

# 蒙特卡罗法模拟 P 型同轴高纯锗探测器结构 对探测效率影响

阙子昂, 郝晓勇, 何高魁, 刘洋, 赵江滨, 王超

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 为确定高纯锗探测器的全能峰效率(FEPE), 进行放射性核素定量分析, 本研究针对实际测量的高纯锗晶体尺寸构建探测器 MC 模型; 通过实验和模拟结合的方法优化 MC 模型死层厚度, 使得模拟与实际探测效率的平均相对偏差为 1.74%; 模拟分析高纯锗晶体结构和铜电极棒尺寸变化对全能峰效率(FEPE)的影响。结果表明, 低能伽玛射线对晶体顶端结构变化较为敏感, 晶体顶部圆角化边缘对 59.5 keV 射线效率影响相对偏差最大为 19.21%; 底部保护环的存在对高能射线探测效率的影响随入射能量和源距增加而变大, 而对低能射线的影响可以忽略不计; 由于铜电极棒对射线造成阻挡, 其直径的变化导致高能射线探测效率最高下降 1.78%。本研究结果可为优化探测器结构设计和提升 FEPE 校准精度提供参考依据。

**关键词:** 高纯锗晶体结构; 铜电极棒; 全能峰效率; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: TL818 文献标志码: A 文章编号: 1000-7512(2025)06-0553-08

doi: 10.7538/tws.2024.youxian.082

## Simulation of Structural Effects on Detection Efficiency in P-Type Coaxial High-Purity Germanium Detectors Using the Monte Carlo Method

QUE Zi'ang, HAO Xiaoyong, HE Gaokui, LIU Yang, ZHAO Jiangbin, WANG Chao

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Determining the full-energy peak efficiency (FEPE) of a high-purity germanium (HPGe) detector through experimental methods or Monte Carlo (MC) simulations is crucial for accurate radionuclide quantification. This study presents a meticulously constructed MC model tailored to the actual dimensions of the measured HPGe crystal. Optimization of the dead layer thickness within the model was achieved through an integrated approach of experimental validation and simulation efforts, yielding a minimal average relative deviation of 1.74% between simulated and actual detection efficiencies. Subsequent simulations were conducted to assess the impact of structural modifications in the HPGe crystal and variations in the diameter of copper electrode rods on FEPE. The findings indicate that low-energy gamma rays exhibit increased sensitivity to modifications at the crystal's top, with the rounded edges displaying a substantial relative deviation in detection

收稿日期: 2024-07-22; 修回日期: 2024-10-28

基金项目: 国防科工局核能开发科研项目(No. HNKF202224(28))

通信作者: 何高魁

efficiency of up to 19.21% at 59.5 keV. Additionally, the presence of a protective ring at the crystal's base significantly enhances the detection efficiency for high-energy rays as incident energy and source distance increase, while its impact on low-energy rays remains minimal. Changes in the diameter of the copper electrode rods, which act as ray-blocking devices, were found to decrease the detection efficiency of high-energy rays by as much as 1.78%. These insights are pivotal for refining detector design and advancing the calibration precision of FEPE in scientific applications.

**Key words:** high-purity germanium crystal structure; copper electrode contact; full energy peak efficiency; monte carlo simulation

高纯锗探测器以其高的能量分辨率和探测效率,成为伽玛射线光谱研究的首选探测器。在放射性核素定量分析中,确定探测器的全能峰效率(FEPE)是关键。FEPE校准的精度不仅影响放射性核素种类的识别能力,还直接关系到样品中核素含量的准确定量,因此精确校准FEPE至关重要。蒙特卡罗(MC)模拟作为高纯锗探测器结构设计过程中的一种建模仿真方法,已被证实有效<sup>[1]</sup>。通过MC模拟可以计算不同几何结构的高纯锗晶体以及不同放射源参数下的FEPE,从而优化探测器结构设计,并确保其在实际应用中的准确性与可靠性<sup>[2]</sup>。

MC模拟的关键在于构建准确的探测器模型,其中几何参数的精确度直接影响模拟结果的真实性,影响因素包括晶体长度、半径、孔深、死层厚度、铜电极棒尺寸等。根据制造商提供的产品参数,或者采用计算机断层扫描(CT)技术对现有探测器建模,这种方法的实际参数与模型参数之间可能存在偏差,且模型可能未详尽描述所有因素,例如晶体孔的深度、晶体顶部的圆角化边缘和底部保护环的深度等<sup>[3]</sup>。另外在模型参数优化过程中,虽然枚举法常用于调整多个参数,但会降低蒙特卡罗计算的效率。与此相比,本研究从探测器的制备阶段入手,对高纯锗晶体在切割、成形和打孔等工艺完成后直接进行精确测量,获得更准确的物理参数。这不仅减少需要调整的参数数量,还可提高HPGe探测器蒙特卡罗模型参数优化的效率<sup>[4]</sup>。

