

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205413

硅漂移探测器探测效率标定研究

郝晓雨^{1,2} 郭思明² 郭锴悦^{2,3} 蒋政^{2,4} 余涛^{2,4} 吴金杰² 任世伟¹

(1. 河北科技大学理学院 石家庄 050018; 2. 中国计量科学研究院 北京 102200; 3. 中国计量大学光学与电子科技学院 杭州 310018; 4. 成都理工大学核技术与自动化工程学院 成都 610059)

摘要:单能 X 射线标定装置是基于布拉格衍射原理产生单能 X 射线的装置,能量连续可调的单能 X 射线可以为探测器提供能量可选的详细标定实验。使用蒙特卡洛计算软件对两个不同型号的硅漂移探测器的探测效率进行模拟计算,得到 3~50 keV 能量段的探测效率,在单能 X 射线标定装置上完成了硅漂移探测器探测效率的标定实验,得到实验测量的探测效率曲线,并与模拟效率曲线对比。其中,PNDetector 公司的 MLC 型硅漂移探测器的实验结果与理论计算结果的误差最大值为 4.23%@15 keV, KETEX 公司的 BEV 133 型硅漂移探测器的实验结果与理论计算结果的最大误差为-6.88%@12 keV。结果表明,在 7~16 keV 能量段,两个探测器的实验标定结果与理论计算结果相符,在 8 keV 左右,实际探测效率大于 90%。研究成果验证了使用基于布拉格晶体衍射原理的单能 X 射线用于探测器标定的优越性,为国产化 X 射线探测器提供可靠的性能研究与测试平台。

关键词:单能硬 X 射线;硅漂移探测器;探测效率;探测器效率标定

中图分类号: TL816+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.65

Research on detection efficiency calibration of silicon drift detectors

Qie Xiaoyu^{1,2} Guo Siming² Guo Kaiyue^{2,3} Jiang Zheng^{2,4} Yu Tao^{2,4} Wu Jinjie² Ren Shiwei¹

(1. School of Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 102200, China; 3. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 4. The College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Monochromatic X-rays calibration facility is a device that generates monochromatic X-rays based on Bragg diffraction. The continuous adjustable monochromatic X-rays can provide detailed calibration experiments with optional energy for a detector. Monte Carlo calculation software is used to simulate the detection efficiency of two different types of silicon drift detectors, and the detection efficiency of the 3~50 keV energy band is obtained. The calibration experiment of the detection efficiency of the SDDs is completed on the monochromatic X-rays calibration facility, and the detection efficiency measured by the experiment is obtained and compared with the simulation efficiency. Moreover, the maximum error between the experimental results and the theoretical calculation results of MLC SDD is 4.23%@15keV, and the maximum error between the experimental results and the theoretical calculation results of BEV 133 SDD is -6.88%@12keV. The results show that the experimental calibration of the two detectors are consistent with the theoretical calculation results in the energy band of 7~16 keV, and the real detection efficiency is greater than 90% at 8 keV. The research results verify the superiority of using Bragg diffraction-based monochromatic X-rays for detector calibration, and also provide a reliable performance research and testing platform for domestic X-ray detectors.

Keywords: monochromatic hard X-rays; silicon drift detector; detection efficiency; detector efficiency calibration

0 引言

X 射线被广泛应用于医学诊断^[1]、工业无损检测和科学研究领域^[2]。X 射线光机产生的 X 射线来自于高速电子流轰击金属靶时发生的韧致辐射,它是 X 射线连续谱。相比于连续谱,单能 X 射线有独特的优势,利用单能 X 射线可以开展各类 X 射线探测器能量线性、能量分辨率、探测效率和能量响应矩阵等研究。位于中国计量科学研究院电离辐射所的硬 X 射线地面标定装置(hard X-rays calibration facilities, HXCF)是专门为标定 X 射线探测器而设计建造的单能 X 射线源^[3]。2019 年, Hou 等^[4]利用单晶单色器成功实现了 21~301 keV 的单能 X 射线,并且保证 50 h 的束流通量波动小于 1.4%。Jiang 等^[5]在此基础上完成了双晶单色器装置,包括 channel-cut 晶体在内的两种双晶单色器的搭建和使用。王二彦等^[6]利用双晶单色器研究了 30~160 keV 能量段内单能 X 射线光源单色性的研究,证明该装置产生的单能 X 射线单色性良好,可以用来标定多种探测器。Guo 等^[7]对 6~40 keV 能量范围的单晶标定装置进行了进一步研究,结果表明,该标定装置通过特殊设计的机械转台,实现了束流出光位置的不变,使得标定实验更为简洁可控。

