

HPGe 探测器对圆形面源探测效率的研究

张小林^{1,2} 余功硕² 李元景¹ 许启初² 解 峰² 白 涛²

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 实验刻度了 GEM60P4 型高纯锗(High Purity Germanium, HPGe)探测器在 $H=250$ mm 处对三种圆形面源($\phi 24$ mm、 $\phi 80$ mm 和 $\phi 90$ mm)的峰探测效率, 结果表明, 这三种源的效率基本一致。采用 MCNP 模拟了 $\phi 40$ – 160 mm 内的圆形面源效率, 研究了探测效率随样品直径的变化关系, 并采用 Geant4 计算了圆形面源对同轴探测器的有效立体角。对 $\phi 90$ mm 以上的样品源, 探测效率随源直径的增大在逐渐减小, 且高能 γ 射线效率减小程度较快, 需采用标准源进行效率刻度。

关键词 高纯锗(High Purity Germanium, HPGe)探测器, 圆形面源, 探测效率

中图分类号 TL817.2

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.070404

高纯锗(High Purity Germanium, HPGe)探测器由于具有良好的能量分辨率、较高的探测效率和较宽的能谱响应等优点, 在核物理研究及核技术应用等领域被广泛应用。如在放射性核素核查和环境大气辐射监测等工作中, 一般采用抽气过滤法将环境大气中的气溶胶粒子过滤到滤材上, 然后采用 HPGe γ 谱仪无损分析气溶胶粒子中的放射性核素及其活度^[1-2], 其中 HPGe 探测器的效率曲线是准确定量分析的一个重要质量保障, 须事先通过标准源进行效率刻度。 γ 射线点源通常作为实验室的主要标准源, 而实际测试的样品通常是具有一定直径的圆形样品。根据工作需要, 本文刻度了 GEM60P4 型 HPGe 探测器对 $\phi 24$ mm、 $\phi 80$ mm 和 $\phi 90$ mm 三种圆形面源的探测效率。为了进一步研究圆形面源的探测效率随样品直径的变化关系, 采用 MCNP 程序和 Geant4 工具包模拟计算了 $\phi 40$ – 160 mm 圆形面源的效率和立体角。

1 刻度源制备

圆形面源的源盒由有机玻璃加工成圆柱形结构, 由盒体与盒盖通过螺纹连接组成, 其中盒体的底部厚度为 1 mm。在内径为 $\phi 24$ mm 盒体的底部铺有 1 层滤纸, 直径为 $\phi 90$ mm 和 $\phi 80$ mm 为气溶胶滤材效率刻度源, 滤材的材质为聚丙烯。

将一定量的 ^{152}Eu 标准溶液滴入 $\phi 24$ mm 盒体的滤纸上, 使溶液均匀铺开, 室温下自然凉干后, 拧紧盒盖压实密封。

圆形效率刻度面源制备时, 事先在滤材的一个平面内均匀划分 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 的小方格, 便于在每个方格的中心滴加刻度溶液, 以保证刻度源溶液在滤材中均匀分布。由方格数和 1 滴溶液的质量估算所需的 ^{152}Eu 溶液总量, 并根据已知比活度的 ^{152}Eu 标准溶液质量来确定稀释倍数。将稀释过的 ^{152}Eu 溶液滴入方格中心, 由十万分之一分析天平减量法称量滴入的溶液总质量, 待滤材自然阴干后, 拧紧盒盖密封。

滤材刻度源的结构示意图见图 1。

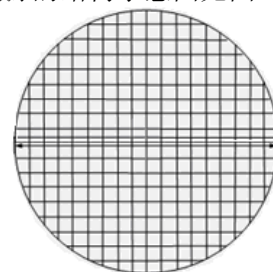


图 1 滤材刻度源结构

Fig.1 Structure of filter calibration source.

2 效率刻度

2.1 γ 谱仪系统

HPGe γ 谱仪系统由 GEM60P4 型 HPGe 探测器、DSPEC Plus 数字化谱仪、铅屏蔽体和计算机组成, 其中 HPGe 探测器的晶体大小为 $\phi 69.2\text{ mm}\times 69.2\text{ mm}$, 锗晶体外表面死层的厚度为 0.7 mm, 封装于一圆柱形铝壳内, 铝壳的顶部厚度为 1 mm, 与

第一作者: 张小林, 男, 1971 年出生, 2006 年于清华大学获核技术应用专业硕士学位, 从事实验核物理的研究

收稿日期: 2013-09-05, 修回日期: 2014-04-08

锗晶体的距离为 4 mm。探测器的相对效率为 60%，对 ^{60}Co 1 332.5 keV γ 射线峰的能量分辨率(半高宽, full width at half maximum, FWHM)为 1.90 keV。

