

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.05.019

便携式 α - β - γ 谱仪设计

刘怡文, 赵朝阳, 王玉东, 熊浩, 杨锋, 董春辉, 王忠海, 周荣, 杨朝文

(四川大学物理学院 辐射物理与技术教育部重点实验室, 成都 610064)

摘要: 现有便携式谱仪无法同时对 α - β - γ 射线进行测量, 这使得相关人员对 α - β - γ 混合场景的评估与处理存在不便, 因此我们研制了一套便携式 α - β - γ 谱仪以解决上述问题. 谱仪采用 PIPS 探测器和 LaBr₃(Ce) 探测器分别对 α - β 粒子和 γ 射线进行测量, 获取高分辨的能谱. 经测试, 谱仪的 α 能量分辨率小于 140 keV (5.486 MeV, 0.1 atm), α 表面发射率响应 67.34% (²⁴¹Am), β 表面发射率响应 19.13% (⁹⁰Sr-⁹⁰Y), γ 能量分辨率小于 3.4% (662 keV). 因此谱仪可同时测量 α - β - γ 射线并获取高分辨的能谱, 有助于相关人员对测量现场做出快速准确的评估与处理.

关键词: 便携式谱仪; PIPS 探测器; LaBr₃(Ce) 探测器

中图分类号: TL817+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2020)05-0947-06

Design of portable α - β - γ spectrometer

LIU Yi-Wen, ZHAO Chao-Yang, WANG Yu-Dong, XIONG Hao, YANG Feng,
DONG Chun-Hui, WANG Zhong-Hai, ZHOU Rong, YANG Chao-Wen

(Key Laboratory of Radiation Physics and Technology, Ministry of Education,
College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The existing portable spectrometer cannot measure the α - β - γ ray at the same time, which makes the evaluation and processing of the α - β - γ mixed scene inconvenient, so a portable α - β - γ spectrometer is developed to solve the problem. The spectrometer uses a PIPS detector and a LaBr₃(Ce) detector to measure α - β particles and γ -rays, respectively, to obtain a high-resolution energy spectrum. The main properties of the spectrometer such as α energy resolution, α / β surface emissivity response, γ energy resolution and temperature stability were tested. The α energy resolution is less than 140 keV (5.486 meV, 0.1 atm), surface emissivity response of α particles is 67.34% (²⁴¹Am), surface emissivity response of β particles is 19.13% (⁹⁰Sr-⁹⁰Y), and γ energy resolution is less than 3.4% (662 keV). Therefore, the spectrometer can simultaneously measure the α - β - γ rays and obtain the high resolution energy spectrum, which is helpful for the related personnel to make rapid and accurate evaluation and treatment of the measurement site.

Keywords: Portable spectrometer; PIPS detector; LaBr₃(Ce) detector

收稿日期: 2019-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(11475121)

作者简介: 刘怡文(1993-), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 主要研究领域为核电子学.

通讯作者: 王忠海. E-mail: zhonghaiwang@scu.edu.cn

1 引言

在辐射环境监测和核安全排查等领域,放射性核素的现场化分析有助于相关人员对事故现场进行快速且准确的评估,对于现场的应急响应和处理具有重大意义^[1]. 便携式谱仪因为可以对放射性核素进行现场化的定量与定性分析而被广泛应用于上述领域. 目前常见的便携式谱仪以 γ 谱仪为主,可用于 γ 剂量率和 γ 能谱的测量. 对于 α - β 粒子的测量,目前常用的便携式仪器为 α - β 表面沾染仪,主要基于 ZnS(Ag)复合闪烁体探测器,该类仪器具有稳定可靠、成本低廉、使用方便的特点,但只可用于计数测量以获取剂量率信息,无法对核素种类进行分析^[2]. 对于未知涉核物质的测量,分析其核素种类与获取其剂量率信息一样重要^[3]. 因此,近年来国内外也开展了关于便携式 α 谱仪的研究^[3-4]. 然而,上述便携式谱仪只可对 α - β 粒子或 γ 射线进行测量,对于一些同时具有 α - β 粒子和 γ 射线的环境监测^[5] 和应急事故场景^[6],现有便携式谱仪无法单独完成测量工作,需要多台设备同时使用,给相关工作人员做出快速准确的评估与处理带来不便.