X 射线探测器的探测效率是最重要的性能指标之一,需要进行精确标定来保证正常使用。黄永益等^[8]使用硬 X 射线地面标定装置为先进天基太阳天文台卫星载荷进行了地面标定,验证了量能器载荷单机方案的合理性。杨体波等^[9]使用 3 个放射源对溴化镧探测器进行了效率标定。使用放射性核素标定探测器的探测效率是常用的,但是其在使用前需要进行准确的半衰期修正来确定其活度,而且放射源操作不方便,使用也存在一定的核辐射风险,可能对人体造成伤害^[10]。而硬 X 射线地面标定装置通过晶体布拉格衍射产生单能 X 射线^[11-13],光机处于屏蔽室中且实验时无需人为操作,其束流强度可以通过调节光管管电压和管电流改变,能量大小也可通过改变布拉格角度实现单能 X 射线的连续变化。本实验使用硬 X 射线地面标定装置对 KETEX 公司的 D5F2T0-H20-ML1BEV 133 型硅漂移探测器和 PNDetector 公司的 XRS-A-30-128-200-BeP MLC 型硅漂移探测器进行了探测效率标定。在标定前使用蒙特卡洛模拟软件对两个探测器进行模拟仿真,并得到两者的模拟效率曲线之后再使用标定装置对它们进行实际的探测效率标定实验,得到实验值,并与模拟值比较,标定能段设定为 7~16 keV。

1 实验原理

X 射线光机产生的连续谱 X 射线经过单晶单色器布

拉格晶体衍射后会产生单能 X 射线,这由布拉格定律^[14]给出:

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

其中, d 为晶体的晶面间距, θ 为入射 X 射线与晶面的夹角, n 为整数, λ 为 X 射线的波长。注意到光量子的能量为:

$$E = h\nu \quad (2)$$

而光速 c 为:

$$c = \lambda\nu \quad (3)$$

由式(1)、(2)和(3)可以得到单能 X 射线光子的能量为:

$$E = \frac{nhc}{2d\sin\theta} \quad (4)$$

其中, h 为普朗克常量,由式(4)可知,通过改变 X 射线与晶体的入射角即可实现单能 X 射线的连续调节,并且可用于 X 射线探测器的探测效率标定。相比于传统放射源标定,连续可调的单能 X 射线可在探测器吸收边精细标定中发挥重要作用,且可以在感兴趣的能段取多点进行效率标定。

2 实验环境和装置

2.1 6~40 keV 能量硬 X 射线地面标定装置

单能 X 射线标定装置如图 1 所示,装置从左到右依次为 X 射线光机、光机限束光阑、晶体转台、衍射晶体、光机电源、准直管和探测器平台。该装置采用巧妙的机械设计,通过使光机和晶体一起转动的方式,例如晶体转动一个角度 θ ,光机同步转动 2θ 的方式保证了出光位置的不变,极大的提高了标定工作的效率。

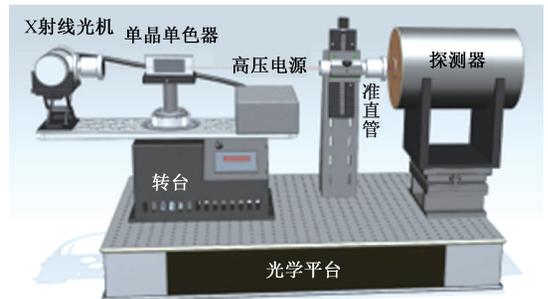


图 1 6~40 keV 能量单能 X 射线标定装置

Fig. 1 Monochromatic X-rays calibration facilities in the 6~40 keV range

2.2 标准探测器和硅漂移探测器

硅漂移探测器(silicon drift detector, SDD)由高阻硅制成,是一种半导体探测器^[15],它具有优异的能量分辨率和计数率高等优点^[16-17]。它的工作原理是利用 X 射

线激发出电子-空穴对,并且转化为脉冲信号读出,可以通过对其计数可以确定 X 射线的能量。本次实验使用的 PNDetector 公司的 XRS-A-30-128-200-BeP MLC 型硅漂移探测器(以下简称 MLC SDD)和 KETEX 公司的 D5F2T0-H20-ML1BEV 133 型硅漂移探测器(以下简称 BEV 133 SDD)。表 1 和 2 分别给出了它们的出厂尺寸。

表 1 MLC SDD 出厂尺寸

Table 1 The factory size of MLC SDD

XRS-A-30-128-200-BeP MLC	
芯片	SDX-30-128pnW Silicon Drift Detector (SDD)
探测器有效面积	30 mm ²
Si 芯片有效厚度	450 μm ± 20 μm
准直系统	内部多层准直器 5.8 mm
探测器窗口	铍窗 (8 μm)
SDD 封装	封装于 10 ⁻³ mbar