2.2 效率刻度

^{152}Eu 为多 γ 射线放射源^[3]，在源与探测器表面距离较近测试时，符合相加效应严重，需采用系列单能 γ 射线标准源刻度 HPGe 探测器的峰效率和总效率进行校正。由于放射源半衰期和制备反应方式等限制，一般实验室不具备足够的单能源进行效率

刻度，为了减少符合相加效应的影响，通过改变与探测器同轴源架中心源托的位置，将放射源放置于探测器表面较远处进行测试。

源托与探测器表面的距离通常设置为 10 mm、30 mm、70 mm、150 mm、250 mm 和 410 mm，将效率刻度源置于距探测器表面 250 mm 的源托中进行测试，此时符合相加效应可忽略。无损分析样品中 ^{152}Eu 的 γ 能谱，GEM60P4 型 HPGe 探测器对 $\phi 90$ mm、 $\phi 80$ mm 和 $\phi 24$ mm 刻度源效率的刻度结果及其比值列于表 1。

表 1 三种面源的峰效率及其比值
Table 1 The efficiency and ratio of GEM60P4 HPGe detector.

能量 Energy / keV	效率 Efficiency / 10^{-3}			效率比值 Efficiency ratio		
	$\phi 24$ mm	$\phi 80$ mm	$\phi 90$ mm	$\phi 90$ mm/ $\phi 80$ mm	$\phi 90$ mm/ $\phi 24$ mm	$\phi 80$ mm/ $\phi 24$ mm
121.78	2.602	2.589	2.568	0.992	0.987	0.995
244.70	2.160	2.158	2.143	0.993	0.992	0.999
344.28	1.723	1.722	1.714	0.995	0.995	0.999
444.00	1.437	1.442	1.428	0.990	0.994	1.003
778.90	0.968	0.970	0.971	1.001	1.003	1.002
964.10	0.838	0.829	0.823	0.993	0.982	0.989
1 112.07	0.761	0.753	0.761	1.011	1.000	0.989
1 408.01	0.646	0.653	0.649	0.994	1.005	1.011

由表 1 中的效率比值可看出：在忽略样品源中滤材和滤纸这两种基质材料对 ^{152}Eu 的 121.78–1 408.01 keV γ 射线相对自吸收效应差异的情况下，GEM60P4 型 HPGe 探测器对 $\phi 90$ mm、 $\phi 80$ mm 和 $\phi 24$ mm 刻度源在 250 mm 处的探测效率在 2% 的不确定度范围内一致。 $\phi 24$ mm 圆形面源相对 GEM60P4 型 HPGe 探测器可视为一“点源”，当样品直径在 24–90 mm 变化，圆形面源与点源的探测效率基本一致。因此，对直径为 90 mm 以下的圆形滤材面源，可直接选用点源来刻度圆形面源的探测效率，不需再制备圆形面刻度源，这将大大简化圆形面刻度源的制备工作。但随着圆形面源直径的进一步增大，相对点源，其效率与样品直径的变化关系如何？为了节省制备不同直径大小实验刻度源的成本和工作量，采用 MCNP 程序模拟了不同直径圆形面源的探测效率。

2.3 MCNP 模拟效率

采用 MCNP 模拟了 GEM60P4 型 HPGe 探测器对 $\phi 40$ –160 mm 共 11 种规格大小的圆形面源的探测效率^[4–6]， $\phi 80$ mm 和 $\phi 90$ mm 圆形面源探测效率的模拟值与实验标定值的偏差小于 1.5%。圆形面源探

测效率的 MCNP 模拟结果见表 2，并以点源的效率为基准，对其余几何尺寸样品的效率进行归一，得到 121.78 keV 和 1 408.01 keV γ 射线探测效率的相对值也列于表 2。

由表 2 得到，对直径小于 90 mm 的样品源，探测效率在 2% 的不确定度范围内一致，表 2 中 $\phi 40$ mm、 $\phi 80$ mm 和 $\phi 90$ mm 圆形面源的 1 408.01 keV γ 射线峰相对效率大于 1.000，最大差别为 1.1%，这是由于效率刻度中不确定度因素的影响。

对直径大于 90 mm 的样品源，探测效率随样品源直径的增大在逐渐减小。当样品直径在不断增大时，放射源相对 HPGe 探测器所张的有效立体角在减小，放射源发射的 γ 射线斜射进入探测器灵敏体积进而穿出锗晶体的几率在增大^[2]，高能 γ 射线与锗晶体发生相互作用沉积能量的几率在减小，因而探测效率总体呈下降趋势，且高能 γ 射线探测效率下降较快。因此 GEM60P4 型 HPGe 探测器对 250 mm 处直径大于 90 mm 圆形面源的探测效率，随着源直径的增大，效率随之减少。因此，须考虑源形状的差别对于探测效率的影响，此时需通过效率标准源进行效率刻度。

表2 MCNP 模拟的 GEM60P4 型 HPGe 探测器的探测效率
Table 2 MCNP simulation of GEM60P4 HPGe detector efficiency.

