

常见 γ 能谱探测器的核谱学性能测量与对比分析

孙海 顾先宝 於国兵 王浩 闻德运 张文亮 刘 犇

(安徽省辐射环境监督站 合肥 230071)

摘要 为了解不同 γ 能谱探测器的核谱学性能, 选择了 HPGe、CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃ 和 NaI(Tl) 常见 γ 能谱探测器, 分别测量了 ²⁴¹Am、¹³⁷Cs 和 ⁶⁰Co 标准源, 计算了不同探测器对不同核素的探测限。结果表明: 在环境本底条件下, HPGe、CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃ 和 NaI(Tl) γ 能谱探测器对发射低能 γ 射线 ²⁴¹Am 的探测限分别是 0.039 Bq、0.180 Bq、0.781 Bq、0.697 Bq 和 1.104 Bq, 但是在铅室内测量样品中 ¹³⁷Cs 的活度时, 探测限分别是 0.005 Bq、0.294 Bq、0.036 Bq、0.037 Bq 和 0.057 Bq。测量和计算结果展示了不同探测器的 γ 射线全能峰形、源峰探测效率、本底能谱和不同应用场景下的探测限, 为选择合适的 γ 能谱探测器测量样品活度提供了可供参考的核谱学性能参数。

关键词 γ 射线全能峰形, 源峰探测效率, 本底能谱, 探测限, γ 能谱探测器

中图分类号 TL816.4

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0062

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2024-0062

引用该文:

孙海, 顾先宝, 於国兵, 等. 常见 γ 能谱探测器的核谱学性能测量与对比分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, 43(2): 020701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0062.

SUN Hai, GU Xianbao, YU Guobing, *et al.* Nuclear spectrometric performance measurement and comparative analysis of common gamma spectrum detectors[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(2): 020701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0062.



Nuclear spectrometric performance measurement and comparative analysis of common gamma spectrum detectors

SUN Hai GU Xianbao YU Guobing WANG Hao WEN Deyun ZHANG Wenliang LIU Ben

(Anhui Radiation and Environment Supervision Station, Hefei 230071, China)

ABSTRACT To understand the nuclear spectroscopic performance of gamma-ray spectrum detectors in different application scenarios, HPGe, CZT, LaBr₃(Ce), CeBr₃, and NaI(Tl), which are common gamma-ray spectrum detectors, were selected. ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, and ⁶⁰Co standard sources were measured, and the detection limits of the different detectors for different nuclides were calculated. The results show that under environmental background conditions, the detection limits of the HPGe, CZT, LaBr₃(Ce), CeBr₃, and NaI(Tl) gamma spectrum detectors for low-energy gamma-ray ²⁴¹Am are 0.039 Bq, 0.180 Bq, 0.781 Bq, 0.697 Bq, and 1.104 Bq, respectively. However, when measuring the activity of ¹³⁷Cs in the lead chamber, the detection limits are 0.005 Bq, 0.294 Bq, 0.036 Bq, 0.037 Bq, and 0.057 Bq, respectively. The measurement and calculation results show the full-energy peak shape, source peak

第一作者: 孙海, 男, 1965 年 5 月出生, 1986 年 6 月于中山大学获学士学位

通信作者: 顾先宝, 博士, E-mail: guxb0564@126.com

收稿日期: 初稿 2024-07-11; 修回 2024-08-08

First author: SUN Hai (male) was born in May 1965, and obtained his bachelor's degree in Sun Yat-Sen University in June 1986

Corresponding author: GU Xianbao, doctoral degree, E-mail: guxb0564@126.com

Received 11 July 2024; accepted 08 August 2024

detection efficiency, background energy spectrum, and the detection limits of the different detectors in different application scenarios, thus providing reference nuclear spectroscopic performance parameters for selecting the appropriate gamma spectrum detectors to measure sample activity.