本研究通过对探测器尺寸进行实际测量,完成蒙特卡罗模型的建立。通过改变入射射线能量和放射源距离,研究高纯锗晶体结构、铜电极棒尺寸的变化对探测效率影响,拟为后续优化探测器结构设计和提升FEPE校准精度提供重

要的技术手段。

## 1 探测器及建模

探测器模型示于图1。采用同轴P型高纯锗探测器进行实验,实测高纯锗晶体的尺寸为 $\phi 61\text{ mm} \times 63\text{ mm}$ 。探头的结构包括高纯锗晶体、探测器外壳、晶体封装筒、入射窗及铜电极棒等。探测器的主要尺寸参数列于表1,高纯锗晶体封装在外环半径为68 mm、厚度为2 mm的铝制封装筒中,入射窗的厚度为1.5 mm。基于上述参数,利用MCNP5软件对探测器进行建模。设定发射粒子为 $\gamma$ 光子,发射位置位于距离探测器表面25 cm的轴心处,发射方向为 $4\pi$ 立体角的各向同性<sup>[5]</sup>。通过模拟 $1 \times 10^8$ 个 $\gamma$ 光子在高纯锗晶体中的各种相互作用,计算高纯锗探测器对不同能量 $\gamma$ 射线的模拟探测效率<sup>[6]</sup>。

## 2 实验方法

### 2.1 实验设置

本研究采用四台由相同尺寸大小晶体制备成的高纯锗探测器进行测试实验,所使用的放射源信息列于表2。放射源分别置于距探测器

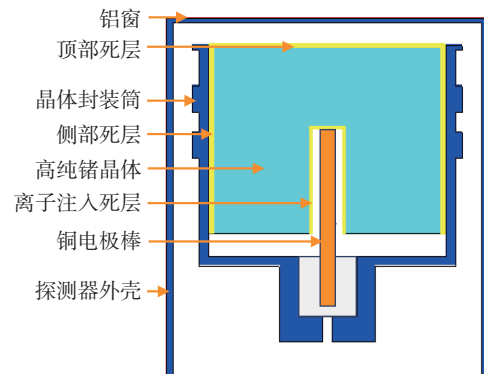


图1 探测器模型

Fig.1 Detector model

表1 探测器主要参数

Table 1 Main parameters of the detector

物理特性	参数
晶体类型	P型
晶体直径/mm	61
晶体长度/mm	63
晶体到窗距离/mm	5
晶体孔深/mm	34
孔直径/mm	8
入射窗厚度(铝)/mm	1.5
离子注入死层厚度/mm	0.0004
死层厚度/mm	1
相对效率	>45%
探测器偏压/V	2500~3000

入射窗端面 25、15、5 cm 处的轴向中心位置进行测量。HPGe 探测器产生的信号输入到前置放大器,并经过 ORTEC 673 主放大器和 ORTEC 928 多道分析器进行放大滤波成形,通过 Tektronix MDO3034 示波器观察波形并对其进行极零调节,最后使用 MAESTRO 软件进行能谱分析<sup>[7]</sup>。

根据《锗  $\gamma$  射线谱仪校准规范 JJF 1850-2020》规定,采用式(1)计算全能峰探测效率  $\varepsilon(E)$ ,在相同测量条件下,进行本底数据测量。实际应用中,NaI(Tl)探测器常被用于校准其他类型的  $\gamma$  射线探测器的探测效率,来衡量不同探测器效率值大小。全能峰相对探测效率定义为探测器上方轴向源距 25 cm 时,锗  $\gamma$  射线探测器与 NaI(Tl)探测器(直径 7.62 cm,高 7.62 cm)对  $^{60}\text{Co}$  点源 1332.5 keV  $\gamma$  射线全能峰效率之比。

$$\varepsilon(E) = \frac{n(E) - n_b(E)}{I(E) \cdot A} \quad (1)$$

式中,  $n(E)$ , 能量为  $E$  的伽马射线全能峰探测计数率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $n_b(E)$ , 能量为  $E$  的伽马射线峰位本底计数率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $I(E)$ , 能量为  $E$  的伽马射线的分支比;  $A$  为放出该伽马射线核素经过修正后的活度, Bq。

