

口袋式伽马能谱仪研制

李钰龙, 王忠海, 高 泰, 陈 琦, 赵倩儒, 董春辉, 周 荣, 杨朝文
(四川大学辐射物理与技术教育部重点实验室, 成都 610065)

摘 要: 便携式伽马能谱仪在野外探矿、环境辐射监测和科学实验等领域被广泛应用. 为了进一步缩小便携式能谱仪的体积, 提高其能谱性能, 从而扩展其应用领域, 本文基于最新的闪烁晶体材料、半导体光电转换器件和高性能微处理器, 开展了新一代便携式伽马能谱仪研究. 在探测器设计方面, 采用 GAGG:Ce 晶体耦合 SiPM 阵列成功设计并制作了高效率、高能量分辨率的紧凑型能谱探头; 在数据采集电路方面, 采用高性能 ARM 处理器及其自带 ADC 外设替代 FPGA+ADC 的传统电路架构, 并设计专用的信号处理 ARM 程序, 实现了在线能谱测量, 并极大的减小了电路尺寸和系统功耗. 综上所述, 本文基于 GAGG:Ce 晶体耦合 SiPM 并搭配 ARM 处理器, 成功研制了一款低成本、小体积、低功耗、高性能的口袋式能谱测量仪. 整个能谱仪的体积仅为 80 mm×40 mm×40 mm, 重量为 200 g; 经过实验测试, 能谱仪的工作功率为 481 mW, 能自带电池工作 26 小时; 能谱响应线性拟合优度为 0.996, 能量分辨率为 5.2 %(@662 keV).

关键词: 伽马能谱仪; GAGG; SiPM; ARM

中图分类号: TL817+.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.034001

Development of pocket energy spectrometer

LI Yu-Long, WANG Zhong-Hai, GAO Tai, CHEN Qi, ZHAO Qian-Ru,
DONG Chun-Hui, ZHOU Rong, YANG Chao-Wen

(Key Laboratory of Radiation Physics and Technology, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Portable gamma spectrometer is widely used in many fields, such as field prospecting, environmental radiation monitoring and scientific experiments. In order to further reduce the volume of portable energy spectrometer and improve its energy spectrum performance, so as to extend its application field. Based on the latest scintillation crystal materials, semiconductor photoelectric converters and high performance microprocessors, we have developed a new generation of portable gamma spectrometer. In terms of detector design, GAGG: Ce crystal coupled SIPM array is used to successfully design and manufacture a compact energy spectrum probe with high efficiency and high energy resolution; in terms of data acquisition circuit, high performance ARM processor and its own ADC peripheral are used to replace the traditional circuit architecture of FPGA + ADC, and a special signal processing ARM program is designed to realize online energy spectrum measurement, which greatly reduce the circuit Size and system power consumption. To sum up, based on GAGG: Ce crystal coupled SIPM and ARM processor, a pocket type energy spectrometer with low cost, small volume, low power consumption and high per-

收稿日期: 2020-03-03
基金项目: 国家自然科学基金(11575145); 四川省重点研究开发项目(2018GZ0524); 四川大学博士后基金(20826041C4158)
作者简介: 李钰龙(1994—), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向为辐射探测与信息获取. E-mail: 756505848@qq.com
通讯作者: 王忠海. E-mail: zhonghaiwang@scu.edu.cn

formance has been successfully developed. The volume of the whole spectrometer is only $80\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$, and the weight is 200 g. The tested power of the spectrometer is 481 mW, and it can work for 26 hours with its own power supply. The linear goodness of fit of the spectral response is 0.996, and the energy resolution is 5.2% (@ 662 keV).

