

放射源准直口位于探测器不同位置(探测器中心为坐标原点)时,两端信号幅度比及飞行时间差分布(部分)如图7所示。将幅度比及飞行时间差分布近似做二维高斯分布,可见,随着粒子入射位置向探测器一侧偏移,分布热点向左侧偏移。其横坐标为信号幅度比,纵坐标为信号飞行时间差。

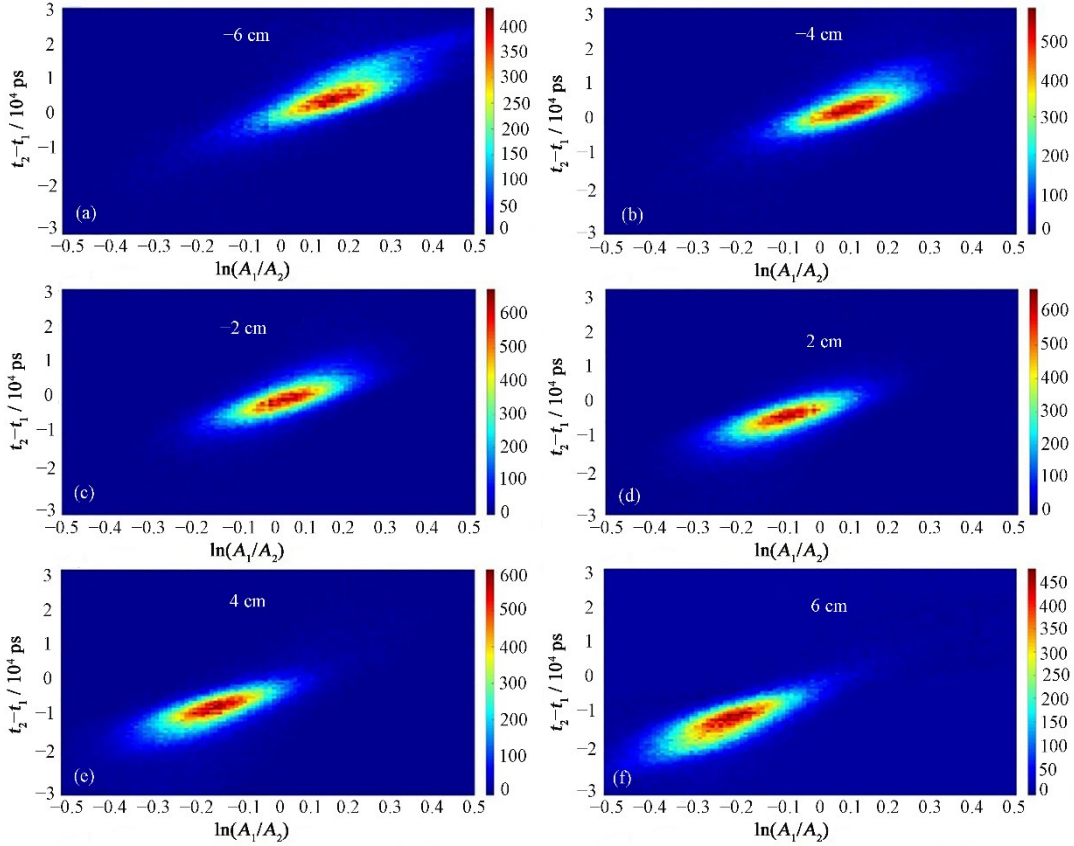


图7 粒子在探测器不同位置入射时两端信号幅度比及飞行时间差分布热点图

Fig.7 Amplitude ratio of two sides and time of hotspot map of TOF difference at different incident positions

对上述不同位置入射的热点图利用二维高斯分布进行拟合,获取其中心位置及两个维度上的半高宽,如图8所示,对其进行线性拟合获得信号幅度比 A 与飞行时间差 T (ps)的关系:

$$T = 46\,354 \times A - 1\,002 \quad (9)$$

式中: $A = \ln(A_1/A_2)$, $T = t_1 - t_2$ 。

文中使用的闪烁体探测器长度为15 cm,理论上两端光子传输时间差约为1 ns,但在图8所显示的测试结果中,两端探测器测量得到的信号时间差范围约为:5 ~ -10 ns(非对称的原因可能是由于外部测量系统带来的固定延时差),其两端信号时间差的均值约为7.5 ns。本研究中采用的SiPM(SensL, ARRAYJ-60035-4P)并非快读出(Fast Output, FOUT)型,脉冲宽度较宽(2 000 ns以上),测试结果

与理论结果相差较大,大概率是由于脉冲宽度较宽而引起的定时晃动引起的。

相较于直接将符合信号点向横纵坐标轴上分别投影,向图8的拟合直线做投影可得到此符合信号更准确的信号幅度比 A 与飞行时间差 T 。入射位置 z 与信号幅度比 A 及飞行时间差 T 的线性关系如图9所示,由于线性拟合系数的影响,在利用 A 和 T 分别计算入射位置时,会存在略微的差异,尽管这一差异影响很小,但是在计算入射位置 z 时,仍选择计算两位置的平均值,即入射位置 z 与信号幅度比 A 与飞行时间差 T 的关系如式(10)所示。

$$z = - \left[\left(\frac{A + 0.0179}{0.0292} \right) + \left(\frac{T + 1880}{1332} \right) \right] / 2 \quad (10)$$