本文设计了一种可测量 α - β - γ 射线的便携式谱仪. 该谱仪采用 PIPS 探测器对 α - β 粒子进行测量以获得高分辨的 α - β 能谱,采用 LaBr₃(Ce)探测器对 γ 射线进行测量以获得高分辨的 γ 能谱. 它能够同时测量 α - β - γ 射线并获取高分辨的能谱,有助于相关人员对测量现场做出快速准确的评估与处理.

2 系统设计方案

谱仪由 6 个功能模块构成(见图 1). 其中核信号获取模块由两路探测器构成,分别对 α - β 粒子和 γ 射线进行测量. 信号调理模块用以对探测器输入信号进行幅度调节,以使其匹配后续模数转换模块. 模数转换模块通过高速 ADC 对信号进行采样,将模拟信号转换为数字信号后输出到信号处理模块. 信号处理模块使用 FPGA 对数字化的信号进行处理与分析以得到实时能谱,并将其传输至控制模块. 控制模块通过对外设进行控制以实现谱仪系统的便携式功能. 此外电源模块用以给电路和探测器供电,以使其正常工作. 其中程控的 LaBr₃(Ce)探测器高压模块和控制模块共同构成了稳谱系统,使得谱仪具有良好的温度稳定性.

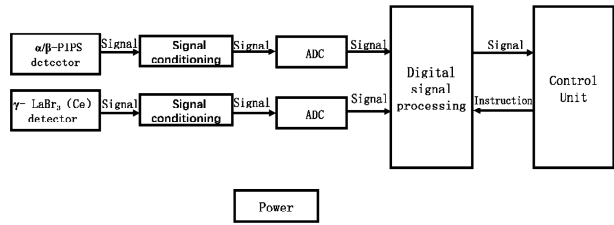


图 1 便携式谱仪功能框图

Fig. 1 Functional block diagram of portable spectrometer

2.1 核信号获取模块设计

2.1.1 α - β 探测器选型 ZnS(Ag)复合闪烁体探测器是最为常见的 α - β 表面沾染仪探头,该探测器具有良好的探测效率和较大的灵敏面积,但因其能量分辨率较差通常只用于计数测量. 金硅面垒探测器和 PIPS 探测器均具有高能量分辨率的特性,是最为常见的 α - β 谱仪探头. 相较金硅面垒探测器,PIPS 探测器具有良好的温度稳定性和可清洗的特性. 因此,选用 PIPS 探测器作为谱仪的 α - β 探测器,探测器的灵敏面积为 1 200 mm²,最大厚度为 325 μ m.

2.1.2 γ 探测器选型 NaI(Tl)探测器具有宽测量范围和低造价的特性是最为常见的便携式 γ 谱仪探头. 但由于其能量分辨率较差,因此不适用于复杂情况下的核素识别. CZT 探测器具有良好的能量分辨率,但受限于体积,其对高能 γ 的探测效率较低,因此多用于核医学,工业 CT 和宇宙线测量等中低能 γ 射线测量场景^[7]. 相较 NaI(Tl)探测器,LaBr₃(Ce)探测器具有良好的能量分辨率,可用于复杂环境下的核素识别. 此外由于其对高能 γ 射线的探测效率远高于 CZT 探测器,因此选用 LaBr₃(Ce)探测器作为本谱仪的 γ 探测器,晶体的尺寸为 ϕ 38 mm \times 38 mm.

2.2 信号调理电路设计

因探测器种类、入射粒子能量以及前放电路的不同,探测器前放输出的信号幅度范围可由几毫伏至几伏. 然而高速模数转换器(ADC)的量程通常不超过 2 V,因此需对探测器前放电路输出的信号进行幅度调理,使调理后的信号范围与高速 ADC 的量程相匹配. 谱仪系统的信号调理电路由两级构成,第一级为可变增益放大器 AD605,通过该放大器对探测器前放电路输出的单端信号进行幅度调节,使其输出信号范围与高速 ADC 的量程相匹配. 此外,由于电路中高性能 ADC 通常使用差分输入抑制共模噪声和干扰^[8],因此在第二级使用