KEYWORDS Full energy peak shape, Source peak detection efficiency, Background energy spectrum, Detection limit, Gamma spectrum detector

CLC TL816.4

γ 能谱探测器是核谱学中常用的能谱测量设备,常见的 γ 能谱探测器有HPGe、CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃、NaI(Tl)等^[1-3],分为半导体型和闪烁体型两种类型探测器。全能峰形及其半高宽(FWHM)、全能峰探测效率、本底计数等参数是评价 γ 能谱探测器性能的重要核谱学性能参数^[4-6]。探测限是 γ 能谱探测器另一个重要的核谱学性能参数,使用 γ 能谱法测量环境样品中的放射性核素活度时,往往需要探测器具有较低的探测限。影响探测限的因素有很多,探测器的能量分辨能力、全能峰探测效率、探测器自身材料中的放射性水平、测量时的环境本底计数率、测量时间等因素都会影响探测器的探测限。然而,每一种探测器的核谱学性能参数都有差异,并各具特点,因此,用户需要对多种探测器的主要性能参数进行对比,才能选择出满足测量需要的探测器。单个 γ 能谱探测器能量分辨力等参数的报道较多^[7-9],但是关于 γ 能谱探测器探测限的报道很少,多种探测器主要核谱学性能参数全面对比分析的报道也很少^[10-11]。

本工作将利用²⁴¹Am、¹³⁷Cs和⁶⁰Co标准源,对HPGe、CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)这5种常见 γ 能谱探测器的探测限进行计算,同时对每种

探测器的全能峰形及其半高宽(FWHM)、全能峰效率和本底计数进行对比分析,为用户在 γ 能谱探测器的选择时提供参考。

1 原理

根据GB/T16145—2022^[12],使用 γ 能谱探测器测量样品活度时,探测限按照式(1)计算。

$$L_D = \frac{k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}}{\varepsilon P} \sqrt{n_b \left[\frac{1}{T_b} + \frac{1}{T_s} \right]} \quad (1)$$

式中: L_D 为探测器对核素活度的探测限; $k_{1-\alpha}$ 为正态分布的 $1-\alpha$ 百分位数(概率 α 通常取为5%,在这种情况下 $k_{1-\alpha}=1.645$); $k_{1-\beta}$ 为正态分布的 $1-\beta$ 百分位数(概率 β 通常取为5%,在这种情况下 $k_{1-\beta}=1.645$); ε 为相应能量 γ 射线源峰探测效率; P 为相应能量 γ 射线发射几率; n_b 为本底计数率; T_b 为本底测量活时间; T_s 为样品测量活时间。

2 设备

2.1 探测器

选择HPGe、CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)这5种常见 γ 能谱探测器作为对比测量分析对象,实验中使用的 γ 能谱探测器信息见表1。

表1 实验中使用的探测器信息
Table 1 Information of the detectors used in the experiment

探测器类型 Detector type	品牌 Brand	型号 Model	晶体尺寸/mm Crystal size
HPGe	Canberra	BE5030	ø81×31
CZT	迪泰克 Imdetek	DT-01C11005	10×10×5
LaBr ₃ (Ce)	SAINT-GOBAIN	02S102-B380	ø76×76
CeBr ₃	SCIONIX HOLLAND	CEBR3(LB)-X2	ø76×76
NaI(Tl)	ORTEC	S-1212-1	ø76×76

2.2 标准源

为了尽量覆盖不同能量的 γ 射线,实验中使

用²⁴¹Am、¹⁵²Eu、¹³⁷Cs和⁶⁰Co 4种溯源至国家活度计量基准的标准点源,实验中使用的标准源信息见表2。

表2 实验中使用的标准源信息
Table 2 Standard source information used in the experiment

标准源 Standard source	主要 γ 射线能量和发射率 / keV Main gamma ray energy and emissivity	活度 / Bq Activity	活度不确定度 / % Activity uncertainty ($k=2$)
^{241}Am	59.54(35.9%)	9 000	2.5
^{137}Cs	661.77(85.1%)	7 928	2.5
^{60}Co	1 173.24(99.9%)、1 332.50(99.9%)	17 795	2.5
^{152}Eu	121.78(39.8%)、244.70(10.6%)、344.28(95.2%)……	27 905	3.0

2.3 铅室

为了测量每种探测器的本底能谱，需要使用铅室，实验中使用的铅室为Canberra公司生产的低本底铅室，外层为1 cm低碳钢，中层为10 cm铅，内层为3 mm无氧铜。

