

## 手持式 $\gamma$ 谱仪用核辐射探测器综述

肖无云,毛用泽,艾宪芸,王善强,梁卫平

(防化研究院第二研究所,北京 1044 信箱 201 号 102205)

**摘要:**介绍了 $\gamma$ 谱仪探测器基本性能评价指标,分析了手持式 $\gamma$ 能谱测量中常用的核辐射探测器,如高纯锗、碘化钠、碘化铯、碲锌镉和溴化镧等的主要性能特点,指出碲锌镉和溴化镧的产生与发展,以及高纯锗谱仪小型化是近年来手持式 $\gamma$ 谱仪探测器技术的主要进展。为了应对不断增长的手持式放射性核素识别应用需求,建议加强碲锌镉和溴化镧探测器研制及其在手持式谱仪中的应用研究。

**关键词:**手持式 $\gamma$ 谱仪,探测器,放射性核素识别

**中图分类号:** TL 822+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2008)05-0974-04

放射性核素识别主要通过 $\gamma$ 能谱测量与分析来实现。近年来随着国内外反恐斗争形势的发展,可在核与辐射恐怖事件危机管理与后果管理中发挥放射性核素识别作用的高性能手持式 $\gamma$ 能谱仪成为研究与开发的热点。在应用需求推动下,手持式谱仪用探测器技术领域发展活跃,在多个方面取得了重要进展。特别是碲锌镉(CdZnTe)、溴化镧(LaBr<sub>3</sub>:Ce)等新型核辐射探测器的问世,以及高纯锗(HPGe)谱仪的小型化,改变了放射性核素识别长期主要依赖碘化钠(NaI(Tl))探测器的局面,使手持式谱仪用核辐射探测器的选择呈现出多元化趋势。不同类型谱仪探测器的性能差别很大,各有优缺点,适合的应用场合也不尽相同。本文综述了几种典型谱仪用探测器的主要性能特点,为实际应用中手持式 $\gamma$ 谱仪探测器的选型提供参考。

### 1 $\gamma$ 谱仪探测器的主要性能指标

对于谱仪探测器,实际应用中特别关心的

性能主要包括能量分辨率、探测效率和环境特性等。

能量分辨率定义为全能峰半高宽(FWHM)与峰位能量的比值,它表征了探测器对不同能量射线的分辨能力,因此是谱仪探测器最重要的性能指标。实际测得的能量分辨率与探测器输出信号的产生、传递、转换、放大与收集等过程有关。若有用信号越强,干扰因素越弱,则能量分辨率越好。对于气体和半导体探测器,主要影响因素是电离能;对于闪烁体,主要影响因素是发光效率。

谱仪探测器源峰探测效率定义为探测器探测到的全能峰内脉冲净计数与源发射的粒子数的比值。源峰探测效率在很大程度上决定了放射性核素识别测量中能谱获取时间的长短。影响源峰探测效率的主要因素是探测器大小、材料密度、平均原子序数以及 $\gamma$ 射线能量等。

环境特性主要是指探测器受环境湿度、温度变化、冲击振动、电磁干扰等的影响特性。对于手持式测量应用,很难获得实验室中优越的测量条件,因此环境特性显得格外重要。环境特性好主要是指探测器可在常温下工作,不潮解,抗温度变化、冲击振动和电磁干扰的能力强等。如军用谱仪就对探测器环境特性具有十分

收稿日期:2007-9-27

作者简介:肖无云(1973—),男,博士,副研究员,从事核辐射监测技术研究。

苛刻的要求。

## 2 典型手持式 $\gamma$ 谱仪探测器

### 2.1 碘化钠探测器

NaI(Tl)晶体具有突出的性能价格比,是 $\gamma$ 能谱探测中应用最早也是最广的闪烁体,尤其在手持式放射性核素识别应用中长期居于主导地位。NaI(Tl)平均原子序数较高,特别是体积可以做得很大,故探测效率很高。NaI(Tl)的能量分辨率在闪烁体中保持了半个多世纪的领先优势,但与半导体探测器仍有显著的差异。2000年9月IAEA ITRAP工作组对来自各国多个厂家的碘化钠手持式放射性核素识别仪器进行了测试。结论是都不满足非法运输核材料检测的性能指标要求,特别是对于多种放射性核素混合或有屏蔽的情况<sup>[1]</sup>。另外,NaI(Tl)晶体极易潮解,抗机械与热冲击性能差。