ADA4932 作为单倍增益 ADC 驱动器, 将单端信号转换为差分信号后, 再将其输入到 ADC 以获得最佳性能。

2.3 模数转换电路设计

对于 PIPS 探测器, 其输出信号的上升时间受偏压和入射粒子种类的影响。由于本谱仪为 PIPS 探测器所供高压是一定值, 因此输出信号的上升时间由入射粒子种类决定。通常情况下, α 粒子所产生信号的上升时间为 40~75 ns, β 粒子所产生信号的上升时间为 90~120 ns^[9]。根据经验公式(1)计算可知 PIPS 探测器输出信号带宽约为 2.91~8.75 MHz, 因此依据奈奎斯特采样定理, 对于谱仪系统的 $\alpha\beta$ 信号路, ADC 的最低采样频率为 17.5 MSPS。由于实际信号会受噪声影响, 为获得较佳信噪比, 选用 100 MSPS 采样频率对 PIPS 探测器输出信号进行过采样。

$$BW = \frac{0.35}{RT} \quad (1)$$

式中, BW 为信号带宽; RT 为信号 10%~90% 的上升边。

通常认为 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 晶体的发光衰减为 20~35 ns^[10], 因此 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器输出信号带宽约为 10~17.5 MHz。为获得较佳信噪比, 亦采用 100 MSPS 采样频率对 γ 信号进行过采样。

为了不使系统能量分辨率变差, 通常峰的半高宽度应取 5~10 道^[11]。因此综合探测器的能量分辨率和测量范围进行考虑, 选用 ADI 公司的 12 bit 低功耗高速 ADC AD9230 以 100 MSPS 采样频率对两路探测器的输出信号进行采样。

2.4 信号处理电路设计

现场可编程门阵列 (FPGA) 是信号处理电路的核心部件, 主要负责对 ADC 输入波形进行处理并得到能谱。本谱仪电路的 FPGA 程序由滤波成型, 动态基线获取, 过阈触发, 峰值获取, 能谱统计和数据通信六个功能模块构成。FPGA 程序首先使用滤波成型模块对 ADC 输入数据进行处理, 然后通过动态基线获取模块得到实时基线, 以此避免因电子学基线的温度效应所带来的谱漂。接着过阈触发模块和峰值获取分别用于甄别有效信号和提取有效信号的峰值信息。最后使用能谱统计模块对获取的峰值信息进行统计以得到能谱, 并使用数据通信模块将实时能谱传输给 MCU。

2.5 谱仪控制电路设计

谱仪系统的控制部分由微控制单元 (MCU) 和

外设构成, 通过 MCU 对外设进行控制, 以实现谱仪系统的便携式功能。MCU 程序包含温度测量, 能谱存储, 上位机通讯和人机交互四个功能模块。其中温度测量模块用于对 γ 能谱进行稳谱。使用靠近 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器的温度芯片对 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器光电倍增管的温度进行监测, 当温度发生较大变化时 (大于 0.5 °C), 通过调节高压使光电倍增管增益恒定, 从而实现实时稳谱。能谱存储模块用于存储仪器所测量的能谱, 用户可通过上位机程序将存储的能谱读回。上位机通讯模块则用于实现仪器与上位机之间的数据和指令通讯。人机交互模块由按键和屏幕构成, 用户可通过屏幕读取实时能谱, 并使用按键对仪器进行参数和状态设置。

2.6 电源电路设计

谱仪的电源电路用于给各芯片和探测器供电。由于模拟信号对噪声极为敏感, 因此使用具有超低输出噪声和宽频率范围内高 PSRR 特性的 LDO 芯片对模拟器件进行供电, 以获得最佳信噪比。DC-DC 芯片具有较高的效率和功率密度, 因此选用 DC-DC 芯片对噪声敏感度相对较低的数字器件进行供电, 以减小谱仪的发热和功耗。

相较实验室仪器, 便携式谱仪需工作在更宽的温度范围内且通常缺少标准放射源对其进行重新刻度。因此本谱仪系统设计了基于温度芯片和程控高压的稳谱模块以保证系统的温度稳定性。对于 PIPS 探测器, 由于其漏电流极低, 因此在 -20~50 °C 范围内, 温度的变化不会导致明显的峰漂移^[12], 故谱仪使用 70 V 的固定高压给 PIPS 探测器供电。

对于 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器, 由于其晶体具有良好的温度稳定性^[13], 因此光电倍增管的温度效应是导致峰漂移的主要因素。故对于 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器采用程控高压模块进行供电, 同时使用温度芯片对 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器光电倍增管的温度进行监测。当温度发生较大变化时, 通过谱仪控制电路对程控高压进行调节, 使光电倍增管增益为一定值, 从而实现稳谱。

3 系统技术指标

根据上述方案制作了便携式 $\alpha\beta\gamma$ 谱仪的原理样机如图 2 所示。原理样机的整机尺寸为 (长 × 厚 × 宽): 315 mm × 190 mm × 126 mm, 仪器重 2.098 kg。



图 2 便携式 α - β - γ 谱仪
Fig. 2 Portable α - β - γ spectrometer

3.1 α 能量分辨率

实验使用谱仪系统对²⁴¹Am 能谱进行测量, 所得能谱如图 3 所示. 通过计算得到其对于²⁴¹Am (5.486 MeV)的半高展宽为 138.87 keV.

