

大面积塑料闪烁体适合阈值电压研究

陈久涛 宋玉收 许 蕊 宋润州 陈声强

(哈尔滨工程大学 核科学与技术学院 哈尔滨 150001)

摘要 大面积塑料闪烁体广泛运用于辐射监测领域,采用信号过阈检测的方式用作辐射计数器。过阈检测阈值电压的大小影响探测效率和最小可探测活度。射线入射在大面积塑料闪烁体不同位置时,收集端对光子的收集效率不同,存在探测效率一致性差异。根据大面积塑料闪烁体本底能谱和⁶⁰Co、¹³⁷Cs源在大面积塑料闪烁体不同位置的能谱,以⁶⁰Co源数据为例,结合处理电路信号放大关系,确定了合适的阈值电压。结果表明:上述方法确定的阈值电压,大面积塑料闪烁体探测器探测效率一致性较好,远离收集端有较高的探测效率,同时最小可探测活度较低。

关键词 塑料闪烁体, 阈值电压, 探测效率, 最小可探测活度

中图分类号 TL812⁺.1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120403

Appropriate threshold voltage toward high detection efficiency of large-area plastic scintillator

CHEN Jiutao SONG Yushou XU Rui SONG Runzhou CHEN Shengqiang

(College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract [Background] Large-area plastic scintillators are widely used in radiation monitoring. They are typically employed as gamma radiation counters through signal over-threshold detection. The value of the threshold voltage affects the detector efficiency and minimum detectable activity. When rays are incident at different positions of the large-area plastic, the photon collection efficiencies generated through collecting end pair differ, leading to differences in the detector efficiency. [Purpose] This study aims to explore appropriate threshold voltage to reduce the differences and maintain a low minimum detectable activity (MDA), hence achieving high detection efficiency for large-area plastic scintillator. [Methods] Firstly, an energy spectra acquisition system was designed using STM32F429 produced by STM semiconductor as the main control chip and a counter for detector efficiency testing of large-area plastic scintillator in size of 400 mm×300 mm×50 mm. Then, the reasonable threshold voltage was determined according to the background energy spectra of the large-area plastic scintillator, the energy spectrum of the ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs sources at different positions of the large-area plastic scintillator with acquisition time of 3 min, and signal-amplification relationship. [Results] The determined threshold voltage using above mentioned method for ⁶⁰Co source is 93.7 mV. To achieve high detector efficiency and low MDA for the large-area plastic scintillator, the best determined threshold voltage for ⁶⁰Co source is 95 mV. At this voltage, the detector efficiency for ⁶⁰Co source is 22%, the MDA is 78 Bq. [Conclusions] The proposed method has reference value for large-area plastic scintillation designing and manufacturing detectors.

国家自然科学基金(No.12227810)资助

第一作者: 陈久涛, 男, 1998年出生, 2021年毕业于东华理工大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核辐射探测技术

通信作者: 宋玉收, E-mail: yushousong@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2023-05-04, 修回日期: 2023-06-13

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12227810)

First author: CHEN Jiutao, male, born in 1998, graduated from East China University of Technology in 2021, master student, focusing on nuclear radiation detection technology

Corresponding author: SONG Yushou, E-mail: yushousong@hrbeu.edu.cn

Received date: 2023-05-04, revised date: 2023-06-13

Key words Plastic scintillator, Threshold voltage, Detector efficiency, Minimum detectable activity

塑料闪烁体的能谱没有全能峰,通常不用于光谱学研究,主要用于辐射水平计数。其具有衰减时间短、响应快、成本低等特点,常用于 γ 检测。大面积塑料闪烁体探测器应用广泛,在核电站等场所出入口的人员放射性监测、车辆污染监测、大型工具污染测量及反恐放射性测量等辐射仪器上普遍采用大面积塑料闪烁体^[1-2],用于鉴别物品是否存在放射性污染。通常采用塑料闪烁体与光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)组合的方式进行辐射探测^[3],塑料闪烁体在射线作用下发光,光子收集进入PMT收集,转换为电信号。信号进入后续处理电路中,处理电路包括信号放大电路和比较电路,最终将信号接入计数器,记录高于阈值电压的脉冲信号个数^[4],待后续相关研究。