图1给出了一款典型的来自Target公司的identi-FINDER手持式NaI(Tl)谱仪,晶体大小为1"~2",662 keV处能量分辨率为7.5%,重约1 kg。



图1 Target identiFINDER

### 2.2 碘化铯探测器

CsI晶体的能量分辨性能与NaI相近。由于CsI的平均原子序数比NaI大,故探测效率更高。它的潮解性好于NaI(Tl),且不易碎裂,能承受较剧烈的冲击和振动,易于加工成不同的形状。CsI(Tl)晶体的发射光谱与硅光电二极管管较匹配,两者组合有利于谱仪进一步小型化。不过,由于电子学噪声的影响,光电二极管很难做大,这就限制了大体积CsI(Tl)晶体的使用。CsI(Tl)的光输出为NaI(Tl)的45%,而CsI(Na)则为85%。CsI(Na)适于与光电倍增管配合,但它也易潮解。纯CsI一般在液氮温度下使用,且主要用于低能 $\gamma$ 射线或带电粒子

探测<sup>[3]</sup>。

图2给出了一款来自Polimaster公司的PM1401K-identifier谱仪,它采用CsI(Tl)探测器,仅重650 g,在662 keV处能量分辨率为9%,工作环境温度范围是-30~+50℃。

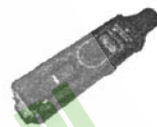


图2 Polimaster PM1401K-identifier

### 2.3 高纯锗探测器

在常见各种谱仪探测器中,高纯锗探测器具有最佳的能量分辨率。如同轴型HPGe对1.33 MeV $\gamma$ 射线全能峰的FWHM典型值为1.7~2.0 keV,好的可达1.3 keV<sup>[2]</sup>。因此,对于放射性核素识别应用而言,HPGe探测器能够提供近乎完美的分析性能。由于高纯锗材料密度大,平均原子序数高,并能制备得到较大的体积,故探测效率高。可以说它是目前唯一一种兼具高能量分辨性能和足够探测效率的谱仪探测器,能轻松满足ANSI N42.34手持式放射性核素探测与识别性能标准的要求;并且比之于体积更大的闪烁体,它的能量分辨率优势足以补偿其相对略低的探测效率,从而获得实际更短的放射性核素识别时间<sup>[4]</sup>。不过高纯锗探测器需要在液氮提供的低温条件下工作,因此长期以来它主要在固定实验室用于高性能分析。

近年来,国外发展了机械制冷等技术,使HPGe谱仪实现了小型化。这是就地放射性核素分析技术发展的一项重要成果。手持式HPGe谱仪具有最佳的核素分析性能,但是由于需要制冷,机电设计相当复杂,体积、重量可观,便携性并不理想。由于这种谱仪技术开发难度大,目前国际上只有Ortec和Canberra等少数公司拥有正式产品。图3给出了Ortec公司的Detective-Ex谱仪,它采用了 $\phi 50 \times 30$  mm的HPGe探测器,重量约10 kg。

### 2.4 碲锌镉探测器

CdZnTe是化合物半导体中的一种,是1980年代末从CdTe基础上发展起来的一种性能优越的探测材料。它禁带宽度大,电阻率高,无极化现象。能量分辨率介于NaI(Tl)和HPGe之间,可在室温下工作,性能稳定可靠,



图3 ORTEC Detective-Ex

读出方便,特别有利于小型化。CdZnTe探测器的出现,为高性能手持式核素分析应用提供了比较适宜的解决方案,因此倍受关注。

CdZnTe探测器技术经过近年的发展性能不断提高。晶体大小目前可达到几个 $\text{cm}^3$ ,配合共平面栅(CPG)电极设计技术,在662 keV处能量分辨率可达2~3%。但是,CdZnTe晶体大小与闪烁体和HPGe仍有明显差距,由此造成的低探测效率是其在实际应用中的主要缺陷。另外,目前国内还没有CdZnTe晶体和探测器的正式产品。