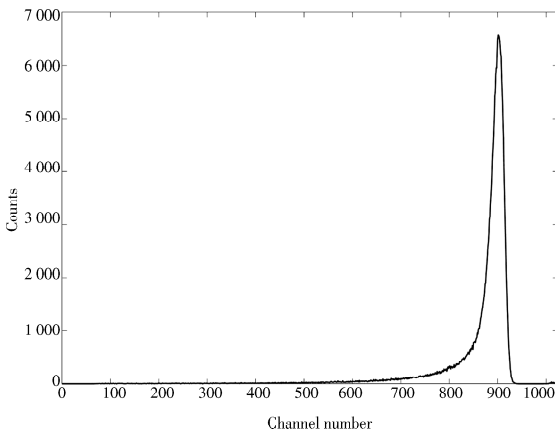


图 3 真空中的²⁴¹Am能谱
Fig. 3 The energy spectrum of ²⁴¹Am in vacuum

3.2 α / β 表面发射率响应

实验分别使用²⁴¹Am 源(α 源)和⁹⁰Sr-⁹⁰Y 源(β 源)在空气中对谱仪的 α / β 表面发射率响应进行测试. 测试所用²⁴¹Am 源为标准平面源, 放射源直径为 90 mm, 活度为 $1.3 \times 10^6 / (\text{min} \cdot 2\pi\text{sr})$, 测试时放射源距 PIPS 探测器窗 5mm. 测试所用⁹⁰Sr-⁹⁰Y 源为标准平面源, 放射源面积为 $140 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 活度为 $1.66 \times 10^7 / (\text{min} \cdot 2\pi\text{sr})$, 测试时放射源距 PIPS 探测器窗 5 mm.

表 1 α / β 表面发射率响应

Tab. 1 The surface emissivity responses of α and β

	本底	α 源(²⁴¹ Am)	β 源(⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y)
平均计数率/(次/min)	4.60	165 120	272 210
相对标准偏差/%	—	0.29	0.74
最大相对误差/%	—	0.35	1.29
表面发射率响应/%	—	67.34	19.13

3.3 α / β 串道率

α / β 的串道会影响样品的放射性测量结果, 特别是对低活度的环境样品进行测量时, 影响会更加明显. 本实验使用²⁴¹Am α 源和⁹⁰Sr-⁹⁰Y β 源在真空中(0.1 atm)对谱仪的 α / β 串道率进行测试. 如图 4 所示为真空中的 α 谱和 β 谱.

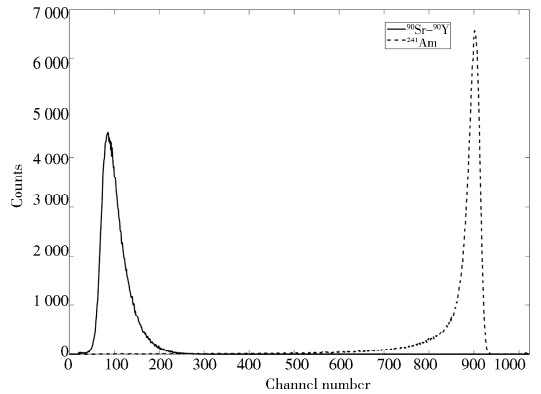


图 4 真空中的²⁴¹Am 和⁹⁰Sr-⁹⁰Y 能谱
Fig. 4 The energy spectrum of ²⁴¹Am and ⁹⁰Sr-⁹⁰Y in vacuum

选择 300 道作为 α 和 β 道的分界线, 得到真空中 α 粒子对 β 道串道率为 0.510%, β 粒子对 α 道串道率为 0.047%.

3.4 γ 能谱的测量范围

实验通过测量¹³⁷Cs 源能谱验证谱仪的 γ 能量测量下限, 所测能谱如图 5 所示.