大面积塑料闪烁体的尺寸比PMT光阴极尺寸大很多时,要实现对光子的有效收集和不同位置光子的收集效率一致性较好并不简单^[5-6]。由于收集端对不同位置光子的收集效率不同,导致入射在不同位置的射线最终在PMT阳极输出的信号的大小也不同。当阈值电压确定时,由于入射在大面积塑料闪烁体不同位置的射线产生的信号大小不同,存在探测效率一致性差异。

大面积塑料闪烁体探测器对不同位置(特别是远离收集端)入射的射线有效探测的同时,减小不同位置探测效率一致性差异,尽可能降低探测器的最小可探测活度,选取合适的阈值电压,成为有待研究的问题。

本文采用大面积塑料闪烁体探测器模块,利用CAEN DT5742数字化仪,采集了本底信号和 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 源在大面积塑料闪烁体不同位置的信号,通过峰值提取算法得到本底能谱和 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 源在大面积塑料闪烁体不同位置的能谱,对探测器进行了康普顿边缘(Compton Edge, CE)能量刻度^[7],根据本底能谱与 ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体不同位置下的能谱,结合处理电路的信号放大关系确定了合适阈值电压。基于单片机设计了一套计数器系统,研究了在不同阈值电压下, ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体不同位置的探测效率,和 ^{60}Co 、 ^{133}Ba 源在远离收集端的最小可探测活度的关系,结果证明了根据能谱信息和处理电路的信号放大关系计算出合适阈值电压的可行性。

1 实验方法

1.1 能谱采集

为确定合适的阈值电压,需要先获取大面积塑料闪烁体本底能谱和 ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体不同位置的能谱。

采用CAEN DT5742数字化仪,用于脉冲信号采集;采样率2.5 GHz,测量范围0~1 V,分辨率12 bits,采集范围偏置可调。采用的塑料闪烁体,衰减时间为2.5 ns,光产额为 $10\ 156\ \text{MeV}^{-1}$;大小为 $400\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$;PMT为北京滨松CR105型;实验所用放射源:放射源 ^{60}Co 的活度为7 100 Bq,放射源 ^{137}Cs 的活度为 3.3×10^5 Bq,放射源 ^{133}Ba 的活度为 2.6×10^5 Bq。将PMT阳极信号接入DT5742数字化仪采集通道,对本底和 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 源在大面积塑料闪烁体三个不同位置的信号进行采集。

将PMT阳极信号接入DT5742数字化仪采集通道,对本底和 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 源在大面积塑料闪烁体三个不同位置的信号进行采集。

本底及 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 源在大面积塑料闪烁体三个位置的信号, ^{133}Ba 源只采集了位置1处的信号,放射源信号的采集时间均为3 min。其中,采集放射源信号时,利用准直器进行准直,三个位置示意图如图1所示。

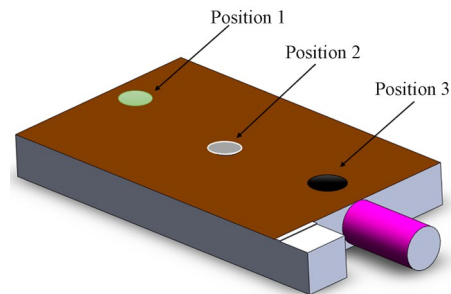


图1 检测位置示意图

Fig.1 Schematic of detection positions

位置1为远离收集端位置,位置2为探测器的中间位置,位置3靠近探测器收集端。考虑到DT5742数字化仪自身可能存在基线漂移、老化等原因,需要对DT5742数字化仪进行标定。

1.2 阈值电压确定

以 ^{60}Co 源数据为例,通过大面积塑料闪烁体本底能谱和 ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体三个不同位置的能谱,得到放大前的合适阈值电压,结合处理电路的信号放大关系,确定最终放大后的合适阈值电压。

处理电路由放大电路、滤波成型电路、电压比较电路和单稳态触发电路组成。其中,放大电路的作用是将大小相近的脉冲信号区分开,放大后的信号进入比较电路,与单片机数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)外设提供的比较电压进行比较,从而实现对放大后的信号过阈检测,这里的比较电压即为放大后的阈值电压。放大后的阈值电压大小由处理电路的放大关系和放大前的阈值电压确定。在放大电路中,电荷灵敏前置放大器的输出幅度 u_{sc} 表示为:

$$u_{sc} = -Ku_{sr} = \frac{-KQ}{C_i + (1 + K)C_f} \quad (1)$$

其中: K 为运算放大器开环增益; Q 为输入电荷量; C_f 为反馈电容; C_i 为电荷灵敏前置放大器输入端的等效电容; u_{sc} 为电荷灵敏前置放大器的输出电压幅度; u_{sr} 为电荷灵敏前置放大器的输入电压幅度。开环增益足够大时,放大器的输出基本不受探测器极间电容、放大器开环时输入电容和电压增益等参数的影响,稳定性高^[8-9],只与探测器的输出电荷 Q 和反馈电容 C_f 有关,最终输出电压^[10]可表示为:

$$u_{sc} = -\frac{Q}{C_f} \quad (2)$$

信号的电荷量 Q 与射线能量 E 成正比,当PMT输出的信号的脉冲宽度很小(塑料闪烁体的信号持续时间通常很短,在几十纳秒左右),且脉冲宽度和脉冲形状基本一致的情况下,脉冲信号的电荷量 Q 近似与脉冲幅度成正比。

为了进一步确定放大线性关系,对放大电路进行标定。先利用示波器观察塑料闪烁体探测器在有⁶⁰Co源条件下,阳极输出的脉冲信号的大小及形状,利用信号发生器,发出与大面积塑料闪烁体探测器脉冲宽度一致,大小不同,幅度在合理范围的脉冲信号,并接入处理电路,用示波器观察记录放大后信号的大小,得到处理电路的信号放大关系,即放大前的阈值电压与经放大后的阈值电压关系。

1.3 信号计数

为了研究在不同阈值电压下的大面积塑料闪烁体的探测效率,设计了一套计数系统,采用意法半导体生产的STM32F429为主控芯片,用作计数器。

塑料闪烁体探测器PMT阳极输出的脉冲信号经过处理电路,最终生成3.3 V、脉宽为10 μ s的TTL信号,将TTL信号接入单片机的IO口,进行脉冲计数,并在LCD屏上显示计数率。以在位置2的⁶⁰Co源计数实验为例,计数系统如图2所示。

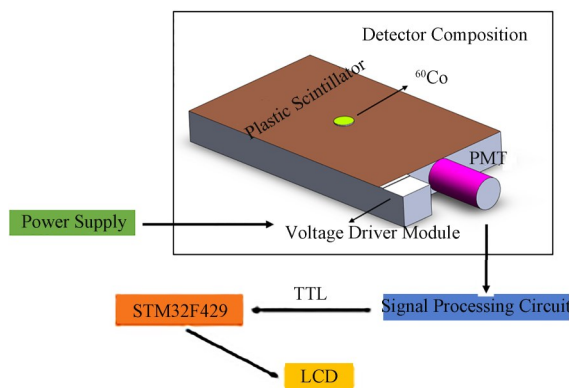


图2 计数系统示意图
Fig.2 Schematic of counting system

1.4 最小可探测活度

最小可探测活度(Minimum Detectable Activity, MDA)计算公式采用国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)标准^[11-13],计算式为:

$$MDA = \frac{k^2 + 2k \sqrt{n_b t_s (1 + \frac{t_s}{t_b})}}{F t_s} \quad (3)$$

式中: k 为标准正态分布单边置信因子($k_\alpha = k_\beta$); α 通常取0.05, k 取1.645; n_b 为本底计数率; t_s 为测量样品时间10 s; t_b 为测量本底时间60 s; F 为探测器校准因子,即单位放射源单位放射性活度在探测器中产生的计数率 $\text{counts} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 能量刻度

探测器需要进行能量刻度。以⁶⁰Co、¹³⁷Cs源在大面积塑料闪烁体位置1的能谱为例,进行康普顿边缘能量刻度^[7],其中,采集的单个脉冲信号如图3所示。

信号脉冲宽度,包括PMT上升时间、分压器输

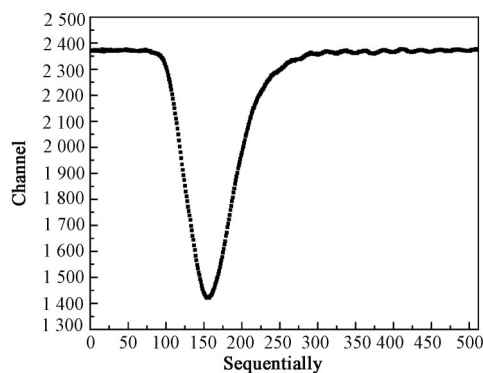


图3 塑料闪烁体单个脉冲信号
Fig.3 Single pulse signal of plastic scintillator

出RC时间常数、渡越时间和下降时间的贡献^[14]。康普顿边缘的能量 $E_{e\max}$ ^[15]计算式表示为:

$$E_{e\max} = E_{\gamma} \left(\frac{\frac{2E_{\gamma}}{m_0c^2}}{1 + \frac{2E_{\gamma}}{m_0c^2}} \right) \quad (4)$$