2.4 电子学系统

HPGe和CZT探测器使用Canberra公司的Lynx多道分析器， $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 、 CeBr_3 和 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 探测器使用Canberra公司生产的OSPNEY-DTB型多道分析器。

2.5 谱分析软件

HPGe、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 、 CeBr_3 和 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 探测器使用Canberra公司的Genie2000 γ 能谱分析软件，CZT使用自制的GammaSAC γ 能谱分析软件。

3 结果与分析

3.1 全能峰形和FWHM

分析 γ 能谱时，需要根据探测器测得全能峰形的特点选择合适的拟合函数，而拟合函数的选择直接影响全能峰面积的计算结果^[13]。如果使用商业软件分析 γ 能谱时，需要观察探测器的全能峰形是否适合软件峰面积的算法。FWHM反映的是探测器的能量分辨力，对于同一能量， γ 射线FWHM越小，探测器的能量分辨本领越高，对 γ 能谱的分析越有利。

为了观察HPGe、CZT、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 、 CeBr_3 和 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 这5种常用 γ 能谱探测器的全能峰形，并对比不同探测器对 γ 射线的能量分辨力，分别使用这些探测器测量 ^{241}Am 发射的59.54 keV γ 射线、 ^{137}Cs 发射的661.77 keV γ 射线和 ^{60}Co 发射的1 332.50 keV γ 射线的全能峰。图1是不同探测器测得的 ^{241}Am 全能峰；图2是不同探测器测得的 ^{137}Cs 全能峰；图3是不同探测器测得的 ^{60}Co 全能

峰；根据测量结果列出了不同探测器对不同能量 γ 射线的FWHM，见表3。由图1~3可以看出，HPGe、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 、 CeBr_3 和 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 测得的 γ 射线全能峰为峰位两边近似对称的高斯峰形，而CZT测得的全能峰在峰位的两端并不对称，在低能端有较长的拖尾，而且 γ 射线能量越大拖尾越长。如果仅以高斯函数为峰形函数的 γ 能谱分析软件，不适用于CZT探测器，需要自行编制能谱分析软件。在编制CZT探测器 γ 能谱分析软件时，需要在高斯函数的基础上再加一个低能拖尾函数来描述全能峰^[14]。

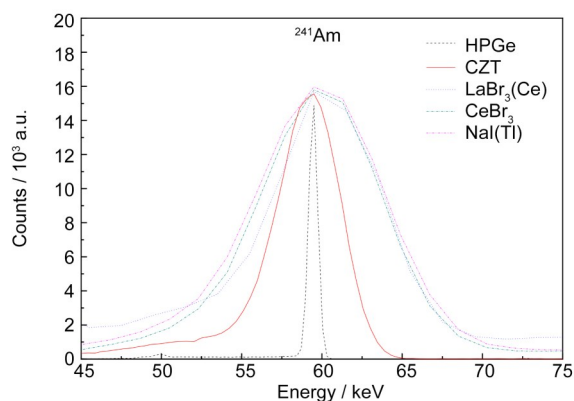


图1 不同探测器测得的 ^{241}Am 全能峰(彩色见网络版)
Fig.1 ^{241}Am full energy peak measured by different detectors (color online)

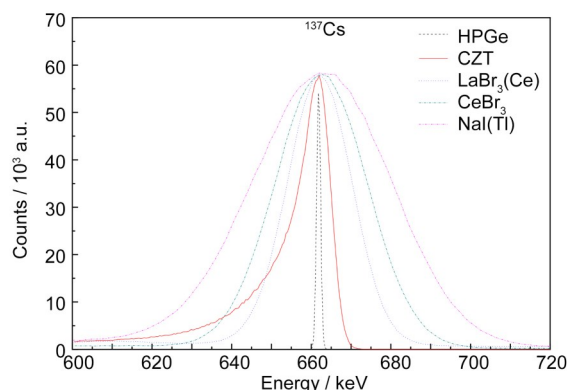


图2 不同探测器测得的 ^{137}Cs 全能峰(彩色见网络版)
Fig.2 ^{137}Cs full energy peak measured by different detectors (color online)