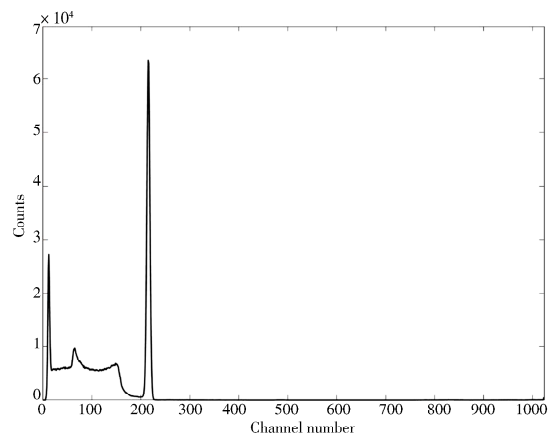


图 5 γ 能量测量下限
Fig. 5 The lower limit of γ energy measurement

图 5 中最左侧的尖峰为¹³⁷Cs 的特征 X 射线峰, 能量为 32.19 keV. 因此谱仪的 γ 能量测量下限为 30 keV.

由于实验室常用 γ 源的最高能量为 1.33 MeV(⁶⁰Co), 因此使用能量刻度的方法确定谱仪 γ

能量测量上限. 实验通过¹³⁷Cs、⁶⁰Co 源对谱仪进行标定,各全能峰对应道数如表 2 所示.

表 2 全能峰峰位道址

Tab. 2 Full energy peaks corresponding to the number of channels

核素	能量/keV	道址/道
¹³⁷ Cs	661.6	215.0
⁶⁰ Co	1 173.2	382.3
⁶⁰ Co	1 332.5	436.5

使用表 2 数据进行线性拟合得到谱仪系统的 γ 能量道数关系式:

$$y = 3.04x + 9.64 \quad (2)$$

式中 x 为道数, y 为能量, 由于谱仪系统为 1 024 道, 因此本谱仪的 γ 测量上限为 3 122.60 keV. 谱仪系统的 γ 能量测量范围为 30 keV~3 MeV.

3.5 γ 能量分辨率

使用谱仪测量¹³⁷Cs 能谱, 通过计算得到谱仪的能量分辨率(662 keV)如表 3 所示, 由表 3 可知谱仪的 γ 能量分辨率小于 3.4%(662 keV).

表 3 谱仪系统 γ 能量分辨率

Tab. 3 Gamma energy resolutions

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
能量/keV	661.66	661.66	661.66	661.66	661.66
道址/道	214.70	214.70	214.70	214.70	214.80
半高宽/道	7.21	7.21	7.17	7.24	7.26
分辨率/%	3.36	3.36	3.34	3.37	3.38

3.6 γ 能谱温度稳定性

在-10~40 °C 温度范围内, 分别使用稳谱后的谱仪系统和未稳谱的谱仪系统测量了⁶⁰Co 能谱. 图 6 和图 7 分别为⁶⁰Co 两个全能峰峰位道数在稳谱前后的对比.

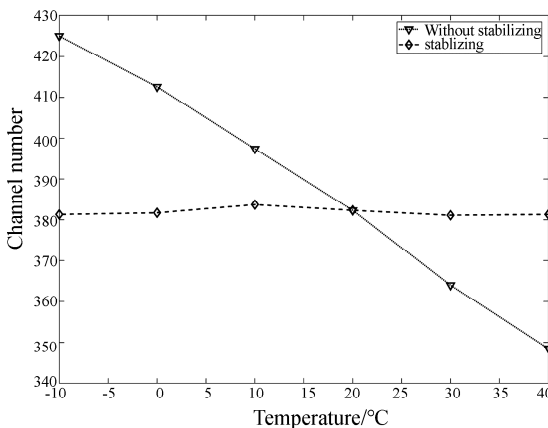


图 6 稳谱前后 1 173 keV 峰位变化

Fig. 6 The change of 1 173 keV with and without stabilizing method

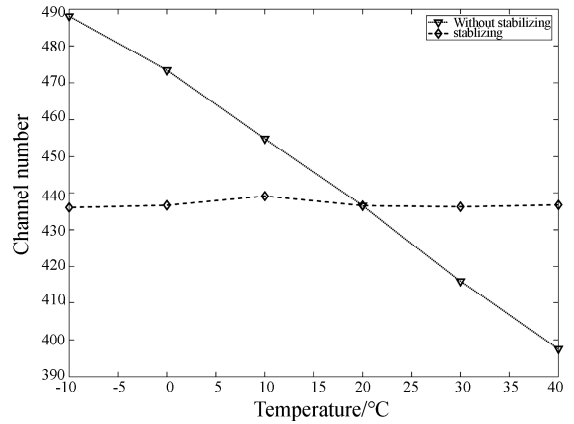


图 7 稳谱前后 1 332 keV 峰位变化

Fig. 7 The change of 1 332 keV with and without stabilizing method

由图 6 和图 7 可见, 未稳谱时⁶⁰Co 全能峰的峰位变化可达 90 道. 采用稳谱方法后, 峰位变化最大为 3 道, 因此稳谱后的谱仪具有较好的温度稳定性.