实验探测效率和模拟探测效率的相对偏差

$R$  定义为:

$$R = \frac{|D_1 - D_2|}{D_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $D_1$  为模拟探测效率,  $D_2$  为实验探测效率。

## 2.2 实验方法

### 2.2.1 探测器能量刻度与全能峰效率验证

探测器能量刻度是标定射线能量与全能峰峰位道址之间的关系,能量线性度越好就能更准确地辨别样品中放射性核素种类。采用特征峰能量已知的  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$  作为刻度源,根据高纯锗探测器测得的伽马能谱中每组特征峰的峰位道址,建立道址和能量的函数关系。

### 2.2.2 死层厚度调节

为了构建更为准确的探测效率计算几何模型,对相对误差最小的探测器 2 号的死层厚度参数进行优化。利用  $^{241}\text{Am}$  (59.5 keV) 和  $^{137}\text{Cs}$  (661.6 keV) 的中低能特征射线,对死层厚度从 0.6~1.2 mm,以 0.1 mm 为间隔进行优化评估,先对前死层厚度进行调节,然后将前死层厚度固定为优化值后调节侧死层厚度。计算源距分别为 25 cm、15 cm 和 5 cm 时模拟效率的相对误差平均值,并将其与实验值进行比较来评估模型优化效果<sup>[8-9]</sup>。

### 2.2.3 晶体结构对探测效率影响

高纯锗晶体打孔及成型工艺过程中,对于尺寸较大的晶体,通常需要对晶体顶端以及孔最深处进行圆角化处理<sup>[10]</sup>。通过改变几何结构,可以改善探测器内部的电场分布,减小内部电场畸变或不均匀性对探测器电荷收集的影响。此外,还需在探测器底部增加保护环,以减小表面漏电流对能量分辨率的影响<sup>[11-13]</sup>。

对高纯锗探测器蒙特卡罗模型的几何结构进行细微调整,在其上端面边缘处进行圆角化处理(图 2),以及在下端面靠近深孔处增加了保护环<sup>[14]</sup>,与上述死层优化后的模型进行比较,分析高纯锗晶体结构的变化对不同能量和源距探测效率的影响。晶体上端面倒角圆弧半径 10 mm,

表2 标准源信息

Table 2 Standard source information

放射源	能量/keV	分支比	半衰期/a	修正活度/Bq	相对合成不确定度/%	相对扩展不确定度/%
$^{241}\text{Am}$	59.5	35.9	458	$8.81 \times 10^3$	1.13	2.3
$^{137}\text{Cs}$	661.6	85.1	30.17	$6.10 \times 10^3$	0.88	1.8
$^{60}\text{Co}$	1173.2	99.97	5.27	$1.669 \times 10^4$	0.99	2.0
	1332.5	99.98				

晶体内孔最深处圆弧半径 8 mm, 晶体下端面保护环深度为 4 mm, 宽度为 5 mm。

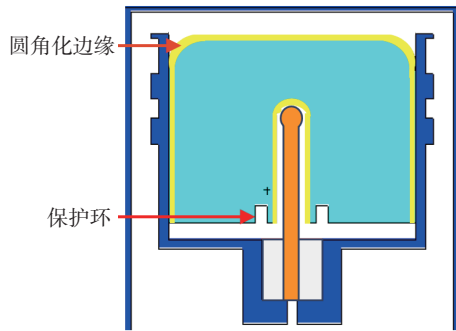


图 2 高纯锗晶体圆角化

Fig.2 Rounding of high purity germanium crystals

**2.2.4 铜电极棒尺寸对探测效率影响** 铜电极棒的主要作用是从高纯锗探测器的孔内电极引出信号, 同时为晶体提供支撑和热传导。入射光子在将所有能量沉积到晶体之前, 可能会与铜电极棒发生相互作用, 探测器设计过程中铜电极棒结构的差异可能会导致探测效率不同程度的降低<sup>[15]</sup>。保持源距 25 cm 不变, 改变铜电极棒直径, 在 59.5~1332.5 keV 伽马射线能量范围内, 分析其直径变化对高纯锗探测器的全能峰探测效率。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 探测器能量刻度与全能峰效率验证

实验测量得到特征能量 59.5、661.6、1173.2、1332.5 keV 对应的道址为 243、2705、4793、5446,

拟合得到  $\gamma$  射线能量与全能峰位道址的曲线示于图 3。通过线性拟合得到能量( $E$ )-全能峰道址( $x$ )数关系为  $E = 0.2447x + 0.2924$ , 线性相关系数  $R^2=1$ , 拟合度好。