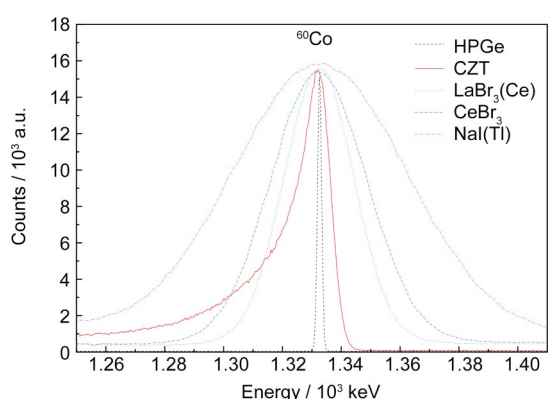


图3 不同探测器测得的 ^{60}Co 全能峰(彩色见网络版)
Fig.3 ^{60}Co full energy peak measured by different detectors (color online)

表3 不同探测器对不同能量 γ 射线的FWHM
Table 3 The FWHM of different detectors for different energy γ rays

探测器类型 Detector type	^{241}Am (59.54 keV)	^{137}Cs (661.77 keV)	^{60}Co (1332.50 keV)
HPGe	0.72	1.23	1.65
CZT	4.40	9.73	14.36
LaBr ₃ (Ce)	6.92	19.11	28.03
CeBr ₃	8.73	27.02	38.31
NaI(Tl)	9.57	47.53	66.87

由表3中的测量数据可以看出,对于同一能量的 γ 射线,HPGe的FWHM最小,也就是能量分辨力最好,NaI(Tl)的能量分辨力最差。CZT的能量分辨力虽然好于NaI(Tl)、LaBr₃(Ce)和CeBr₃,但是与HPGe相比差距较大,CZT测得59.54 keV γ 射线的FWHM是HPGe的6.1倍。按照能量分辨力由好到差排序依次为HPGe、CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)。

对于同一种 γ 能谱探测器, γ 射线的能量越大FWHM越大;测量低能(低于661.77 keV) γ 射线时,能量分辨力越好的探测器,不同能量 γ 射线的FWHM变化越小,能量分辨力越差的探测器,不同能量 γ 射线的FWHM变化越大。例如:HPGe测得661.77 keV γ 射线的FWHM是59.54 keV γ 射线FWHM的1.7倍,而NaI(Tl)测得661.77 keV γ 射线的FWHM是59.54 keV γ 射线FWHM的5.0倍。

为了更加清晰对比各种 γ 能谱探测器的能量分辨力,使用HPGe、CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)探测器测量了 ^{152}Eu 点源的 γ 能谱,测量结果见图4。由图4可以看出5种 γ 能谱探测器能量分

辨力的差异。

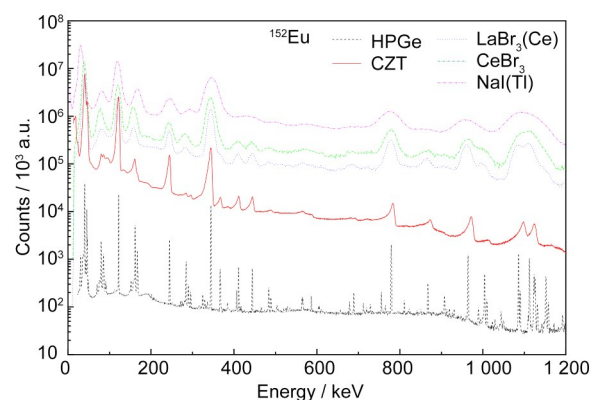


图4 5种探测器测得的 ^{152}Eu 点源 γ 能谱(彩色见网络版)
Fig.4 ^{152}Eu point sources measured by five detectors γ energy spectrum (color online)

3.2 探测效率

探测效率是 γ 射线能谱测量设备的另一个重要参数,它反映的是设备探测到射线的概率,可使用源峰探测效率等进行表征。源峰探测效率与探测器灵敏面积、源与探测器之间的距离、放射源样品的几何特征等因素有关^[15-17]。使用 γ 能谱仪测量放射性样品活度时,常使用源峰探测效率。为了对比实验室常用 γ 能谱仪的源峰探测效率,使用HPGe、CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)这5种 γ 能谱探测器分别测量 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 点源标准源。测量时,将具有树脂材料包装的标准源直接放置在探测器表面,点源位于探测器上表面中心点正上方2 mm位置,图5是各种探测器对点源的源峰探测效率测量结果。