Keywords: Gamma spectrometer; GAGG; SiPM; ARM

1 引言

便携式能谱仪在环境辐射监测^[1]、放射性活度鉴定^[2-3]、无损检测^[4-5]等领域有着重要的应用。传统的伽马谱仪可分为两种:一种是基于独立的探测器、电子学插件和 PC 机组成的传统能谱测量仪,它重量大、体积大,一般放置于实验室中使用;另一种是手持式能谱测量仪,主要应用于野外环保监察和核设施设备巡查等。但即使是手持式便携能谱仪,其常规体积也相近于一台投影仪,重约 3~5 kg (例如 CANBERRA InSpectorTM1000)。较大的体积和重量一定程度地影响了工作效率,限制了能谱仪的应用范围。小体积、高性能、低功耗已经成为便携式谱仪的发展趋势。刘毅等人^[6]采用 GAGG:Ce 晶体耦合 SiPM 的方式,成功研制了一款小体积高分辨的伽马相机。但由于其数据采集及处理系统采用 ADC+FPGA 的框架,未能解决低成本、低功耗等问题。本文借鉴其 GAGG:Ce 闪烁晶体耦合 SiPM 的方式,同时利用最新的高性能 ARM 处理器平台,设计一套信号采集处理电路,研制一套集成度更高、成本更低、体积更小以及功耗更低的口袋式能谱测量仪。

2 晶体和探测器

2.1 闪烁晶体

近年来,高能物理、行李检测和医学成像等领域发展迅速,其中作为探测器核心部分的闪烁晶体也有了众多的研究成果。高灵敏度、高光输出、发光衰减时间短和高能量分辨率等特性是闪烁晶体发展目标。 $\text{Gd}_3(\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x)_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (简写 GAGG:Ce)是基于 LuAG:Ge 晶体进行替代参杂 Gd^{3+} , Ga^{3+} 而生长出的多组分石榴石闪烁晶体。GAGG:Ce 属于立方晶体,呈淡黄色,与其他晶体相比,具有很多优点:不易潮解,相比于 NaI(Tl),CsI(Na)等晶体长期稳定性更好;不含 Lu 元素,没有自身本底放射性,相比于 LaBr₃(Ce),LSO 等晶体更适合作为低剂量能谱仪的晶体材料^[6];密度大(6.63 g/cm^3),发光衰减时间短($<100\text{ ns}$),相比于其他晶

体具有更高的探测效率^[7-8];不同浓度的 Gd^{3+} , Ga^{3+} 元素参杂比生长出的晶体光产额差值较小,在对尺寸要求较大的领域,相比于其他晶体性能表现更加优异,具有更大的应用前景^[9]。本文选用日本 C&A 公司研制的 High resolution 型 GAGG:Ce 晶体,尺寸 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,晶体六面抛光,其中五面贴有反射膜层(图 1)。

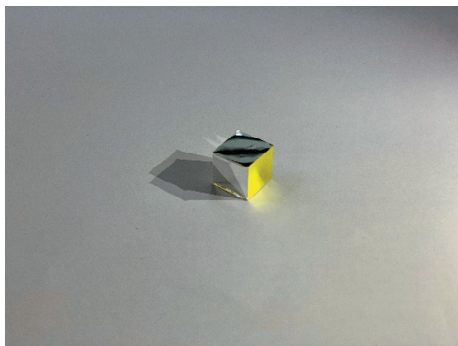


图 1 日本 C&A 公司研制的 High resolution 型 GAGG:Ce 晶体

Fig. 1 High resolution GAGG:Ce crystal developed by C&A company, Japan

2.2 SiPM 硅光电倍增管

光电倍增管(PMT)是辐射探测领域应用最为广泛的弱光探测器。光电倍增管的电子倍增可以达到 $10^4 \sim 10^8$ 倍^[10],具有高量子效率,高灵敏度与超快事件响应等优点^[11-13]。但是 PMT 为真空器件,具有体积较大、需工作在高电压下、光谱响应范围窄、探测效率受光阴极限制等缺点^[14]。这限制了便携式能谱仪性能的进一步提高。上世纪九十年代,一种新型的光电探测器概念“硅光电倍增管(Siliconphotomultiplier, SiPM)”被提出^[15]。SiPM 具有体积小、探测效率高、增益高($10^5 \sim 10^6$)、工作电压低($20 \sim 70\text{ V}$)^[16]、单光子分辨能力强(2 ns)^[17]、对磁场不敏感等特点^[18]。相比于传统的 PMT, SiPM 更适合应用于口袋式能谱仪。目前 SiPM 器件已经在辐射探测的多个应用领域得到了成功实践,例如:高能物理实验装置^[19]和核医学影像设备 PET^[20]。

本文选用 SensL 公司生产的 ARRAYJ-

60035-4P-BGA 像素型 SiPM, 像素面积为 $6.13\text{ mm}\times6.13\text{ mm}$, 灵敏面积为 $6.07\text{ mm}\times6.07\text{ mm}$. 每个 SiPM 内有 22 292 个微像素单元 APD, 用 4 个 SiPM 组成 2×2 的 SiPM 阵列, 相邻的两个 SiPM 间隔 0.2 mm , 整个 SiPM 阵列的面积为 $12.46\text{ mm}\times12.46\text{ mm}$. 表 1 给出了 SensL J-60035 系列 SiPM 基本信息.