式中: E_{γ} 为 γ 射线能量; m_0c^2 是电子静止质量,康普顿边缘对应道址^[16]计算式表示为:

$$n_c = n_p + 1.17\sigma \quad (5)$$

式中: n_c 为康普顿边缘对应道数值; n_p 为高斯拟合后的康普顿峰值对应的道址; σ 为高斯拟合后的标准偏差。拟合结果如图4所示。

根据图4(a)高斯拟合结果 $n_p=197$; $\sigma=58.6$,由式(5)计算得出康普顿边缘的道址为265道,康普顿边缘的能量为1.038 MeV(其中 ^{60}Co 源发射的 γ 射线能量取 $E_{\gamma}=1.25$ MeV);根据图4(b)高斯拟合结果 $n_p=94$; $\sigma=68.2$,由式(5)计算得出康普顿边缘的道址为173道,康普顿边缘的能量为0.476 MeV(其中 ^{60}Co 源发射的 γ 射线能量取 $E_{\gamma}=0.662$ MeV)。对其进行能量刻度有:

$$E = 0.0061 \times ch - 0.58 \quad (6)$$

2.2 能谱与阈值电压

利用DT5742数字化仪采集了大面积塑料闪烁体本底和 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 源在大面积塑料闪烁体三个不同位置的信号,采用脉冲幅度提取算法,绘制大面积塑料闪烁体本底能谱和 ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体三个位置的能谱,如图5所示。

由图5(a)可知, ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体位置1与位置2能谱形状基本一致,但位置2能谱的康普顿峰所在位置略微大于位置1能谱的康普顿峰的位置;在300~600道内,由于位置3靠近收集端,产生计数的信号大小理论更大,单个信号收集到的光子数理论上高于位置1和位置2,所以位置3的能谱计

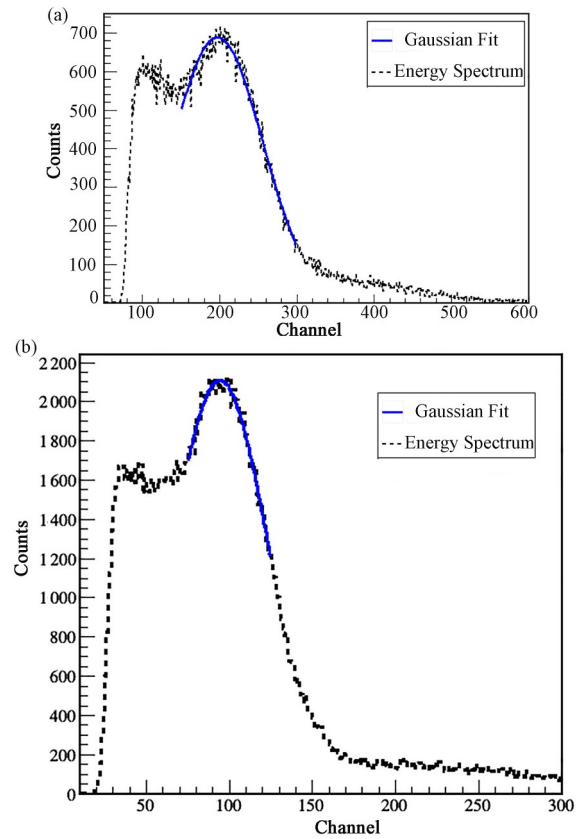


图4 放射源在大面积塑料闪烁体位置1能谱拟合示意图 (a) ^{60}Co , (b) ^{137}Cs

Fig.4 Energy spectrum fitting curve for source in large-area plastic scintillator at position 1 (a) ^{60}Co , (b) ^{137}Cs