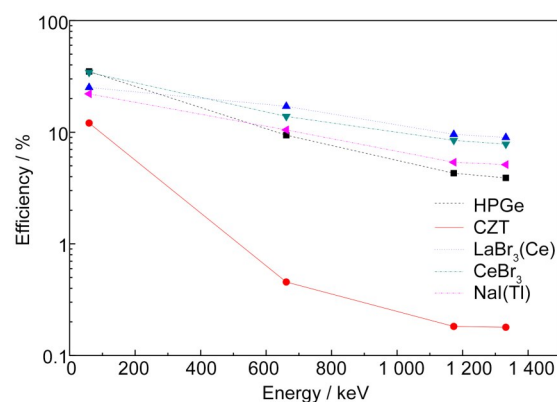


图5 不同探测器源峰探测效率测量结果(彩色见网络版)
Fig.5 Measurement results of source peak detection efficiency for different detectors (color online)

由图5可以看出,不同种类的 γ 能谱仪对低能

γ 射线的探测效率要高于其对高能 γ 射线的探测效率。这五种探测器中，CZT对不同能量 γ 射线探测效率随着能量的变化最快，CZT对59.54 keV γ 射线的探测效率是1332.50 keV γ 射线的67.4倍，而HPGe、LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)的这一数据分别为9.0、2.8、4.4和4.3。当 γ 射线的能量为59.54 keV时，5种探测器的效率差距不大，HPGe的探测效率是CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)的2.9、1.4、1.0和1.6倍，但是随着能量的增加，5种探测器探测效率之间的差距越来越大，当 γ 射线的能量为1332.50 keV时，HPGe的探测效率是CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)的21.8、0.4、0.5和0.8倍。

3.3 本底

γ 能谱探测器可以在环境本底条件下测量样品活度，也可以在低本底的铅室内测量样品活度，探测器的本底计数率直接影响探测限，本底计数率越低对低活度样品的测量越有利。为了了解HPGe、CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)探测器在环境本底条件下和在低本底铅室内的 γ 能谱本底计数率，分别将各探测器放置在铅室外和铅室内测量本底计数，图6为铅室外各探测器测量的本底谱，测量时间均为140 000 s。图7为铅室内各探测器测量的本底谱，测量时间也均为140 000 s。

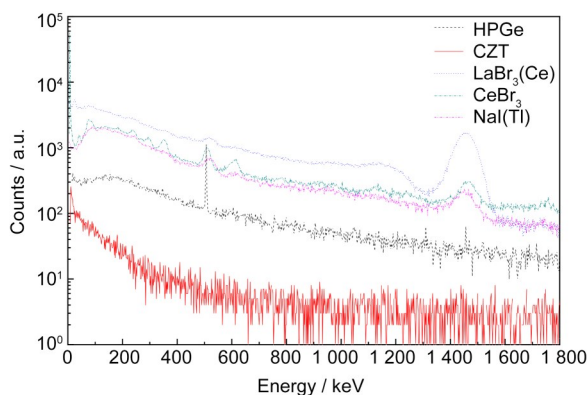


图6 不同探测器在环境本底条件下测得的本底谱(彩色见网络版)

Fig.6 Background spectra measured by different detectors under environmental background conditions (color online)

由图6可以看出，环境本底的 γ 能谱较为复杂，主要是²²⁶Ra和²³²Th衰变子体产生的计数，LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)闪烁体探测器的平均探测效率相对于HPGe和CZT的探测效率较高，因此，相应的环境本底的计数率也较大。由图7的测

量结果可以看出，闪烁体探测器在铅室内的本底计数明显高于半导体探测器的本底计数，主要是由于闪烁体探测器本身材料内的放射性核素含量较高造成的。闪烁体探测器中LaBr₃(Ce)的本底计数最大，主要是由于闪烁体本身含有¹³⁸La、²²⁸Ac等核素。半导体探测器中，CZT体积小、结构材料少，而且对高能射线的探测效率很低，因此它的本底计数最低。