4 总 结

本文设计了一种可测量 $\alpha\beta\gamma$ 射线的便携式谱仪系统, 并对其性能进行了测试. 对于 $\alpha\beta$ 粒子的测量, 谱仪系统的 α 能量分辨率小于 140 keV (5.486 MeV, 0.1 atm), α 粒子串 β 道的串道率为 0.510% (²⁴¹Am), β 粒子串 α 道的串道率为 0.047% (⁹⁰Sr-⁹⁰Y), α 表面发射率响应为 67.34% (²⁴¹Am), β 表面发射率响应为 19.13% (⁹⁰Sr-⁹⁰Y). 对于 γ 射线的测量, 谱仪系统的 γ 测量范围为 30 keV~3 MeV, γ 能量分辨率小于 3.4% (662 keV). 此外, 基于探测器和电子学温度特性的无源稳谱设计使得谱仪在-10~40 °C 温度范围内具有良好的温度稳定性, 有利于温度剧烈变化情况下的能谱测量及后续的能谱分析. 相较于现有便携式谱仪, 本谱仪系统除可用于一般情况下的环境和放射性污染测量外, 对于福岛核电站泄漏这类复杂的突发事故场景, 谱仪可同时测量 $\alpha\beta\gamma$ 能谱的功能将有助于相关人员对此类场景进行快速且准确的评估.

参考文献:

[1] 陈亮. 核素识别算法及数字化能谱采集系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.

[2] 杨明太. α 粒子测量仪器现状与发展趋势[J]. 电子学与探测技术, 2011, 31: 1198.

[3] Martín Sánchez A, de la Torre Pérez J. Portable al-

- pha spectrometer [J]. Appl Radiat Isotopes, 2012, 70: 2267.
- [4] 杨雪梅. 手持式 α 能谱仪的研制[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- [5] 周俊宇, 郭旭影, 林强. 四川省城市放射性废物库辐射环境监测与分析[J]. 环境与发展, 2017, 29: 181.
- [6] Morishita Y, Yamamoto S, Izaki K, *et al.* Optimization of thickness of GAGG scintillator for detecting an alpha particle emitter in a field of high beta and gamma background [J]. Radiat Meas, 2018, 112: 1.
- [7] 查钢强, 王涛, 徐亚东, 等. 新型 CZT 半导体 X 射线和 γ 射线探测器研制与应用展望[J]. 物理, 2013, 12: 862.
- [8] Ardizzoni J, Pearson J. "Rules of the road" for high-speed differential adc drivers [R/OL]. [2019-03-01]. <https://www.analog.com/en/analog-dia->logue/articles/rules-for-high-speed-differential-adc-drivers. html.
- [9] 田新, 肖云, 王善强, 等. α, β 粒子在钝化注入平面硅探测器中的脉冲形状分析[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31: 1255.
- [10] Iltis A, Mayhugh M R, Menge P, *et al.* Lanthanum halide scintillators: properties and applications [J]. Nucl Instrum Meth A, 2006, 563: 359.
- [11] 庞巨丰. γ 能谱数据分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1990: 205.
- [12] PIPS detectors [R/OL]. [2019-03-05]. https://mirion.s3.amazonaws.com/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/pips-detector_001.pdf?1541370197.
- [13] Moszynski M, Nassalski A, Syntfeld-Kazuch A, *et al.* Temperature dependences of LaBr₃(Ce), LaCl₃(Ce) and NaI(Tl) scintillators [J]. Nucl Instrum Meth A, 2006, 568: 739.

引用本文格式:

中文: 刘怡文, 赵朝阳, 王玉东, 等. 便携式 α - β - γ 谱仪设计[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 947.

英文: Liu Y W, Zhao C Y, Wang Y D, *et al.* Design of portable α - β - γ spectrometer [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2020, 57: 947.