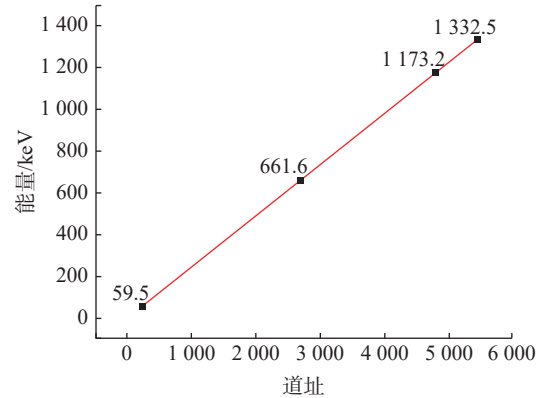


图 3 探测器能量刻度曲线

Fig.3 Energy calibration curves for detectors

对四台高纯锗探测器的  $^{60}\text{Co}$  1332.5 keV  $\gamma$  射线全能峰探测效率进行测量, 并将其与蒙特卡罗模拟探测效率值进行比较, 结果列于表 3。从表 3 中可以看出, 当探测器未达到全耗尽偏压时, 其探测效率会出现较大偏差, 此时得到的探测效率数值不准确, 不宜用于进一步的比较分析。此外, 即便探测器由相同尺寸的高纯锗晶体制成, 由于 PN 结特性的差异, 所需的全耗尽偏压也不尽相同。因此, 在进行能谱测量时, 需要确保在全耗尽状态下, 探测器才能提供准确的探测效率数据, 从而保证长时间测量和数据采集的可靠性<sup>[16]</sup>。

表 3 四台高纯锗探测器实验与模拟探测效率比较

Table 3 A comparative study of experimental and simulated detection efficiencies in four high-purity germanium detectors

探测器序号	探测器偏压/V	实验探测效率	相对探测效率	模拟探测效率	相对偏差/%
1	2500	0.000556045	0.455037416	0.00053194	4.53
2	2500	0.000501498	0.417915285	0.00053194	5.72
2	2900	0.000551938	0.459864957	0.00053194	3.76
3	2500	0.000532863	0.444052242	0.00053194	0.17
3	3000	0.000556474	0.455394830	0.00053194	4.61
4	2900	0.000556608	0.463840074	0.00053194	4.63

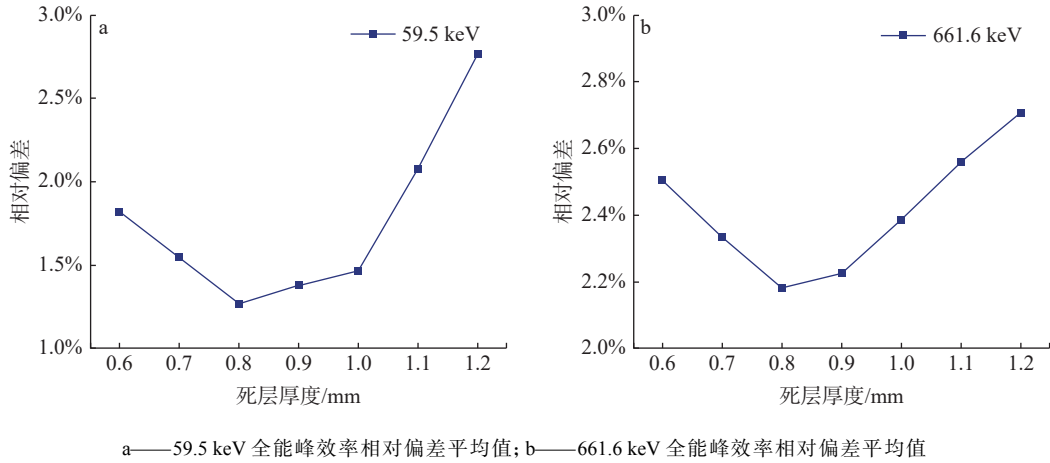
通过对探测器全耗尽后测得的实验探测效率和模拟计算得到的探测效率比较, 相对偏差均在 5% 以内。表明实验结果与模拟结果具有良好的 consistency, 验证了该模型的准确性, 以及使用蒙特卡罗模拟进行探测效率分析的可行性。