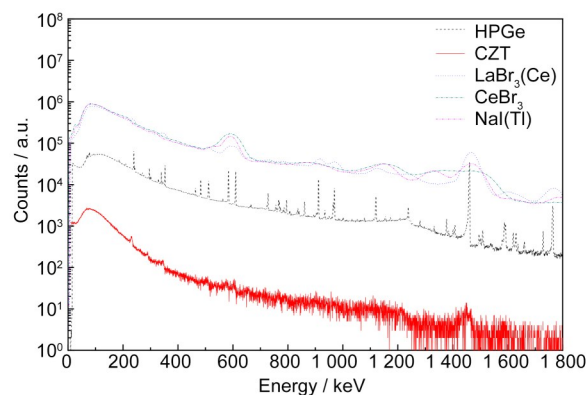


图7 不同探测器在铅室内测得的本底谱(彩色见网络版)
Fig.7 Background spectra measured by different detectors in a lead chamber (color online)

3.4 探测限

根据公式(1)计算得到的HPGe、CZT、LaBr₃(Ce)、CeBr₃和NaI(Tl)探测器对²⁴¹Am、¹³⁷Cs、⁶⁰Co的探测限见表4和表5。其中，表4是在环境本底条件下5种探测器对不同核素的探测限；表5是5种探测器在铅室内对不同核素的探测限，测量时间均为140 000 s。

由表4和表5可以看出，在环境本底条件下，除了CZT外，其他4种探测器对发射低能 γ 射线²⁴¹Am的探测限均大于对发射较高能量 γ 射线¹³⁷Cs和⁶⁰Co的探测限。5种探测器对发射低能 γ 射线²⁴¹Am的探测限从小到大的顺序依次为HPGe、CZT、CeBr₃、LaBr₃(Ce)和NaI(Tl)，半导体探测器明显好于闪烁体探测器。但是随着 γ 射线能量的增加，探测限的大小顺序却发生了变化，测量¹³⁷Cs时，CZT的探测限最高。主要是由于测量低能 γ 射线时，5种探测器对低能 γ 射线的探测效率差别不大，探测器本底计数率是影响各自探测限的主要因素，但是随着 γ 射线能量的增加，CZT对 γ 射线的探测效率随能量的变化很快，影响CZT探测限的主要因素是探测效率，而HPGe、CeBr₃、LaBr₃(Ce)和NaI(Tl)探测效率的变化并不是很快。铅室

屏蔽了大部分环境本底计数,对于同一样品、同一探测器,铅室内的探测限明显低于环境本底条件下的探测限。在铅室内测量样品中 ^{241}Am 的活度时,5种探测器对其探测限从小到大的顺序依次为HPGe、CZT、CeBr₃、NaI(Tl)和LaBr₃(Ce),测量

样品中 ^{137}Cs 的活度时,探测限从小到大的顺序依次为HPGe、LaBr₃(Ce)、CeBr₃、NaI(Tl)和CZT。LaBr₃(Ce)探测器自身材料的放射性在环境本底条件下并不显著,但在铅室内就会对探测限产生较大影响。

表4 五种探测器在环境本底条件下外对不同核素的探测限
Table 4 The minimum detection limits of five detectors for different nuclides under environmental background conditions

探测器类型 Detector type	探测限 / Bq Detection limits			
	^{241}Am (59.54 keV)	^{137}Cs (661.77 keV)	^{60}Co (1 173.24 keV)	^{60}Co (1 332.50 keV)
HPGe	0.039	0.022	0.031	0.025
CZT	0.180	1.414	0.507	0.372
LaBr ₃ (Ce)	0.781	0.464	0.402	0.335
CeBr ₃	0.697	0.371	0.404	0.040
NaI(Tl)	1.104	0.987	0.917	0.864

表5 五种探测器在铅室内对不同核素的探测限
Table 5 The minimum detection limits of five detectors for different nuclides in a lead chamber