数在300~600道内,高于其余两处位置。

由图4(b)可知, ^{137}Cs 源在大面积塑料闪烁体不同位置能谱图测试结果与 ^{60}Co 源类似。 ^{137}Cs 源在位置1能谱与位置2能谱形状基本一致,位置2能谱的康普顿峰所在位置略微大于位置1能谱的康普顿峰的位置;在125~200道内,由于位置3靠近收集端,产生计数的信号大小理论更大,单个信号收集到的光子数理论上高于位置1和位置2,位置3的能谱计数也高于其余两处位置。需要注意的是在150~350道

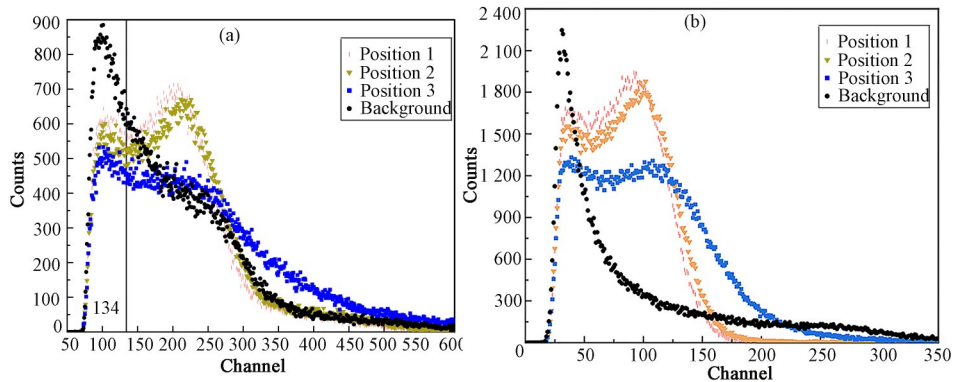


图5 大面积塑料闪烁体本底能谱和放射源在大面积塑料闪烁体不同位置下的能谱 (a) ^{60}Co , (b) ^{137}Cs

Fig.5 Background and source energy spectrum for different position of large area plastic scintillator (a) ^{60}Co , (b) ^{137}Cs

内,本底计数高于¹³⁷Cs源在不同位置的计数,这是由于测量时间不同所导致的,本底测量时间大于¹³⁷Cs源的测量时间。

以⁶⁰Co源实验数据为例,根据大面积塑料闪烁体本底能谱和⁶⁰Co源在大面积塑料闪烁体不同位置的能谱,确定合适的阈值电压。由图5可知,随着道址的增加,本底能谱计数整体呈下降趋势,⁶⁰Co源在大面积塑料闪烁体三个不同位置的能谱计数,呈现先下降后上升再下降的趋势,其中能谱计数上升这是由⁶⁰Co源发出的 γ 射线贡献所导致的,以134道为例,⁶⁰Co源在大面积塑料闪烁体三个位置的能谱计数从134道后开始上升,根据DT5742数字化仪标定的结果,计算出134道对应的放大前的合适阈值电压为34.5 mV。

由能谱信息计算得到的放大前的合适阈值电压,根据处理电路信号放大关系,确定最终的放大后的合适阈值电压。

根据信号发生器发出的不同大小的脉冲信号与经过放大电路后示波器输出的对应脉冲信号的大小关系,绘制放大线性关系曲线如图6所示。

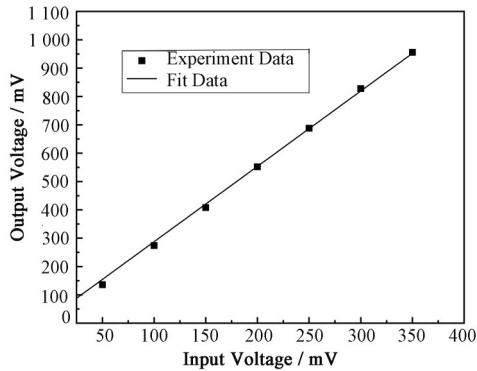


图6 信号放大线性关系
Fig.6 Signal-amplification linear relationship

拟合曲线, $R^2=0.999$, 结果表明,放大电路有很好的信号线性放大关系,可表示为:

$$V_{out} = 2.75V_{in} - 1.3 \quad (7)$$

式中: V_{in} 为放大前的阈值电压; V_{out} 为放大后的阈值电压。

根据式(7),即放大前的阈值电压 V_{in} 与放大后的阈值电压 V_{out} 的线性关系,由放大前的合适阈值电压34.5 mV计算最终放大后的合适阈值电压为93.7 mV。