美国Lawrence Berkeley国家实验室研发一款袖珍谱仪,采用了晶体大小为 $15\text{mm} \times 15\text{mm} \times 10\text{mm}$  CPG型CdZnTe探测器,662 keV处能量分辨率为2.78%,仅重220 g,大小与功耗约比其它手持谱仪约小3~10倍<sup>[5]</sup>。如图4所示。



图4 LBNL CZT 谱仪

### 2.5 溴化镧探测器

$\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 和 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 是2000年后才出现的新型卤化物闪烁体,基本性能全面超越了NaI(Tl)晶体,是未来最有希望替代NaI(Tl)的闪烁体。目前 $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ 晶体已经实现国产化,而 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 仍依赖进口。溴化镧的性能略好于氯化镧。

$\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 晶体光输出大、能量线性好。它对662 keV  $\gamma$ 射线的能量分辨率可达2.8%<sup>[6]</sup>,与CZT探测器相近。目前这种晶体大小已能做到几个英寸,而且在相同重量情况下测量时

间比NaI(Tl)约快2~3倍<sup>[7]</sup>。另外,16 ns的光衰减时间也使其计数率效应远优于NaI(Tl)。 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 晶体的价格目前明显高于碘化钠,但有进一步降低的余地。因此,它具有很好的应用前景。溴化镧晶体的缺点主要有两个<sup>[8]</sup>:其一是存在固有放射性核素 $^{138}\text{La}$ 和 $^{227}\text{Ac}$ ,尤其是其中1468 keV干扰峰使其对 $^{40}\text{K}$ 的识别差于NaI(Tl)。不过实用中可将该峰用于稳谱。其二是100 keV以下低能段能量分辨性能相对于NaI(Tl)没有优势。

典型如CANBERRA InSpector 1000手持式谱仪,如图5所示,它可连接IPROL-1型 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 探测器,其中晶体大小为 $1.5'' \times 1.5''$ ,在662keV处能量分辨率为3.5%。



图5 CANBERRA InSpector1000

## 3 分析与总结

表1对上述五种探测器的性能及当前的经济技术状况进行了总结和评价,其中主要数据来自文献<sup>[9,10]</sup>。

从这几种探测器的性能来看,NaI(Tl)适于分析性能要求不高的一般应用,如工业、环保等领域。 $\text{CsI}(\text{Tl})$ 适于环境要求高而分析性能要求不高的应用,如测井、空间探测和军用等。 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 和CdZnTe适于性能要求较高的应用,如核与辐射恐怖主义防范与应急响应等。而HPGe适于高端核素分析应用。

总体来看,近年来手持式 $\gamma$ 谱仪用核辐射探测器技术领域的进展活跃。NaI(Tl)探测器目前仍然居于主导地位,并在满足非法运输核材料检测最低要求方面取得了明显进展<sup>[11]</sup>。但是CdZnTe和 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 探测器的出现及其进一步发展势必将对NaI(Tl)形成挑战。特别是考虑到核与辐射安全防范形势以及相关技术

的发展,核材料检测性能标准还有进一步提高的趋势。手持式 HPGe 谱仪由于受到技术复杂、经济代价高和不够便携等因素的影响,在可预见的时间内仍将局限在高端应用中。因此,

为了满足不断增长的高性能手持式放射性核素识别应用需求,国内应着重加强 CdZnTe、LaBr<sub>3</sub>:Ce 等新型谱仪探测器的研制及其在便携式谱仪中的应用研究。

表 1 五种典型手持式  $\gamma$  谱仪用核辐射探测器性能比较

探测器	NaI(Tl)	CsI(Tl)	LaBr <sub>3</sub> (Ce <sup>3+</sup> )	CdZnTe	HPGe
662keV 处能量分辨率	约 7.5%	约 9%	<3%	<3%	约 0.3%
密度(g/cm <sup>3</sup> )	3.67	4.51	5.29	5.78	5.33
相对于 NaI(Tl)的光输出	100%	45%	130%	—	—
光衰减时间(ns)	230	1000	16	—	—
最大发射波长(nm)	415	550	380	—	—
体积	大	大	大	小,约几 cm <sup>3</sup>	大
常温使用	是	是	是	是	否
便携性	较好	好	较好	好	差
潮解性	潮解	轻微潮解	潮解	不潮解	不潮解
价格(\$/cm <sup>3</sup> )	2	4.5	30	3000	500
是否依赖进口	否	否	是	是	否

参考文献:

[1] ITRAP, Illicit Trafficking Radiation Detection Assessment Program, Final Report, Peter Beck, Austrian Research Centers Seibersdorf, February 2001, [http://www.arcs.ac.at/G/volltext/ITRAP\\_Fin\\_Rep.pdf](http://www.arcs.ac.at/G/volltext/ITRAP_Fin_Rep.pdf)

[2] 国防科工委科技与质量司,电离辐射计量[M],北京:原子能出版社,2002.9

[3] 汲长松,核辐射探测器及其实验技术手册[M],北京,原子能出版社,1990.10

[4] Ronald M. Keyser, Timothy R. Twomey, Daniel L. Upp, A Comparison of an HPGe based and NaI-based Radionuclide Identifier (RID) for Radioactive Materials, [http://www.ortec-online.com/papers/esarda\\_05.pdf](http://www.ortec-online.com/papers/esarda_05.pdf)

[5] Paul N. Luke, Mark Amman, Julie S. Lee, Chinh Q. Vu, Pocket-size CdZnTe gamma-ray spectrometer, Nuclear Science Symposium Conference Record, 2004 IEEE Vol. 7, Issue 16-22, Oct. 2004: 4303-4306

[6] Saint-Gobain Crystals, BrillanCe380 scintillation material, <http://www.detectors.saint-gobain.com>

[7] B. D. Milbrath, B. J. Choate, J. E. Fast, W. K. Hensley, R. T. Kouzes, J. E. Schweppe, Comparison of LaBr<sub>3</sub>:Ce and NaI(Tl) Scintillators for Radio-Isotope Identification Devices, 2006, [http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-15831.pdf](http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-15831.pdf)

[8] Saint-Gobain Crystals, Performance Summary: BrillanCe Scintillators LaCl<sub>3</sub>:Ce and LaBr<sub>3</sub>:Ce, 2007, <http://www.detectors.saint-gobain.com>

[9] J. Gerl, Gamma Spectrometry beyond Chateau Crystal, GSI, <http://spiral2ws.ganil.fr>

[10] Saint-Gobain Crystals, Physical properties of common inorganic scintillators, <http://www.detectors.saint-gobain.com>

[11] T. R. Twomey, R. M. Keyser, Hand-held isotope identifiers for detection and identification of illicit nuclear materials trafficking, <http://www.ortec-online.com/papers/wcc0904.pdf>

## Review of the Detectors for Hand-held Gamma Spectrometers

XIAO Wu-yun, MAO Yong-ze, AI Xian-yun, WANG Shan-qiang, LIANG Wei-ping

(Department two, Research Institute of Chemical Defence, Beijing 102205, China)

(下转第 1023 页,Continued on page 1023)

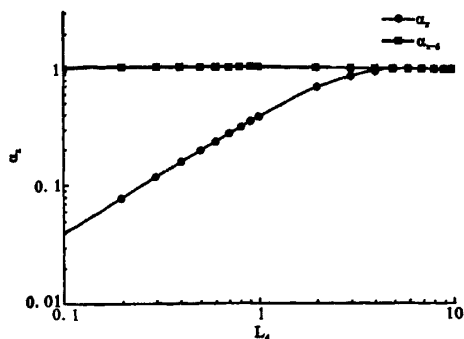


图3  $\alpha_x$  随  $L_d$  的变化( $\langle g \rangle < 1$ )

响。还可以将本文的方法推广用来研究辐射源能量分布、探测器能量响应对信号信噪比的影响,从而建立适用性更广的探测系统优化设计与评估方法。

参考文献:

[1] 盛亮. 可见光分幅相机研制及丝阵负载 Z 轴缩图像诊断[D], 博士论文, 北京: 清华大学工程物理系, 2007.  
 [2] 吕敏. 脉冲射线束测量中的统计起伏问题[J]. 物理学报, 1983, 32: 216.  
 [3] 宋朝辉, 张定康, 王奎禄, 等. 低强度脉冲射线测量中的统计起伏分析[J]. 核技术, 2004, 27(3): 217-221.  
 [4] Majid Rabbani, Rodney Shaw, Detective quantum efficiency of imaging systems with amplifying and scattering mechanisms[J]. Opt. Soc. Am. A, Vol. 4(5): 895-901.  
 [5] Moran S E, Ulich B L, Elkins W P, et al. Intensified CCD (ICCD) dynamic Range and noise performance[J], Proc of SPIE, 1997, 3173: 430-457.  
 [6] 吕敏, 王奎禄. 核试验脉冲射线测量技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