探测器类型 Detector type	探测限 / Bq Detection limits			
	^{241}Am (59.54 keV)	^{137}Cs (661.77 keV)	^{60}Co (1 173.24 keV)	^{60}Co (1 332.50 keV)
HPGe	0.005	0.005	0.007	0.007
CZT	0.020	0.294	0.162	0.149
LaBr ₃ (Ce)	0.082	0.036	0.047	0.057
CeBr ₃	0.038	0.037	0.044	0.040
NaI(Tl)	0.063	0.057	0.076	0.072

4 结论

常见的 γ 能谱探测器中,HPGe探测器能量分辨力好,但是需要在液氮条件下工作,价格昂贵。CZT探测器能量分辨力不如HPGe,好于NaI(Tl)、LaBr₃(Ce)和CeBr₃,可以在室温条件下工作,但是受制于目前的晶体生产技术,很难制成大体积探测器。NaI(Tl)、LaBr₃(Ce)和CeBr₃的能量分辨力相对较差,但是可以根据需要制成较大体积的探测器。探测器的能量分辨力可以通过优化数据处理的方式进行改进,例如,基于射线在探测器内作用深度的反演算法可以使CZT探测器对 ^{137}Cs 发射的661.77 keV γ 射线的能量分辨力达到4.6 keV^[18-19]。

5种 γ 能谱探测器对低能 γ 射线的源峰效率差距不大,但是随着能量的增加,5种探测器源峰效率之间的差距越来越大,CZT的探测效率随 γ 射线能量的变化很快。

低探测限的 γ 能谱探测器适合用于环境样品的

活度测量。实验室内如果有满足要求的铅室,HPGe的能量分辨好、探测限最低,适合测量低活度环境样品,但是由于其价格和维护成本,核事故的预警监测、野外环境的在线监测很少使用HPGe,例如生态环境部建设的辐射环境自动监测站中是使用NaI(Tl)作为 γ 能谱探测器的。在环境本底条件下测量发射较低能量 γ 射线的样品时,CZT能量分辨较好,探测限较低,适合作为 γ 能谱探测器。如果测量对象发射 γ 射线的能谱较宽,可以选择LaBr₃(Ce)作为 γ 能谱探测器。

γ 能谱探测器的应用场景较多,在具体的实验测量中,需要根据测量的目的,测量对象的特点,以及实验条件等因素选择合适的 γ 能谱探测器。

作者贡献声明 孙海是本研究的实验设计者和执行人,完成数据分析,论文初稿的写作;顾先宝是通信作者,实验负责人,主要负责论文方向的定夺、实验的指导、论文的最终修订、审阅及定稿等;於国兵、王浩、闻德运、张文亮、刘犇参