表 2 BEV 133 SDD 出厂尺寸

Table 2 The factory size of BEV 133 SDD

D5F2T0-H20-ML1BEV 133	
芯片	VITUS H20 SDD
探测器有效面积	30 mm ²
Si 芯片有效厚度	450 μm
运行温度	-35℃
探测器窗口	8 μm 铍窗

高纯锗探测器 (high purity germanium detector, HPGe) 具有高能量分辨率和高探测效率等优点^[18-21]而在很多领域成为规定的标准探测器。实验中先使用高纯锗探测器收集束流信息,包括能量大小和来流粒子数。因为标准探测器的探测效率是已知的,故可以通过它反推出入射 X 射线的原始信息,从而给出来流实际光子数,再通过双轴移动平台将待测硅漂移探测器正对束流进行束流收集,通过标准探测器来标定待测硅漂移探测器。图 2 给出了高纯锗探测器的探测效率曲线。

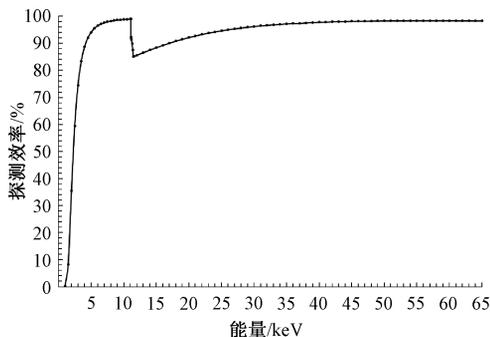


图 2 高纯锗探测器探测效率曲线

Fig. 2 Detection efficiency curve of high purity germanium detector

3 结果和分析

3.1 硅漂移探测器的模拟探测效率

探测效率 η 定义为探测器所接收到的来流光子数 N_D 与束流的总光子数 N_n 的百分比,也就是:

$$\eta = \frac{N_D}{N_n} \times 100\% \quad (5)$$

式中: N_D 表示探测器全能峰总计数。在实验中,束流总计数可以通过高纯锗标准探测器反推出,因为高纯锗探测器的探测效率是已知的。

在进行探测效率刻度实验之前,需要先经过计算模拟得到理想情况之下的探测效率曲线,这样可以保证预先设计的目标。使用蒙特卡洛模拟软件对 PNDetector 的 SDD 进行探测效率模拟,模拟尺寸信息如表 1 所示,光源采用平行 X 射线,模拟光子数为一百万。因为硅漂移探测器在 8 keV 能量范围内的探测效率高于 90%,是我们关心的工作区间,故在 3~12 keV 能量段内取 0.5 keV 为一步长,在 20~30 keV 能量段取 2 keV 为一步长,30~50 keV 内取 5 keV 为一步长。进行蒙特卡洛模拟计算,得到 MLC SDD 的模拟探测效率如图 3 所示。

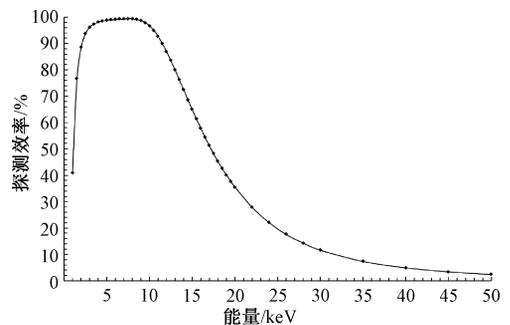


图 3 MLC SDD 模拟探测效率曲线

Fig. 3 Simulated detection efficiency of the MLC SDD

从模拟得到的探测效率曲线中可以看出,MLC SDD 在 1 keV 能量时探测效率为 40.94%,这是由于入射光子能量太小以至于不能使硅晶体产生电子-空穴对,导致无法产生漂移电子,无法被收集,所以在这个能量范围内的探测效率较低。但是随着入射 X 射线光子的能量的增大,探测效率曲线在 3 keV 时迅速增加到 96.1%,且维持在一个较高水平。当入射 X 射线的能量在 3.5~9.5 keV 能连段内时,此硅漂移探测器的探测效率到达最大,这也说明了硅漂移探测器对该能量段的探测很灵敏,从图 3 中可以看到,此范围内硅漂移探测器的探测效率一直维持在 97% 以上,并且在 7.5 keV 时达到最大 99.35%,这几乎探测到了所有入射 X 射线光子。随着入射 X 射线光子能量的持续加大,由于硅的原子序数较小,滞留光子