图10给出了不同位置的射线入射时重建的位

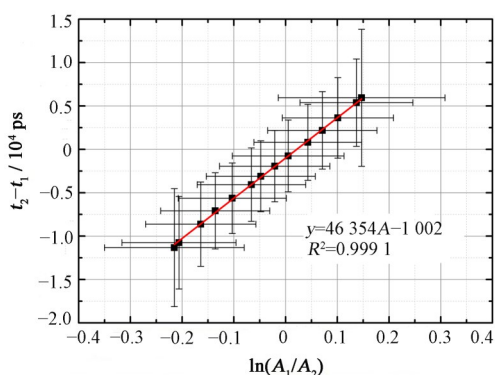


图8 探测器两端信号幅度比与飞行时间差的关系
Fig.8 Relationship between the amplitude ratio and time of flight difference of the signals from two ends

置分布,将分布曲线利用高斯函数进行拟合获得半高宽。但射线准直器具有一定的宽度(5 mm),利用射线源、准直体及探测器的相对几何位置计算得到,射线经过准直体打在探测器上的宽度最大约为1 cm,利用拟合获得的半高宽宽度减去射线宽度作为探测器的位置分辨率。探测器中心位置的位置分辨率约为4.37 cm,探测器边缘的位置分辨率约为4.90 cm。由于边缘效应等因素的影响,其在两端的分辨低于中间部分。

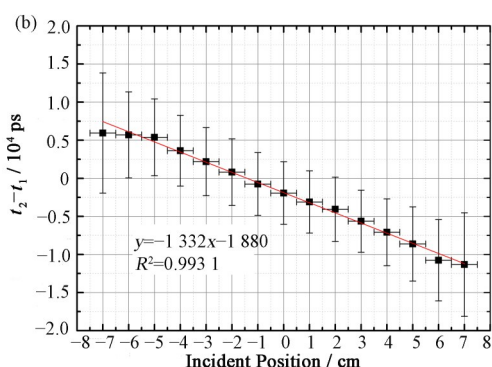
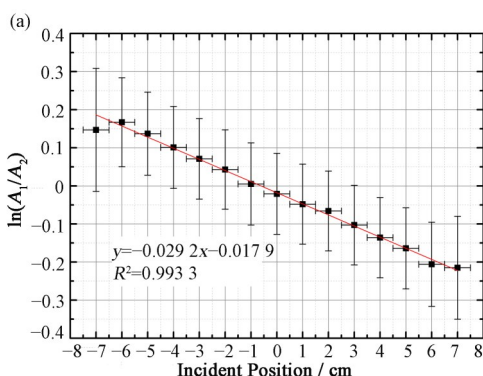


图9 信号幅度比(a)及飞行时间差(b)与粒子入射位置的关系
Fig.9 Relationship between the amplitude ratio (a), TOF difference (b) and incident position

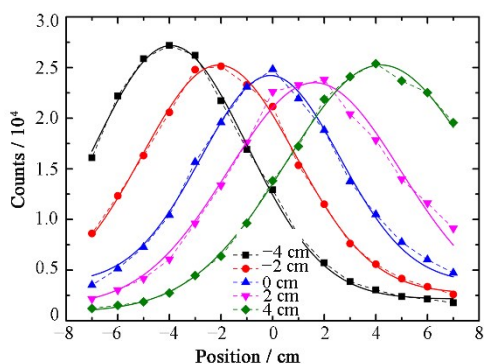


图10 粒子在不同位置入射时重建的位置分布
Fig.10 Reconstructed position distribution at different incident positions

均匀性较好,在反应位置的分辨中综合利用两端信号幅度及飞行时间比较法,可以实现约4.4 cm的一维位置分辨率。此探测器可用于散射相机、编码孔相机等n/γ射线双粒子成像装置中,降低装置成本及系统复杂度。在后续工作中,可通过在闪烁体与硅光电倍增管之间增加光导或采用快读出器件优化电子学分辨时间来进一步提升位置分辨能力。

作者贡献声明 赵冬负责探测器设计、实验及数据分析、文章资料的查阅及初稿撰写;梁旭文负责实验装置搭建及部分绘图;张荣华负责文章资料的查阅及整理;黑大千负责文章框架和修改;贾文宝负责文章框架和修订;单卿负责实验设计与文章修改;凌永生负责资料查阅及文章修改。

3 结语

n/γ射线双粒子反应深度探测器在特殊核材料检测、核医学成像等领域具有良好的应用前景。本文介绍了一种基于双端信号读出的EJ276塑料闪烁体的反应深度探测器,通过脉冲形状甄别可实现良好的n/γ射线甄别性能,探测器灵敏区内的探测效率

参考文献

- 1 Al Hamrashdi H, Monk S D, Cheneler D. Passive gamma-ray and neutron imaging systems for national security and nuclear non-proliferation in controlled and uncontrolled detection areas: review of past and current status[J].