与实验设计和实验结果分析。所有作者均已阅读并同意最终文本。

参考文献

- 1 Fatemi S, Altieri S, Bortolussi S, *et al.* Preliminary characterization of a CdZnTe photon detector for BNCT-SPECT[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **903**: 134-139. DOI: 10.1016/j.nima.2018.06.068.
- 2 Prozorova I V, Ghal-Eh N, Bedenko S V, *et al.* Characterizing the coaxial HPGe detector using Monte Carlo simulations and evolutionary algorithms[J]. Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine, 2021, **174**: 109748. DOI: 10.1016/j.apradiso.2021.109748.
- 3 Scott T, Garnick K, Malkin E, *et al.* Characterization and application of cerium bromide spectrometers for analysis of γ -ray emitting radionuclides in food matrices[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2018, **318**(1): 533-542. DOI: 10.1007/s10967-018-6100-1.
- 4 AlMisned G, Zakaly H M H, Ali F T, *et al.* A closer look at the efficiency calibration of LaBr₃(Ce) and NaI(Tl) scintillation detectors using MCNPX for various types of nuclear investigations[J]. Heliyon, 2022, **8**(10): e10839. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10839.
- 5 房江奇, 安政伟, 张文峰, 等. 无人机载 CeBr₃ 探测器监测系统研制及性能测试[J]. 中国辐射卫生, 2024, **33**(1): 80-86. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2024.01.014. FANG Jiangqi, AN Zhengwei, ZHANG Wenfeng, *et al.* Development and performance test of unmanned aerial vehicle-borne CeBr₃ radiation monitoring system[J]. Chinese Journal Radiological Health, 2024, **33**(1): 80-86. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2024.01.014.
- 6 Favalli A, Mehner H C, Simonelli F. Wide energy range efficiency calibration for a lanthanum bromide scintillation detector[J]. Radiation Measurements, 2008, **43**(2/3/4/5/6): 506-509. DOI: 10.1016/j.radmeas.2007.11.062.
- 7 花锋, 席守智, 李明旭, 等. 低能量宽量程碲锌镉探头研制[J]. 核电子学与探测技术, 2021, **41**(4): 687-691. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.04.027. HUA Feng, XI Shouzhi, LI Mingxu, *et al.* Preparation and study of low energy and wide dose range probe based on the CZT[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2021, **41**(4): 687-691. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.04.027.
- 8 Quarati F G A, Dorenbos P, van der Biezen J, *et al.* Scintillation and detection characteristics of high-sensitivity CeBr₃ gamma-ray spectrometers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, **729**: 596-604. DOI: 10.1016/j.nima.2013.08.005.
- 9 Prokesch M, Soldner S A, Sundaram A G. CdZnTe detectors for gamma spectroscopy and X-ray photon counting at 250×10^6 photons/(mm²·s) [J]. Journal of Applied Physics, 2018, **124**(4): 044503. DOI: 10.1063/1.5041006.
- 10 谷钰伟, 闫文奇, 刘文斌, 等. 溴化镧、碘化钠和塑料闪烁探测器性能比较[J]. 实验室研究与探索, 2015, **34**(4): 64-67. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7167.2015.04.017. GU Zhengwei, YAN Wenqi, LIU Wenbin, *et al.* Comparison of performance of lanthanum bromide, sodium iodide and plastic scintillator detectors[J]. Research and Exploration Laboratory, 2015, **34**(4): 64-67. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7167.2015.04.017.
- 11 Feng P Y, Sun X L, An Z H, *et al.* The energy response of LaBr₃(Ce), LaBr₃(Ce, Sr), and NaI(Tl) crystals for GECAM[J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, **35**(2): 23. DOI: 10.1007/s41365-024-01383-8.
- 12 国家市场监督管理总局. 环境及生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法: GB/T16145—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022: 12. State Administration for Market Regulation. Gamma-ray spectrometry method for the determination of radionuclides in environmental and biological samples: GB/T16145—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022: 12.
- 13 Morháč M, Kliman J, Jandel M, *et al.* Efficient fitting algorithms applied to analysis of coincidence γ -ray spectra[J]. Computer Physics Communications, 2005, **172**(1): 19-41. DOI: 10.1016/j.cpc.2005.06.005.
- 14 Borella A, Bruggeman M, Rossa R, *et al.* Peak shape calibration of a Cadmium Zinc Telluride detector and its application for the determination of uranium enrichment [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **986**: 164718. DOI: 10.1016/j.nima.2020.164718.
- 15 Wu H X, Liu Y B, Liu Y J, *et al.* Efficiency calibration of

- airborne γ -ray spectrometer using sourceless efficiency calibration method[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2019, **322**(2): 613-619. DOI: 10.1007/s10967-019-06717-0.
- 16 刘畅, 陈凌, 富平, 等. 高纯锗探测器全能峰效率的 MC 模拟[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(1): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.01.001.
LIU Chang, CHEN Ling, FU Ping, *et al.* Simulation of full energy peak efficiencies for a HPGe detector with Monte Carlo method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, **36**(1): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.01.001.
- 17 曹勤剑, 夏三强, 刘立业, 等. 溴化镧探测器的晶体表征与全能峰效率计算[J]. 辐射防护, 2016, **36**(6): 364-367.
CAO Qinjian, XIA Sanqiang, LIU Liye, *et al.* Size adjustment and calculation of full-energy peak efficiency for the LaBr₃ scintillation detector[J]. Radiation Protection, 2016, **36**(6): 364-367.
- 18 Wu R, Kang Y, Wei D K, *et al.* Energy spectrum correction and carrier mobility calculation of CdZnTe pixel detector based on the depth of interaction[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2022, **69**(7): 1773-1779. DOI: 10.1109/TNS.2022.3170427.
- 19 傅健强. 碲锌镉探测器若干关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
FU Jianqiang. Research on some key technologies of cadmium zinc telluride detector[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.