2.3 探测效率与阈值电压

大面积塑料闪烁体的阈值电压设置过高,射线入射在远离收集端时,由于远离收集端对光子收集效率相对较低,导致信号幅度低于阈值电压,造成漏

计数,导致探测器的探测效率降低^[17];阈值电压设置过低时,提高了远离收集端的探测效率,同时提高了本底计数,导致本底标准差变大,提高最小可探测活度,影响探测下限。

利用单片机DAC发出稳定的电压接入比较器中,即放大后的阈值电压。分别将⁶⁰Co源放置在大面积塑料闪烁体三个不同位置,在不同的阈值电压下,利用计数器,进行计数实验。得到⁶⁰Co源在大面积塑料闪烁体不同位置,不同阈值电压下的探测效率的关系曲线,如图7所示。

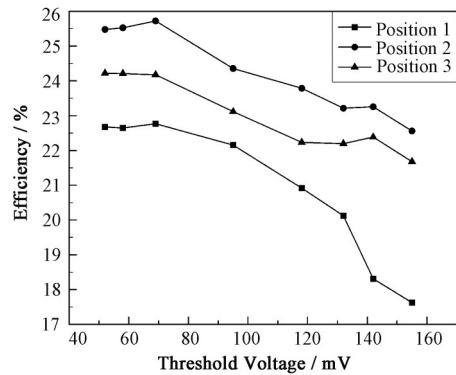


图7 ⁶⁰Co源在大面积塑料闪烁体不同位置下阈值电压与探测效率关系

Fig.7 Relationship between the threshold voltage and detector efficiency for the ⁶⁰Co source at different positions of the large-area plastic scintillator

分析:当阈值电压设置在50~100 mV范围时,⁶⁰Co源在大面积塑料闪烁体三个位置的探测效率之间相差较小,探测效率一致性较好;阈值电压在100~160 mV范围内时,三个位置的探测效率逐渐降低,这是由于脉冲信号小于阈值电压导致计数降低,且⁶⁰Co源在位置1与在其余两个位置的探测效率偏差逐渐变大,这是位置1远离收集端,导致的探测效率低,且阈值设置偏高所导致的。表明此时探测效率均匀性较差。且对位置1的影响变化最为明显。

结果表明:不同阈值电压下,⁶⁰Co源在位置2的探测效率最高。这是由于位置3靠近收集端,入射在该区域的 γ 射线,在收集端的附近产生的光子,经过反射,反而远离收集端,导致没有被计数所导致的。位置2为闪烁体的中心位置,入射的 γ 射线在中心位置产生的光子,经过反射,最终进入收集端。位置1由于远离收集端,光子部分损失在塑料闪烁体中,综合以上因素,最终导致⁶⁰Co源在大面积塑料闪烁体位置2的探测效率最好,这一结果与探测器的结构设计有关。

2.4 MDA与阈值电压

由前面分析可知,阈值电压应设置在50~100 mV范围内,此时大面积塑料闪烁体的探测效率

一致性较好, ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体位置1有较高的探测效率。为进一步确定合适阈值电压,下面研究不同阈值电压下, ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体位置1的MDA和探测效率关系,寻找满足较低MDA,较高探测效率对应的阈值电压。 ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体位置1时,不同阈值电压与 ^{60}Co 源在位置1的MDA关系如图8所示。

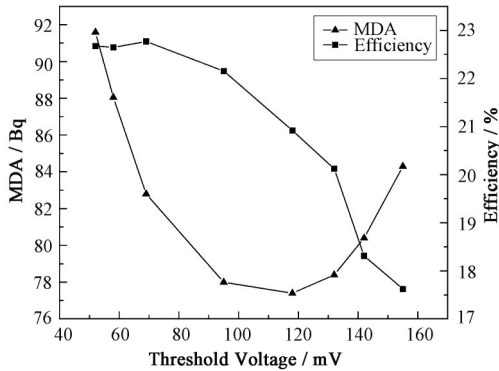


图8 阈值电压与MDA和效率的关系
Fig.8 Relationship between threshold voltage and MDA and efficiency

分析:当阈值电压较小时, ^{60}Co 源在位置1的探测效率处于饱和,随着阈值电压升高,探测效率逐渐降低,是由于部分 ^{60}Co 源的 γ 射线产生的信号较小,部分信号没有过阈造成漏计数,导致探测效率降低。