直径	121.78 keV		1 408.01 keV	
Diameter	效率	相对效率	效率	相对效率
/ mm	Efficiency	Relative efficiency	Efficiency	Relative efficiency
	/ 10 ⁻³		/ 10 ⁻³	
24	2.602	1.000	0.646	1.000
40	2.597	0.998	0.648	1.003
50	2.594	0.997	0.645	0.998
60	2.583	0.993	0.645	0.998
70	2.576	0.990	0.640	0.991
80	2.589	0.995	0.653	1.011
90	2.568	0.987	0.649	1.005
100	2.549	0.980	0.628	0.972
110	2.548	0.979	0.626	0.969
120	2.543	0.977	0.623	0.964
130	2.54	0.976	0.621	0.961
140	2.543	0.977	0.620	0.960
150	2.54	0.976	0.616	0.954
160	2.535	0.974	0.614	0.950

2.4 立体角的计算

采用 Geant4 工具包计算了同轴锗探测器对圆形面源的有效立体角。Geant4 是由欧洲核子研究中心(CERN)主导开发的一种 Monte Carlo 模拟计算工具, 主要应用于高能粒子在介质材料运输过程中的模拟。

在能谱测试中, 源架与探测器两者的中心轴线重合, 样品源置于源架中心处的源托中, 因此圆形面源与探测器的两个平面平行, 且中心轴线重合。设圆形面源的半径为 R_1 , HPGe 探测器的半径为 R_2 , 晶体长度为 h , 两个平面的距离为 a 。探测器和圆形面源的几何位置示意图见图 2^[7-8]。

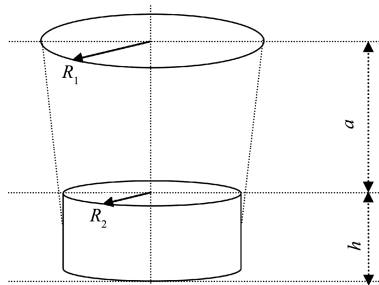


图2 同轴探测器与圆形面源的几何位置图
Fig.2 Coaxial detector and disc source geometry.

由图 2 的模型结构, 按照蒙特卡罗原理, 将源粒子均匀分布在圆形面源上($\phi 24\text{--}160\text{ mm}$), 发射方向为 4π 各向同性。源粒子类型为 Geant4 程序自带

的虚拟粒子, 该粒子不与任何物质发生散射或者产生次级粒子。探测器外壳表面距离圆形面源距离 a 为 250 mm, 外壳直径为 415 mm, 放射源发射的 γ 射线经铝密封外壳后进入到锗晶体, 与晶体发生相互作用。假设源粒子抽样总数为 N_0 , 最终到达探测器外表面的粒子统计数为 N_1 , 则可得该几何条件下圆形面源对于探测器圆柱形锗晶体有效体积的平均立体角 $\overline{\Omega}$ 为^[9-10]:

$$\overline{\Omega} = 4\pi \cdot \frac{N_1}{N_0} \quad (1)$$

$\overline{\Omega}$ 的计算结果见表 3, 以 $\phi 24\text{ mm}$ 圆形面源的立体角为基准, 对其余尺寸样品的立体角进行归一, 归一后的立体角和表 2 中相对效率也列于表 3 中, 以便与效率进行对比分析。

从表 3 中可看出, 对直径小于 90 mm 的圆形面源, 源对探测器的立体角在 2% 的范围内一致。立体角随着源直径增大而减小, 如 $\phi 130\text{ mm}$ 和 $\phi 160\text{ mm}$ 圆形面源相对 $\phi 24\text{ mm}$ 圆面点源, 立体角分别减小了 3.7% 和 4.3%。

表3 Geant4 计算的圆形面源对同轴 HPGe 探测器的立体角
Table 3 Geant4-calculated solid angle of disc source to coaxial HPGe detector.