### Effect of Temporal-Spatial Response Function of Detector on Signal-to-Noise

SHENG Liang, QIU Meng-tong, HEI Dong-wei, WANG Kui-lu, WEI Fu-li

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-9, Xi'an, 710024)

**Abstract:** The theory expression of signal-to-noise of temporal-spatial resolved system is built, and the effect of temporal-spatial function on signal-to noise of detective pixel is studied. The results show the effect of temporal-spatial function on signal-to-noise is dependent on the performance of radiation source and the character of gain of detector.

**Key words:** Temporal-Spatial Function, Signal-to-Noise, Detector

(上接第 977 页, Continued from page 977)

**Abstract:** Basic performance indexes of gamma spectroscopic detectors are introduced. The main characteristics of detectors commonly used in hand-held gamma spectroscopy are analyzed, including high purity germanium, sodium iodide doped with thallium, cesium iodide doped with thallium, cadmium zinc telluride and lanthanum halide doped with cerium. It is pointed out that the advent and development of CdZnTe and LaBr<sub>3</sub>:Ce, and miniaturization of the HPGe spectrometer are the main progresses in hand-held spectroscopic detector techniques during the recent years. To satisfy the rising requirement of hand-held radioactive nuclide identification, it is recommended to enhance research on CdZnTe and LaBr<sub>3</sub>:Ce detectors and their application in hand-held spectrometers.

**Key words:** Hand-held gamma spectrometer, detector, radioactive nuclide identification

## 手持式 $\gamma$ 谱仪用核辐射探测器综述

作者: 肖无云, 毛用泽, 艾宪芸, 王善强, 梁卫平, XIAO Wu-yun, MAO Yong-ze, AI Xian-yun, WANG Shan-qiang, LIANG Wei-ping  
作者单位: 防化研究院第二研究所, 北京1044信箱201号, 102205  
刊名: 核电子学与探测技术   
英文刊名: NUCLEAR ELECTRONICS & DETECTION TECHNOLOGY  
年, 卷(期): 2008, 28(5)  
被引用次数: 2次

### 参考文献(11条)

1. J. Gerl Gamma Spectrometry beyond Chateau Crystal, GSI
2. Saint-Gobain Crystals Performance Summary: BrillanCe Scintillators LaCl<sub>3</sub>:Ce and LaBr<sub>3</sub>:Ce 2007
3. B. D. Milbrath; B. J. Choate; J. E. Fast; W. K. Hensley, R. T. Kouzes, J. E. Schweppe Comparison of LaBr<sub>3</sub>:Ce and NaI (Tl) Scintillators for Radio-Isotope Identification Devices 2006
4. Saint-Gobain Crystals BrillanCe380 scintillation material
5. Paul N. Luke; Mark Amman; Julie S. Lee; Chinh Q. Vu Pocket-size CdZnTe gamma-ray spectrometer 2004
6. T. R. Twomey; R. M. Keyser Hand-held isotope identifiers for detection and identification of illicit nuclear materials trafficking
7. Saint-Gobain Crystals Physical properties of common inorganic scintillators
8. Ronald M. Keyser; Timothy R. Twomey; Daniel L. Upp A Comparison of an HPGe-based and NaI-based Radionuclide Identifier (RID) for Radio-active Materials
9. 汲长松 核辐射探测器及其实验技术手册 1990
10. 国防科工委科技与质量司 电离辐射计量 2002
11. ITRAP Illicit Trafficking Radiation Detection Assessment Program, Final Report, Peter Beck, Austrian Research Centers Seibersdorf, February 2001

### 引证文献(2条)

1. 丁卫撑, 李元景, 王义, 方方, 王敏 可现场GPS定位的手持式  $\gamma$  能谱仪的设计[期刊论文]-自动化仪表 2010(2)
2. 刘跃龙, 屈国普 溴化镧闪烁晶体对湮灭光子线性吸收系数的计算[期刊论文]-南华大学学报(自然科学版) 2010(3)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hdzxytcjs200805027.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hdzxytcjs200805027.aspx)