#### 3.2 死层厚度调节

在调整前死层过程中, 不同源距下 59.5 keV 和 661.6 keV 全能峰效率相对误差的平均值变化曲线示于图 4。将前死层厚度固定在之前的优化值, 在 0.6~1.2 mm 范围内优化侧死层厚度。

图5展示了在侧死层调节过程中, 59.5 keV 和 661.6 keV 能量下, 三个不同源距的效率相对偏

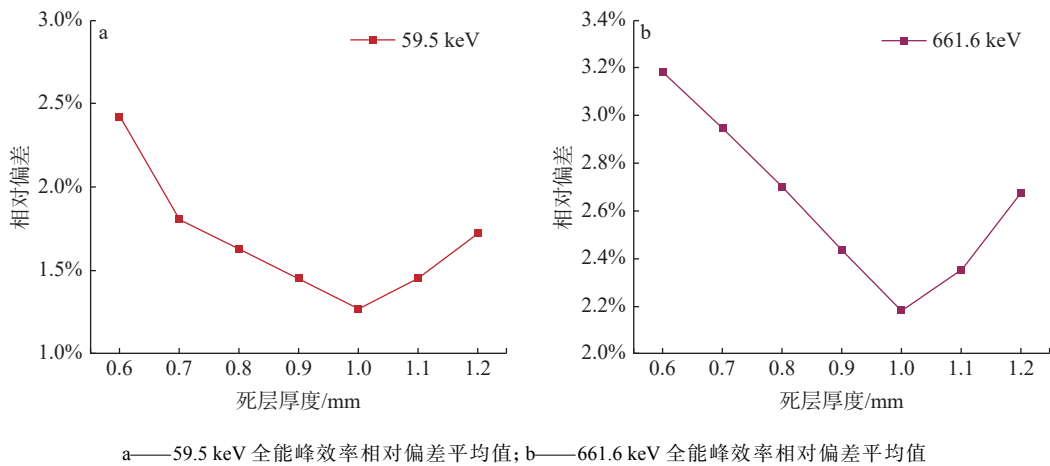
差平均值。根据能量和源到探测器距离优化后的前死层厚度为 0.8 mm, 侧死层厚度 1 mm。



a——59.5 keV 全能峰效率相对偏差平均值; b——661.6 keV 全能峰效率相对偏差平均值

图4 探测器前死层厚度调节

Fig.4 Adjustments to front dead layer thickness



a——59.5 keV 全能峰效率相对偏差平均值; b——661.6 keV 全能峰效率相对偏差平均值

图5 探测器侧死层厚度调节

Fig.5 Adjustments to side dead layer thickness

计算优化后高纯锗探测器模型在 59.5~1408 keV 能量范围内不同源距下的模拟效率曲线(如图6), 并于实验值对比。计算其相对偏差大小, 结果列于表4, 可知整体的相对偏差平均值为 1.74%, 表明模型优化效果较好。

### 3.3 晶体结构对探测效率影响

圆角化对不同能量和距离探测效率影响示于图7。从图7可以看出, 探测器圆角化对探测效率的影响相对较大, 特别是对于 200 keV 以下的低能伽马射线。随着源距离的减小, 这种影响不断增大。在 59.5 keV 时, 偏差最大达到 19.21%; 而对于中高能射线, 影响则在 3%~5% 之间。这是因为圆角化边缘减少了晶体的有效立体角。对于点源, 尤其是当源非常接近探测器时, 圆角

化边缘则减少了边缘区域的立体角, 进而减少了到达探测器的  $\gamma$  射线数量。对于 200 keV 以下的低能量  $\gamma$  射线, 由于在穿透物质时更容易被吸收, 因此影响更显著。

保护环对不同能量和距离探测效率影响示于图8。由图8可知, 高纯锗探测器底部保护环对探测效率的影响随着入射射线能量及源距离的增加而变大。由于低能射线的穿透力较弱, 对能量低于 200 keV 的射线, 这种影响几乎可以忽略不计。此外, 随着源距的增加, 射线路径变长, 导致散射概率增加, 对探测效率的影响也更显著。