直径	立体角	相对立体角	相对效率	
			121.78 keV	1 408.01 keV
Diameter	Solid angle	Relative solid angle		
/ mm				
24	0.084 6	1.000	1.000	1.000
40	0.084 4	0.997	0.998	1.003
50	0.084 2	0.995	0.997	0.998
60	0.083 9	0.991	0.993	0.998
70	0.083 6	0.988	0.990	0.991
80	0.083 3	0.984	0.995	1.011
90	0.082 9	0.980	0.987	1.005
100	0.082 5	0.975	0.980	0.972
110	0.082 1	0.971	0.979	0.969
120	0.081 8	0.967	0.977	0.964
130	0.081 5	0.963	0.976	0.961
140	0.081 3	0.961	0.977	0.960
150	0.081 1	0.958	0.976	0.954
160	0.080 9	0.956	0.974	0.950

立体角实质是反映了放射源辐射出的总粒子数进入到探测器中的几率大小。GEM60P4 型 HPGe 探测器锗晶体的直径和长度均为 69.2 mm, 因此 $\phi 70\text{ mm}$ 以下圆形面源发射的 γ 射线是正向射入到锗晶体中, 因此其探测效率和立体角近乎一致。由

表 3 中的结果可看出, 对 $\phi 70$ mm 的圆形面源, 立体角的差别为 1.2%。随滤材源的直径在逐渐增大时, 立体角呈减小的变化趋势, 放射源辐射的 γ 射线斜射穿过铝密封外壳后进入到晶体的射线数将增加, 因此与正向入射相比较, γ 射线在进入到锗晶体前穿过铝吸收层的厚度将增加, 因此探测效率减小。对 1408.01 keV 的高能 γ 射线, 斜射后与晶体发生相互作用, 相对 121.78 keV 低能 γ 射线, 穿出晶体的几率较大, 因此 1408.01 keV 的探测效率下降较快。滤材源直径继续变大时, γ 射线入射到晶体的概率在减少且穿出晶体的几率将继续增大, 如 $\phi 100$ mm 圆形面源, 121.78 keV 和 1408.01 keV 的 γ 射线相对效率分别下降了 2.0% 和 2.8%, 而对 $\phi 160$ mm 圆形面源, 下降了 2.6% 和 5.0%。

由表 3 中数据得到, 相对立体角与 121.78 keV、1408.01 keV 的相对效率的比值在 2.0%、3.0% 的范围内一致, 因此通过分析不同大小圆形面源对探测器立体角的变化, 可研究探测效率随样品尺寸的变化关系。

为了与 $H=250$ mm 处的圆形面源探测效率随源直径变化关系进行对比, 采用 MCNP 程序模拟计算了 GEM60P4 型 HPGe 探测器表面处不同几何尺寸圆形面源的探测效率, 以 $\phi 24$ mm 圆形面源的效率为基准, 探测效率的相对值列于表 4。

表 4 MCNP 模拟的 GEM60P4 型 HPGe 探测器表面的探测效率

Table 4 MCNP simulation of GEM60P4 HPGe detector surface efficiency.

直径 Diameter / mm	相对效率 Relative efficiency	
	121.78 keV	1408.01 keV
24	1.000	1.000
40	0.966	0.948
50	0.924	0.900
60	0.864	0.842
70	0.780	0.776
80	0.694	0.709
90	0.621	0.648
100	0.562	0.595
110	0.513	0.549
120	0.471	0.507
130	0.435	0.471
140	0.403	0.437
150	0.375	0.407
160	0.350	0.380

与 $H=250$ mm 处相比较, 探测器表面处样品的立体角较大, 但随样品直径变大, 立体角减小的程度较快, 因此探测效率下降且变化显著。斜射入锗晶体 γ 射线的径迹随样品直径的增大而逐渐平直, 由于探测器外壳对不同能量 γ 射线吸收程度的差异, 使低能 γ 射线探测效率减小的程度比高能射线较强。

3 结语

本文通过实验和模拟计算, 研究了 GEM60P4 型 HPGe 探测器对距离探测器表面 250 mm 处圆形面源的探测效率与样品直径的变化关系。结果表明: 在源距探测器表面 250 mm 处, GEM60P4 型 HPGe 探测器对 $\phi 90$ mm 以内圆形面源的探测效率和立体角均在 2% 的范围内一致, 但随着样品直径的继续增大, 探测效率和立体角均逐渐下降, 两者下降程度在 3.0% 内一致, 且高能 γ 射线探测效率下降较快。

得到 GEM60P4 型 HPGe 探测器对距表面 250 mm 处直径在 90 mm 以内圆形面源的探测效率, 与相同距离处点源的效率一致。因此, 可通过点源来标定圆形面源的效率, 这将大大简化圆形面刻度源的制备工作, 节省实验的成本和工作强度; 但对直径大于 90 mm 的圆形面源, 需通过标准源进行效率刻度。