- Sensors, 2019, **19**(11): 2638. DOI: [10.3390/s19112638](https://doi.org/10.3390/s19112638).
- 2 Runkle R C, Bernstein A, Vanier P E. Securing special nuclear material: recent advances in neutron detection and their role in nonproliferation[J]. Journal of Applied Physics, 2010, **108**(11): 111101. DOI: [10.1063/1.3503495](https://doi.org/10.1063/1.3503495).
 - 3 Vanier P E, Forman L, Dioszegi I, *et al.* Calibration and testing of a large-area fast-neutron directional detector [C]//2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. October 26 - November 3, 2007, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2008: 179 - 184. DOI: [10.1109/NSSMIC.2007.4436312](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2007.4436312).
 - 4 Guo J, Pang X Y, Cai J L, *et al.* Compact MPPC-based coded aperture imaging camera for dual-particle detection [J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2021, **5** (1): 61 - 70. DOI: [10.1007/s41605-020-00218-5](https://doi.org/10.1007/s41605-020-00218-5).
 - 5 Brennan J, Brubaker E, Gerling M, *et al.* Demonstration of two-dimensional time-encoded imaging of fast neutrons [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, **802**: 76 - 81. DOI: [10.1016/j.nima.2015.08.076](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.08.076).
 - 6 Bravar U, Bruillard P J, Fluckiger E O, *et al.* Design optimization and performance capabilities of the fast neutron imaging telescope (FNIT) [C]//2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. October 26 - November 3, 2007, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2008: 264 - 269. DOI: [10.1109/NSSMIC.2007.4436328](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2007.4436328).
 - 7 Cheng R, Wang F, Li S, *et al.* Single-ended readout depth-of-interaction measurements based on random forest algorithm[J]. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, 2023, **7**(2): 105 - 112. DOI: [10.1109/TRPMS.2022.3218401](https://doi.org/10.1109/TRPMS.2022.3218401).
 - 8 Giha N P, Steinberger W M, Nguyen L Q, *et al.* Organic glass scintillator bars with dual-ended readout[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **1014**: 165676. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165676](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165676).
 - 9 Du J W, Bai X W, Cherry S R. A depth-of-interaction encoding PET detector module with dual-ended readout using large-area silicon photomultiplier arrays[J]. Physics in Medicine and Biology, 2018, **63**(24): 245019. DOI: [10.1088/1361-6560/aace32](https://doi.org/10.1088/1361-6560/aace32).
 - 10 张斌, 赵书俊. PET探测器技术的新进展[J]. 原子核物理评论, 2012, **29**(3): 259 - 265.
 - ZHANG Bin, ZHAO Shujun. New developments in PET detector technology[J]. Nuclear Physics Review, 2012, **29** (3): 259 - 265.
 - 11 Ito M, Hong S J, Lee J S. Positron emission tomography (PET) detectors with depth-of- interaction (DOI) capability[J]. Biomedical Engineering Letters, 2011, **1**(2): 70 - 81. DOI: [10.1007/s13534-011-0019-6](https://doi.org/10.1007/s13534-011-0019-6).
 - 12 Steinberger W M. A handheld dual particle imager for imaging and characterizing special nuclear material[D]. Ann Arbor, MI, USA: University of Michigan, 2021.
 - 13 Sweany M, Galindo-Tellez A, Brown J, *et al.* Interaction position, time, and energy resolution in organic scintillator bars with dual-ended readout[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **927**: 451 - 462. DOI: [10.1016/j.nima.2019.02.063](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.02.063).
 - 14 Wen X F, Hayward J P. Time resolution measurements of EJ-232Q with single- and dual-sided readouts[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, **67**(9): 2081 - 2088. DOI: [10.1109/TNS.2020.3010469](https://doi.org/10.1109/TNS.2020.3010469).
 - 15 Liao C, Yang H R. Pulse shape discrimination using EJ-299-33 plastic scintillator coupled with a Silicon Photomultiplier array[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, **789**: 150 - 157. DOI: [10.1016/j.nima.2015.04.016](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.04.016).
 - 16 Ryabeva E V, Urupa I V, Lupar E E, *et al.* Calibration of EJ-276 plastic scintillator for neutron-gamma pulse shape discrimination experiments[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **1010**: 165495. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165495](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165495).
 - 17 Bertrand G H V, Hamel M, Normand S, *et al.* Pulse shape discrimination between (fast or thermal) neutrons and gamma rays with plastic scintillators: state of the art[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, **776**: 114 - 128. DOI: [10.1016/j.nima.2014.12.024](https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.12.024).
 - 18 Grodzicka-Kobylka M, Szczesniak T, Moszyński M, *et al.* Fast neutron and gamma ray pulse shape discrimination in EJ-276 and EJ-276G plastic scintillators[J]. Journal of Instrumentation, 2020, **15**(3): P03030. DOI: [10.1088/1748-0221/15/03/p03030](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/03/p03030).