### 3.4 铜电极棒尺寸对探测效率影响

点源距离设置为 25 cm, 将铜电极棒半径从

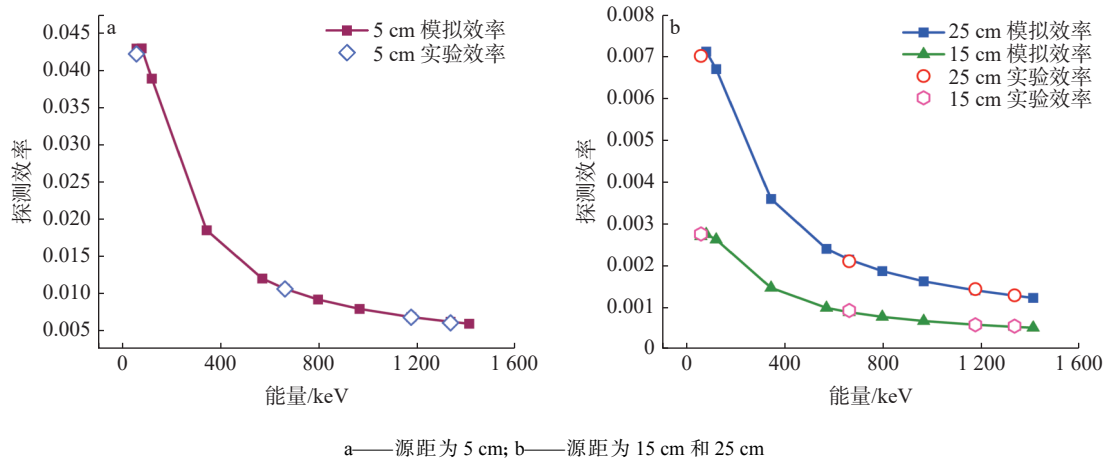


图 6 不同源距下模拟探测效率与与实验探测效率对比

Fig.6 Comparison of simulated detection efficiency and experimental detection efficiency at different source distances

表 4 不同源距实验探测效率与模拟探测效率值

Table 4 Experimental detection efficiency and simulated detection efficiency values at different source distances

放射源种类	能量/keV	源距离/cm	实验探测效率	模拟探测效率	相对偏差/%
<sup>60</sup> Co	1332.5	25	0.0005519	0.00053505	3.16
		15	0.0012885	0.00128112	0.57
		5	0.0061127	0.00626368	2.41
	1173.2	25	0.0005850	0.00058705	0.36
		15	0.0014384	0.00140738	2.21
		5	0.0068684	0.006898	0.43
<sup>137</sup> Cs	661.6	25	0.0009253	0.00088506	4.55
		15	0.0021036	0.00214318	1.85
		5	0.0106683	0.010685	0.16
<sup>241</sup> Am	59.5	25	0.0027557	0.00270116	2.02
		15	0.0070101	0.00701827	0.12
		5	0.0421768	0.0428969	1.68

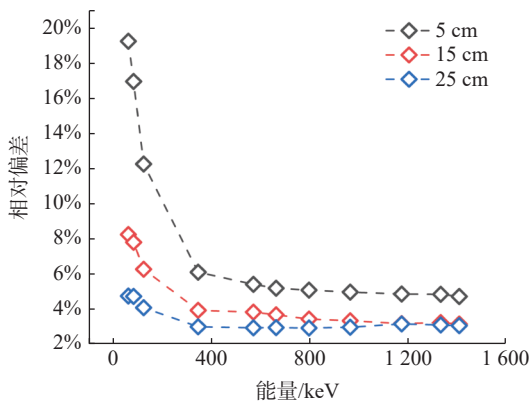


图 7 圆角化对不同能量和距离探测效率影响  
Fig.7 The impact of rounding on detection efficiency at different energies and distances

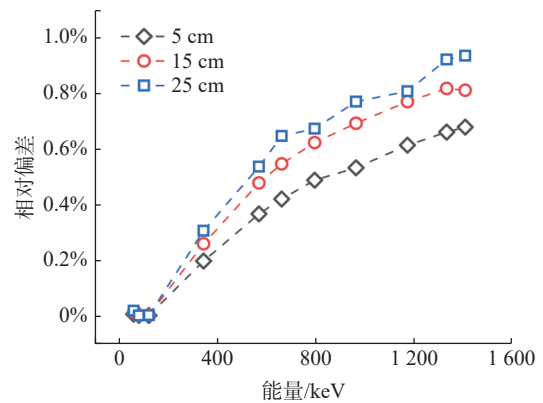


图 8 保护环对不同能量和距离探测效率影响  
Fig.8 The impact of protective rings on detection efficiency at different energies and distances