表 1 SensL J-60035 系列 SiPM 基本信息

Tab. 1 Basic information of Sens LJ-60035 series SiPM

参数	最小值	特征值	最大值
工作电压(V_{op})/V	25.2		30.7
光谱范围/nm	200		900
发射光谱峰值/nm		420	
温度变化率/(mV/℃)		21.5	
击穿电压为 2.5 V, 光子探测效率(PDE)/%		38	
击穿电压为 2.5 V, 暗计数率/(kHz/mm ²)		50	
击穿电压为 2.5 V, 增益		2.9×10^6	

3 信号处理电路

图 2 为口袋式能谱仪的信号处理电路结构框

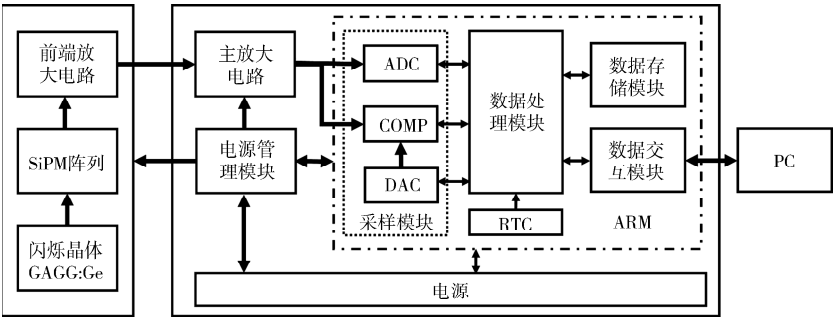


图 2 口袋式谱仪电子学硬件框图
Fig. 2 Hardware block diagram of pocket spectrometer

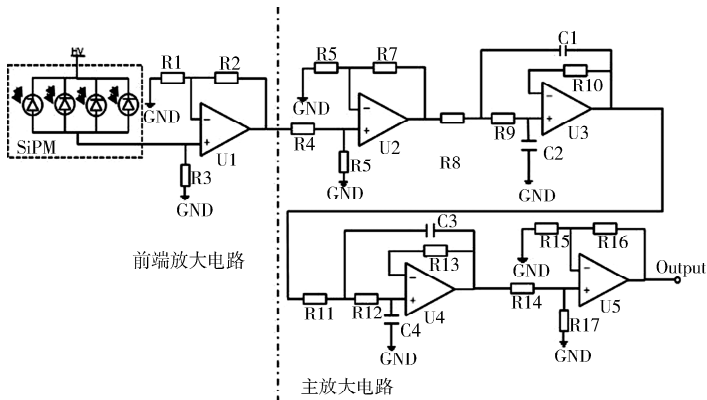


图 3 口袋式谱仪模拟电路设计
Fig. 3 Analog circuit design of pocket spectrometer

图. 探测器获取的核信号经模拟电路放大整形后, 由 ARM 自带的模数转换器(ADC)进行信号采集. 采集后的数据经数据处理模块依次实现脉冲触发、波形平滑、峰值提取、能谱统计等处理后, 将测得能谱存储在片内数据存储模块中. 测量时间由片内时钟计数器(RTC)控制, 数据交互模块用于能谱仪与 PC 间的 USB 通信控制, 实现各项参数的设置与数据的读出.

3.1 模拟电路设计

由于 GAGG 晶体光产额较大, 且 SiPM 增益较高, 使得前端探测器输出电流较大, 所以本文选择将 SiPM 阵列的四路电流信号经过电阻端接到地的方式把电流信号转换为电压信号, 然后由加法电路进行求和放大输出. 主放大器电路包含 4 个运算放大器: 第一个运算放大器和最后一个运算放大器只对输入的脉冲波形进行放大, 以提高带载能力和匹配 ADC 的输入动态范围; 中间两个运算放大器组合成两个二阶低通 Sallen-Key 滤波器, 滤除高频噪声, 同时对信号进行高斯成形. 电路设计框图如图 3 所示.