MDA呈现先下降后上升的趋势。下降是由于随着阈值电压的上升,产生计数的信号更大,低本底和电子学噪声的计数减少,本底的标准差变小,导致MDA变小;上升是因为当阈值电压过高时,降低了低本底和电子学噪声计数的同时,部分较小的辐射信号计数也降低了,减小了探测效率,导致MDA升高。

根据图8的实验结果,阈值电压在95 mV附近时, ^{60}Co 源在位置1的探测效率较好,MDA较低,说明95 mV为合适阈值电压。通过大面积塑料闪烁体本底能谱和 ^{60}Co 源在不同位置能谱和电路放大关系得出的合适阈值电压为93.7 mV,二者相对误差小于2%。综上所述,通过对比本底能谱与 ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体不同位置的能谱和电路放大关系,确定合适阈值电压的方法具有一定的可行性。

此外,在不同阈值电压下,得到了大面积塑料闪烁体探测器对 ^{133}Ba 源在位置1时,与MDA和探测效率的关系,如图9所示。

由图9结果可知, ^{133}Ba 源在大面积塑料体位置1时,随着阈值电压的提升,MDA逐渐上升,探测效率逐渐降低,这是由于 ^{133}Ba 源放出的 γ 射线能量低,在该实验背景下,产生的信号小导致的,阈值电压设置

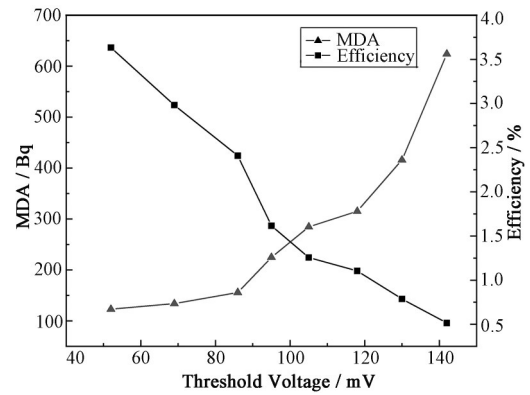


图9 ^{133}Ba 源阈值电压与MDA和效率的关系
Fig.9 Relationship between threshold voltage and MDA and efficiency for ^{133}Ba source

的值高于有效信号的幅度大小,所以没有观察到MDA先下降后上升的变化趋势,这是由于探测器和电路本身所造成的,也是实验的不足之一,没有在较低阈值电压下,进行相关的实验测试(实验采用的最低阈值电压为52 mV)。

3 结语

大面积塑料闪烁体过阈检测计数中,通过对比本底能谱和 ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体不同位置的能谱,结合处理电路的信号放大关系,确定了合适阈值电压为93.7 mV。研究了在不同阈值电压下, ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体不同位置下的探测效率和最小可探测活度的关系,根据结果,确定出合适阈值电压95 mV,二者相对误差较小,证明了通过能谱信息和处理电路放大关系获取的阈值电压的可行性,在该阈值电压下, ^{60}Co 源在大面积塑料闪烁体不同位置下的探测效率一致性较好,在远离收集端具有较低的最小可探测活度,实验具有一定的参考价值。

作者贡献声明 陈久涛负责论文的总研究,论文的编写和修订;宋玉收负责指导实验,指导论文的编写以及提供实验设备;许蕤负责设计、提供实验所需的电子学器件;宋润州负责搭建实验平台,参与实验;陈声强负责指导电子学设计。

参考文献

- 刘正山, 杜向阳, 邓长明, 等. 大面积塑料闪烁体在全身 γ 污染监测仪中的应用[C]//中国核学会. 第十四届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集. 2008: 119-122.
LIU Zhengshan, DU Xiangyang, DENG Changming, et al. Design and application of large area plastic scintillation detector in whole-body gamma portal monitor whole-body[C]//China Nuclear Society.