1 mm 增加到 3.5 mm, 间隔为 0.5 mm, 得到的探测效率值与无铜电极棒的效率值进行比较, 并计算相对偏差值。铜电极棒直径对探测效率影响示于图 9, 从图 9 可以看到, 对于 59.5 keV 的低能射线, 铜电极棒直径的变化对探测效率几乎没有影响。然而, 随着入射射线能量和铜电极棒直径的增加, 相对偏差逐渐增大。这主要是因为低能入射光子的光电效应截面较高, 在进入晶体孔内区域之前已损失大部分能量。而对于高能入射光子, 康普顿散射和电子对效应成为主要相互作用机制。通过康普顿效应, 光子改变方向并有较大可能穿过铜电极棒区域, 导致部分能量无法在晶体内沉积, 从而降低了探测效率<sup>[17]</sup>。

由于铜电极棒直径变化对高能光子的影响较大, 选取 661.6 keV 和 1332.5 keV 的伽马射线能量, 进一步分析在 5 cm、15 cm、25 cm 源距离下, 直径变化对探测效率的影响, 结果示于

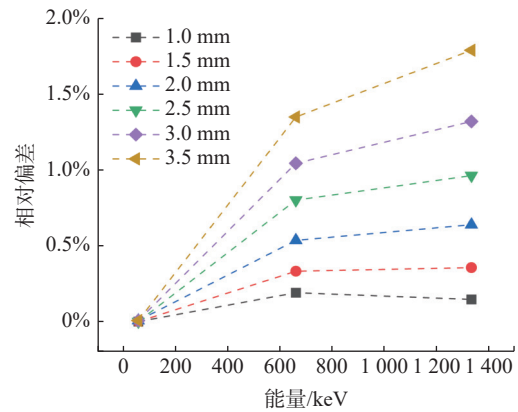
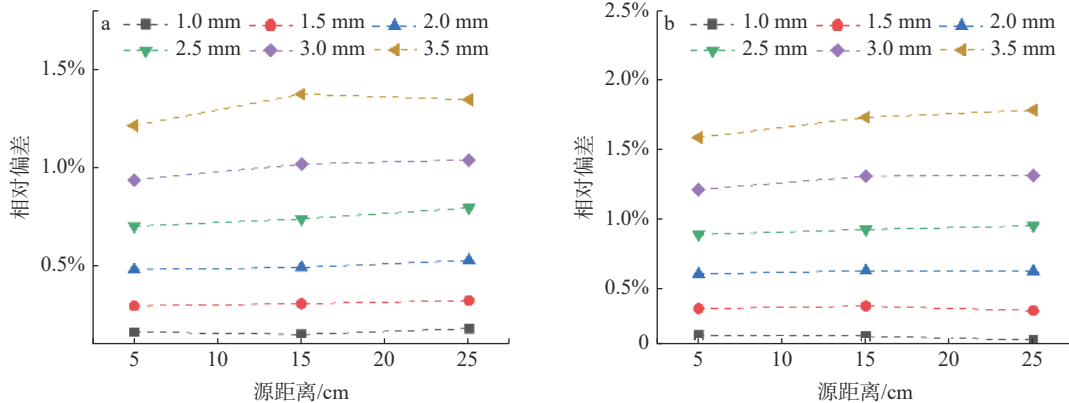


图 9 铜电极棒直径对探测效率影响

Fig.9 The impact of copper electrode contact diameter on detection efficiency

图 10。由图 10 可知, 当入射能量为 1332.5 keV, 源距离为 25 cm, 铜电极棒直径增加到 3.5 mm 时, 相对偏差达到了最大值 1.78%。然而, 当仅源距离发生变化时, 探测效率的相对偏差保持平稳, 影响不大。



a——对 661.6 keV 伽马射线探测效率影响; b——对 1332.5 keV 伽马射线探测效率影响

图 10 不同源距下铜电极棒直径对探测效率影响

Fig.10 The impact of copper electrode contact diameter on detection efficiency at different source distances

#### 4 结论

本研究针对实际测量的高纯锗探测器尺寸构建了探测器 MC 模型, 开展实验进行了探测器的能量刻度及全能峰效率的验证, 全耗尽状态下探测器的实验探测效率和 MC 模拟计算值相对偏差均在 5% 以内, 验证了模拟结果的准确性。进一步优化探测器 MC 模型死层厚度, 来构建更为准确的探测器效率计算几何模型, 最终优化后模型在 59.5~1408 keV 能量范围内探测效率的平均相对偏差为 1.74%。利用优化后的探测器模型分析高纯锗晶体结构、铜电极