3.2 多道处理电路

ARM 微处理器是英国 Acorn 公司设计的高性能 RISC 微处理器. 近年来, ARM 微处理器技术在多道 γ 探测器领域有了一定的研究成果. 黄凯等人^[21]利用外接高速 ADC 的方法构建了一个可多任务运行的便携式 γ 谱仪, 但降低了系统的集成度与稳定性. 解洪亮等人^[22]研制的 γ 谱仪则利用 ARM 本身自带的 ADC 实现数据采集, 但是谱仪的整体性能受到采样率的限制. 为了解决以上问题, 本文选用 ARM 产品最新的低功耗系列 STM32L4R5ZI 作为核心处理器, 设计了由 ARM 内部模数转换器(ADC)、比较器(COMP)、数模转换器(DAC)组成的多道数据处理模块. 主放大电路的输出信号被分成两个通道送入 ADC 端口与 COMP 端口, COMP 的比较电压由 DAC 提供. 当 COMP 检测到有效信号的上升沿时, 触发内部中断, 提示数据处理模块读取 ADC 采样数据, 接着等待下一次的 COMP 中断触发. 通过该解决方案, 处理器可以准确地甄别出有效信号, 筛选掉无效的基线数据, 节省 CPU 消耗, 极大地提高系统的计数率, 增加系统的集成度与稳定性.

3.3 电源电路设计

口袋式能谱仪的最大的特点在于其具有良好便携性, 而便携性设备的一个非常重要的问题就是供电问题. 为了提高系统便携性与可扩展能力, 我们设计了基于单颗锂电池的电源驱动电路, 结构框图如图 4 所示. 锂电池输出通过线性电源降压为 3.3 V 为 ARM 供电, 通过电荷泵升压到 5 V 为放大器供电; 通过开关电源升压和线性电源稳压后给 SiPM 供电, 同时根据温度传感器返回数据, 采用数字电位器对 SiPM 供电偏压进行实时调节, 实现温度修正.

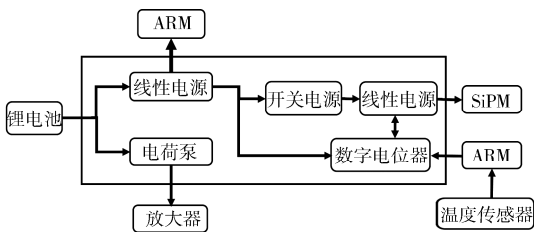


图 4 电源方案框图
Fig. 4 Power supply scheme block diagram

4 系统性能测试

系统测试模型如图 5 所示, 为了提供稳定的测

试环境, 谱仪的所有性能测试均在封闭的暗箱中进行, 室内环境温度在 $16 \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, SiPM 的工作电压为 29.5 V, 放射源置于晶体前端 1 cm 处. 晶体由 ESR 镜面反射膜包裹, 出光面通过光学硅脂与 SiPM 耦合. 暗箱上留有 USB 接口, 可保证 PC 与谱仪的数据通信.

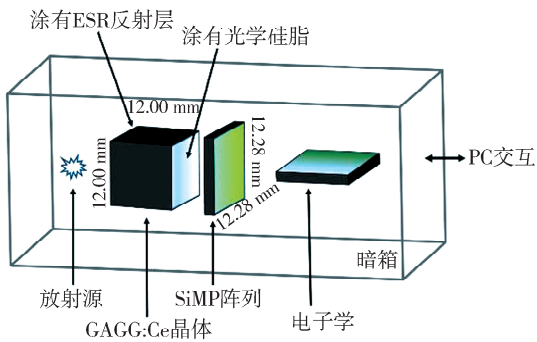


图 5 实验测试模型图
Fig. 5 Experimental test model diagram

4.1 电子学实物

图 6 展示了口袋式能谱仪电子学部分的实物图. 前端电路部分包括 SiPM 阵列与前端放大电路, 电路板尺寸 30 mm $\times$ 30 mm; 后端电路部分包括主放大电路、ARM 处理器核心电路与电源管理电路, 电路尺寸 70 mm $\times$ 30 mm. 所有的电子元器件均采用低功耗系列元器件, 保证了功耗的最优化.