参考文献

- 常印忠, 王旭辉, 王军, 等. 大气气溶胶样品中放射性核素分析(I)气溶胶样品中放射性 γ 能谱分析方法[J]. 核技术, 2004, 27(6): 430-434
CHANG Yinzong, WANG Xuhui, WANG Jun, et al. Radionuclides analysis of air aerosol sample (I) the gamma-ray spectrometric method[J]. Nuclear Techniques, 2004, 27(6): 430-434
- 张佳媚, 师全林, 包敏, 等. 气溶胶滤材样品 γ 探测效率与测量源尺寸的关系[J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23(3): 212-216
ZHANG Jiamei, SHI Quanlin, BAO Min, et al. Relation between γ -ray detection efficiency and the source size of prepared aerosol filter sample[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, 23(3): 212-216
- Firestone R B. Table of isotope CD-ROM[R]. Eighth Ed, Version 1.0. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 1996: 5755-5757
- 朱传新, 陈渊, 郭海萍, 等. 高纯锗探测器探测效率研究[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(2): 191-194
ZHU Chuanxin, CHEN Yuan, GUO Haiping, et al. The

- detecting efficiency of HPGe detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, **26**(2): 191–194
- 5 张建芳. 高纯锗探测器探测效率的 MCNP 模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2009
ZHANG Jianfang. The MCNP simulation of HPGe detector efficiency[D]. Changchun: Jilin University, 2009
- 6 张新军, 王世联, 王军, 等. 大气颗粒物滤材样品探测效率的模拟计算[J]. 原子能科学技术, 2008, **42**(增刊): 303–306
ZHANG Xinjun, WANG Shilian, WANG Jun, *et al.* Efficiency simulation of atmospheric particle filter sample[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, **42**(Suppl): 303–306
- 7 刘宗良, 周剑良. 圆面探测器对圆面源几何因子的蒙特卡罗计算[J]. 科技咨询, 2008, **6**(6): 251–254
LIU Zongliang, ZHOU Jianliang. Calculation of geometry efficiency of disc source to disc detector by Monte Carlo method[J]. Science and Technology Information, 2008, **6**(6): 251–254
- 8 魏信苗, 吴治华. 圆盘探测器几何因子的一种计算方法[J]. 核技术, 1991, **14**(1): 48–53
WEI Xinmiao, WU Zhihua. A new and simple method of calculation geometric factor of disc detector[J]. Nuclear Techniques, 1991, **14**(1): 48–53
- 9 张艳丽. 用小立体角法测定 α 放射性样品质量[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2005, **23**(2): 155–157
ZHANG Yanli. Determine α radioactive sample quality with small solid angle law[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science), 2005, **23**(2): 155–157
- 10 王俊阳. 低本底高纯锗探测器探测效率及其屏蔽系统的 GEANT4 模拟[D]. 郑州: 河南师范大学, 2011
WANG Junyang. Low background High Purity Germanium detector detection efficiency and its shielding system of GEANT4 simulation[D]. Zhengzhou: Henan Normal University, 2011

Study of HPGe detector peak efficiency by disc source

ZHANG Xiaolin^{1,2} YU Gongshuo² LI Yuanjing¹ XU Qichu² XIE Feng² BAI Tao²

¹(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

²(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract Background: Calibrating the detection efficiency accurately is the key process to the disc filter sample activity detected by High Purity Germanium (HPGe) gamma spectrometer, and the diameter of the disc filter source is varied with the specification of the sampler filter. **Purpose:** To study further the relation between detection efficiency and the source size, the HPGe detector peak efficiency (relative detective efficiency is 60%) was performed for disc sources with diameters of $\varnothing 24$ mm, $\varnothing 80$ mm and $\varnothing 90$ mm, respectively. **Methods:** The efficiency and the solid angle for disc source with diameter ranging $\varnothing 40$ –160 mm were simulated using the MCNP and the Geant4. **Results:** The result shows that the detecting efficiency of three sources is consistent, and the efficiency gradually decreases with the increasing size of the disc source with diameter greater than $\varnothing 90$ mm. **Conclusion:** The efficiency for disc sources with diameter less than $\varnothing 90$ mm is directly calibrated by the standard point sources, while for disc sources with diameter larger than $\varnothing 90$ mm which is needed to be calibrated by the standard disc sources.

Key words High Purity Germanium (HPGe) detector, Disc source, Detecting efficiency

CLC TL817.2