- Proceedings of the 14th National Academic Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology. 2008: 119–122.
- 2 Seydaliev M, Li L Q, Bentoumi G, *et al.* Dual-panel polyvinyl toluene scintillator application as a radiation portal monitor device for gamma and neutron detection [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, **1049**: 168131. DOI: [10.1016/j.nima.2023.168131](https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168131).
- 3 杜俊涛, 花锋, 刘进辉, 等. 大面积塑料闪烁 γ 放射性探测系统设计[J]. 核电子学与探测技术, 2020, **40**(2): 260 – 264.
DU Juntao, HUA Feng, LIU Jinhui, *et al.* The design of large area plastic scintillation detection system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2020, **40** (2): 260 – 264.
- 4 Thakur V M, Jain A, Ashokkumar P, *et al.* Design and development of a plastic scintillator based whole body β/γ contamination monitoring system[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(5): 47. DOI: [10.1007/s41365-021-00883-1](https://doi.org/10.1007/s41365-021-00883-1).
- 5 樊淋, 李延国, 季建峰. 大面积塑料闪烁体中荧光光子收集研究[J]. 核电子学与探测技术, 2003, **23**(2): 117 – 120. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2003.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2003.02.006).
FAN Lin, LI Yanguo, JI Jianfeng. A study of photons collection in plastic scintillation[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, **23**(2): 117 – 120. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2003.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2003.02.006).
- 6 陈映宣, 姜印琳, 任国孝, 等. 大面积闪烁计数器的性能[J]. 高能物理与核物理, 1980, **4**(6): 683 – 688.
CHEN Yingxuan, JIANG Yinlin, REN Guoxiao, *et al.* Performance of the large area plastic scintillation counter [J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1980, **4**(6): 683 – 688.
- 7 常乐, 刘应都, 杜龙, 等. EJ301 液体闪烁体探测器的波形甄别和能量刻度[J]. 核技术, 2015, **38**(2): 020501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020501](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020501).
CHANG Le, LIU Yingdu, DU Long, *et al.* Pulse shape discrimination and energy calibration of EJ301 liquid scintillation detector[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(2): 020501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020501](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020501).
- 8 魏海鹏, 廖西征, 王浩, 等. 小尺寸电荷灵敏前置放大器[J]. 核技术, 2003, **26**(1): 86 – 88.
WEI Haipeng, LIAO Xizheng, WANG Hao, *et al.* A charge-sensitive micropreamplifier[J]. Nuclear Techniques, 2003, **26**(1): 86 – 88.
- 9 陈波, 刘松秋, 薛志华, 等. 低噪声电荷灵敏前置放大器的噪声分析[J]. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(3): 612 – 614, 626. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.041).
CHEN Bo, LIU Songqiu, XUE Zhihua, *et al.* Noise analysis of a low noise charge sensitive preamplifier[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **28** (3): 612 – 614, 626. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.041).
- 10 霍雷, 冯启春, 马永和. 核电子学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
HUO Lei, FENG Qichun, MA Yonghe. Nuclear electronics foundation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2022.
- 11 Chevalier C, Gustafsson M, Isigure N, *et al.* Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides [M]. IAEA Safety Standard Series. Vienna: IAEA, 1999.
- 12 Strom D J, Stansbury P S. Minimum detectable activity when background is counted longer than the sample[J]. Health Physics, 1992, **63**(3): 360 – 361. DOI: [10.1097/00004032-199209000-00016](https://doi.org/10.1097/00004032-199209000-00016).
- 13 Done L, Ioan M R. Minimum detectable activity in gamma spectrometry and its use in low level activity measurements[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2016, **114**: 28 – 32. DOI: [10.1016/j.apradiso.2016.05.004](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.05.004).
- 14 郑志鹏, 杨春敏, 王孟奇, 等. 大面积塑料闪烁计数器的制备和测试[J]. 高能物理与核物理, 1981, **5**(5): 576 – 583.
ZHENG Zhipeng, YANG Chunmin, WANG Mengqi, *et al.* The manufacture and test of large area plastic scintillation counters[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1981, **5**(5): 576 – 583.
- 15 Knoll G F. Radiation detection and measurement[M]. 4th Ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2010.
- 16 Chikkur G C, Umakantha N. A new method of determining the Compton edge in liquid scintillators[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1973, **107**(1): 201 – 202. DOI: [10.1016/0029-554X\(73\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0029-554X(73)90034-7).
- 17 曹琳, 亢武, 储诚胜, 等. 大面积塑料闪烁体 γ 探测技术研究[J]. 核电子学与探测技术, 2009, **29**(1): 52 – 54, 80. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2009.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2009.01.013).
CAO Lin, KANG Wu, CHU Chengsheng, *et al.* A study of large area rectangular plastic scintillator for detecting γ with high detection efficiency[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, **29**(1): 52 – 54, 80. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2009.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2009.01.013).