棒尺寸的变化对探测效率影响, 结果表明, 1) 探测器圆角化对于 200 keV 以下低能伽马射线的探测效率影响较大。随着源距离的减小, 这种影响不断增大, 偏差最大达到 19.21%; 因此, 在模拟计算低能  $\gamma$  射线探测时, 可以使用圆角化边缘来更精确地建模, 避免探测效率的高估。探测器底部保护环对高能射线的探测效率影响随入射能量和源距增加而增大, 对低于 200 keV 的射线影响较小。2) 铜电极棒的直径增加在中到高能区间显著影响探测效率, 相对偏差最大值为 1.78%, 而在低能区影响甚微。此外, 铜接

触直径对探测器效率的影响几乎与源-探测器距离无关。因此针对高能射线探测时可以通过调整铜电极棒的直径,有效地提高探测效率。研究结果指出了探测器设计中不同结构参数对不同能量射线影响的差异性,为进一步优化探测器性能和提升 FEPE 校准精度提供了重要的依据。

#### 参考文献:

- [1] Dinh Chuong H, Huynh Duy Khang N, Thi Ngoc Trang L, et al. A comparative study on full-energy peak efficiency calibration methods for HPGe detector: Virtual point detector, curve fitting, and machine learning models[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2024, 1058: 168941.
- [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*, 2021, 174: 109748.
- [3] Gasparro J, Hult M, Johnston P N, et al. Monte Carlo modelling of germanium crystals that are tilted and have rounded front edges[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2008, 594(2): 196-201.
- [4] Conti C C, Salinas I C P, Zylberberg H. A detailed procedure to simulate an HPGe detector with MCNP5[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2013, 66: 35-40.
- [5] Trang L T N, Chuong H D, Thanh T T. Optimization of p-type HPGe detector model using Monte Carlo simulation[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, 327(1): 287-297.
- [6] 杨少波,王娟,罗琼,等. 不同类型 MC 程序模拟高纯锗探测器效率差异性研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2023, 43(5): 1101-1104.  
Yang Shaobo, Wang Juan, Luo Qiong, et al. Study on the differences of HPGe- $\gamma$  efficiency simulation using different MC programs[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2023, 43(5): 1101-1104 (in Chinese).
- [7] 宋海声,庞荣妮,蔡啸. 基于蒙特卡罗模拟研究锗死层对高纯锗探测效率的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(23): 3788/LOP223019.  
Song Haisheng, Pang Rongni, Cai Xiao. Effect of germanium dead layer on detection efficiency of high-purity germanium based on Monte Carlo simulations[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(23): 3788/LOP223019 (in Chinese).
- [8] Bölükdemir M H, Uyar E, Aksoy G, et al. Investigation of shape effects and dead layer thicknesses of a coaxial HPGe crystal on detector efficiency by using PHITS Monte Carlo simulation[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, 23(2): 177-182.
- [9] Lee H, Sung S H, Shin S H, et al. Dead layer estimation of an HPGe detector using MCNP6 and Geant4[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2023, 192: 110597.
- [10] Uyar E, Bölükdemir M H. The effect of front edge on efficiency for point and volume source geometries in p-type HPGe detectors[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, 54(11): 4220-4225.
- [11] Looker Q, Amman M, Vetter K. Leakage current in high-purity germanium detectors with amorphous semiconductor contacts[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2015, 777: 138-147.
- [12] 冯成杰. PIN、MSM 结构的碲锌镉辐射探测器性能比较及碲锌镉的漏电流研究[D]. 上海: 上海大学, 2022.
- [13] 颜俊尧. 基于碲锌镉的阵列探测器关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [14] 李志刚, 韦应靖, 张庆利, 等. 基于蒙特卡罗方法的 HPGe 探测器模型参数优化方法研究[J]. *核安全*, 2021, 20(3): 78-85.  
Li Zhigang, Wei Yingjing, Zhang Qingli, et al. Monte carlo-based optimization method of the HPGe detector model[J]. *Nuclear Safety*, 2021, 20(3): 78-85 (in Chinese).
- [15] Uyar E, Aksoy G, Ünlü H, et al. Investigation of the effect of copper contact pin on efficiency in HPGe detectors using Monte Carlo method[J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 16(11): T11003.
- [16] Uyar E, Bölükdemir M H. Characterisation of two p-type HPGe detectors by measurements and Monte Carlo simulations[J]. *Measurement*, 2022, 204: 112092.
- [17] Carson S, Iliadis C, Cesaratto J, et al. Ratio of germanium detector peak efficiencies at photon energies of 4.4 and 11.7MeV: Experiment versus simulation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2010, 618(1-3): 190-198.