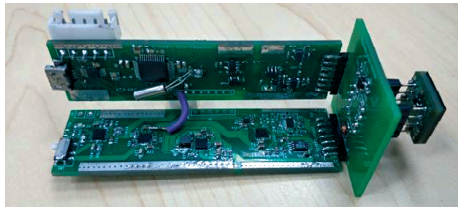


图 6 口袋式能谱仪电子学实物图
Fig. 6 Physical picture of pocket energy spectrometer circuit

4.2 功耗

口袋式能谱测量仪采用 3.7 V 锂电池供电, 电池容量 3 400 mAh. 谱仪的工作电流为 130 mA, 功率为 481 mW, 可连续工作 26 h.

4.3 能谱性能测试

为了确定系统能谱性能, 使用口袋式能谱仪样机对常见放射源进行了能谱测量, 包括²⁴¹Am, ⁵⁷Co, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co 放射源. 不同放射源全能峰峰位如表 2 所示. 所有的测试都是在暗箱中进行, 单个能谱测量时间为 300 s. 通过对 7 个

能量点进行线性拟合, 口袋式能谱仪在 60~1 332 keV 能量区间的线性拟合优度 $R^2=0.996$, 能量线性曲线如图 7 所示。

表 2 性能测试使用的放射源信息
Tab. 2 Radioactive source information used in the performance test

放射源	能量/keV	全能峰峰位
^{241}Am	60	14
^{57}Co	122	30
^{133}Ba	356	89
^{137}Cs	662	159
^{54}Mn	835	197
^{60}Co	1173	261
^{60}Co	1332	292

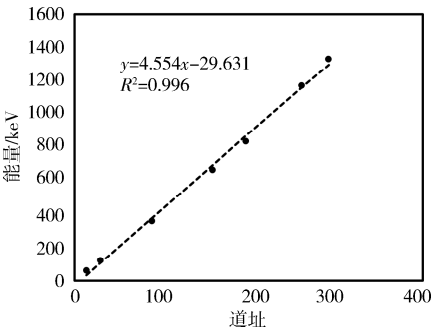


图 7 口袋式能谱仪能量响应线性曲线
Fig. 7 Energy response linear curve of pocket energy spectrometer

根据图 7 的能量响应线性曲线对口袋式能谱仪样机完成能谱刻度。图 8 给出了能量刻度后的 ^{137}Cs 能谱。通过对 ^{137}Cs 全能峰进行高斯拟合, 计算得到 662 keV 时的能量分辨率为 5.2%。

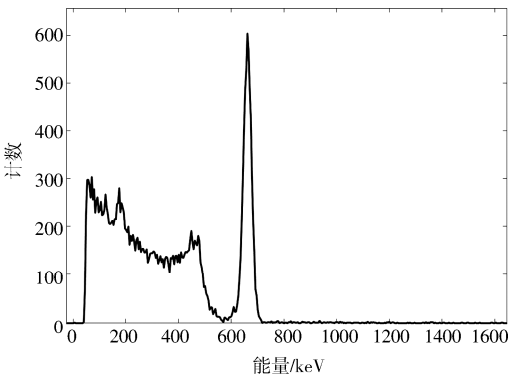


图 8 口袋式能谱仪测量的 ^{137}Cs 能谱
Fig. 8 Energy spectrum of ^{137}Cs measured by pocket spectrometer

5 结 论

本文采用 SiPM 耦合 GAGG:Ce 闪烁晶体的方式, 以 ARM 作为系统核心处理器, 利用其内部集成的 ADC 和 COMP 等外设, 成功研制了一款低成本、小体积、低功耗、高性能的口袋式能谱测量仪。经过测试, 该口袋式谱仪具有良好的能量线性响应和较好的能量分辨率。该仪器可应用于野外测量, 核设施设备巡查, 个人剂量测量以及科学实验等领域。在后续的研究中, 将进一步优化探测器设计, 改进电路噪声, 提高系统性能。

参考文献:

[1] 刘怡文, 赵朝阳, 王玉东, 等. 便携式 $\alpha\beta\gamma$ 谱仪设计[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 947.

[2] 俞涛, 刘晶, 任洞, 等. 便携式 γ 能谱仪快速鉴定低放射性活度贫铀[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2015, 35: 217.

[3] Migliori A, Bonanni P, Carraresi L, *et al.* A novel portable XRF spectrometer with range of detection extended to low-Z elements [J]. X-Ray Spectrom, 2011, 40: 107.

[4] Longoni A, Fiorini C, Leutenegger P, *et al.* A portable XRF spectrometer for non-destructive analyses in archaeometry [J]. Nucl Instrum Meth A, 1998, 409: 407.

[5] Fiorini C, Longoni A. In-situ, non-destructive identification of chemical elements by means of portable EDXRF spectrometer [J]. IEEE T Nucl Sci, 1999, 46: 2011.

[6] 刘毅, 帅磊, 张济鹏, 等. 基于 GAGG:Ce 晶体耦合 SiPM 的位置灵敏探测器的设计与评估[J]. 原子能科学技术, 2018, 52: 1487.

[7] Yoneyama M, Kataoka J, Arimoto M, *et al.* Evaluation of GAGG:Ce scintillators for future space applications [J]. J Instrum, 2018, 13: P02023.

[8] Sibczynski P, Iwanowska-Hanke J, Moszyński M, *et al.* Characterization of GAGG:Ce scintillators with various Al-to-Ga ratio [J]. Nucl Instrum Meth A, 2015, 772: 112.

[9] 孟猛, 祁强, 丁栋舟, 等. 新型闪烁晶体 $\text{Gd}_3(\text{Al}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ 的研究进展[J]. 人工晶体学报, 2019, 48: 1386.

[10] 陈鑫, 念聪, 王巧. 光电倍增管的原理及特性测量[J]. 中小企业管理与科技:中旬刊, 2019(4): 155.

[11] 何超, 刘书魁, 幸浩洋, 等. 液氦探测器的低温

- PMT 性能测试[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 921.
- [12] 洪加标, 魏强林, 刘义保, 等. 光电倍增管暗电流和单光电子响应[J]. 能源研究与管理, 2016 (2): 64.
- [13] Zhang H, Yu Y, Tariq K, *et al.* Photomultiplier tube performance of the WCDA ++ in the LHAASO experiment [J]. Nucl Instrum Meth A, 2019, 958: 162079.
- [14] 殷登平, 胡春周, 胡小波, 等. 硅光电倍增器 (SiPM) 研究进展[C]//中国电子学会核电子学与核探测技术分会. 第十五届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集. 北京: 中国电子学会核电子学与核探测技术分会, 2010: 237.
- [15] Buzhan P, Dolgoshein B, Filatov L, *et al.* Large area silicon photomultipliers: performance and applications [J]. Nucl Instrum Meth A, 2006, 567: 78.
- [16] 戴泽, 全林, 程晓磊, 等. 硅光电倍增探测器温度特性分析与实验[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34: 298.
- [17] Eraerds P, Legré M, Rochas A, *et al.* SiPM for fast photon-counting and multiphoton detection [J]. Opt Express, 2007, 15: 14539.
- [18] 陈法国, 韩毅, 于伟跃, 等. 硅光电倍增器在剂量测量中的应用现状与前景[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36: 82.
- [19] Billotta S, Marano D, Bonanno G, *et al.* SiPM detectors for the ASTRI project in the framework of the Cherenkov telescope array [C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering (Proceedings of SPIE). Canada: SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2014.
- [20] 卢贞瑞, 黄先超, 李琳, 等. 基于 SiPM 的乳腺专用 PET 探测模块研制与评价[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36: 316.
- [21] 黄凯, 周正东. 基于 ARM-Linux 的便携式 γ 能谱仪[J]. 计算机系统应用, 2013, 22: 74.
- [22] 解洪亮, 王红印, 左平, 等. 基于 32 位 ARM 处理器的 γ 能谱仪研制[J]. 化工自动化及仪表, 2012 39: 1004.

引用本文格式:

中文: 李钰龙, 王忠海, 高泰, 等. 口袋式伽马能谱仪研制[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 034001.

英文: Li Y L, Wang Z H, Gao T, *et al.* Development of pocket energy spectrometer [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 034001.