的能力较低,导致较高能 X 射线光子直接穿过探测模块而无法被探测到,所以在能量大于 13 keV 时,探测效率会从最高 99.35% 下降至 79.95%,在 10~13 keV 能量段内,虽然探测效率有所下降,但还维持着比较高的水平。但是在束流能量高于 16 keV 后,硅漂移探测器的效率会低于 60%,且能量越高,其效率越低,当入射 X 光能量为 50 keV 时,探测效率仅仅为 2.4%。

相同的, KETEX 公司的 BEV 133 SDD 的模拟探测效率如图 4 所示。

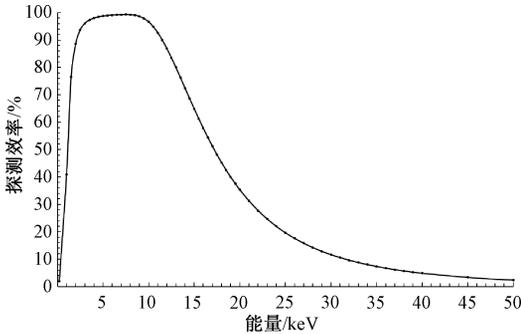


图 4 BEV 133 SDD 模拟探测效率曲线

Fig. 4 Simulated detection efficiency of the BEV 133 SDD

3.2 用硬 X 射线地面标定装置标定两个硅漂移探测器

本次标定实验使用中国计量院电离辐射所的硬 X 射线地面标定装置来对两个硅漂移探测器进行标定。由于被测硅漂移探测器的探测面积较小,故使用 2 mm 口径光阑限束,并将探测器移动至出光口 5 cm 处,保证出射的 X 射线能全部被探测器接收。标定实验主要聚焦于 8 keV 能量左右的低能区。首先使用高纯锗标准探测器对束流进行采集,并且得到能谱数据,使用 Root 软件画出高纯锗探测器的能谱,并且对全能峰进行 10σ 的高斯拟合,得到这个范围内的计数。图 5 给出了 8 keV 时高纯锗探测器的能谱。

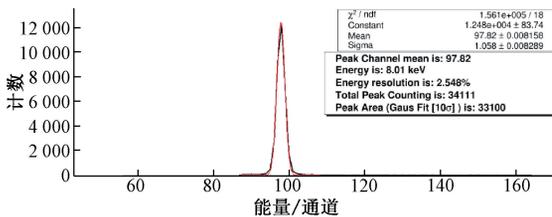


图 5 8 keV 能量高纯锗探测器的能谱

Fig. 5 Energy spectrum of 8 keV of high purity germanium detector

图 5 给出了 8 keV 能量下高纯锗探测器的全能峰总计数为 34 111。由于高纯锗探测器效率已知,故来流总粒子数为 34 715。依次类推,得到 7 个能量下的束流信息用来标定硅漂移探测器。表 3 和 4 给出了本次标定实

验的所有能量点数据。

表 3 MLC SDD 实测探测效率

Table 3 Measured detection efficiency of the MLC SDD

能量/ keV	SDD 计数	高纯锗探 测器计数	SDD 探 测效率/%	SDD 模拟 效率/%	误差/%
7	10 179	10 299	97.63	99.32	1.96
8	32 930	34 111	95.60	99.31	3.71
10	102 792	103 558	98.53	96.67	-1.86
12	34 745	34 992	84.61	86.89	2.28
14	38 277	47 562	70.18	72.43	2.25
15	47 630	69 054	60.72	64.95	4.23
16	41 262	67 129	54.61	57.84	3.28

表 4 BEV 133 SDD 实测探测效率

Table 4 Measured detection efficiency of the BEV 133 SDD

能量/ keV	SDD 计数	高纯锗探 测器计数	SDD 探 测效率/%	SDD 模拟 效率/%	误差/%
7	26 383	26 905	95.74	99.30	3.56
8	33 972	34 111	98.63	99.30	0.67
10	160 627	164 750	96.37	96.67	0.31
12	48 768	44 486	93.81	86.93	-6.88
14	39 849	47 565	73.06	72.43	-0.63
15	50 858	69 054	64.83	64.92	0.09
16	82 693	120 643	61.18	57.81	-3.37

表 3 给出了 MLC SDD 的模拟值、实测值和误差。可以看到,实际标定的探测效率也符合模拟值的变化趋势,且实测值与模拟值的误差最大为 4.23% @ 15 keV。

表 4 中 BEV 133 SDD 的实测值和模拟值误差最大的能量点为 -6.88% @ 12 keV,其原因可能是在实验过程中开关光机束流出现波动,但是在 8 keV 左右,该硅漂移探测器的灵敏区内符合要求,并且也与模拟效率曲线的变化一致。图 6 和 7 给出了这两个硅漂移探测器的效率曲线。由表 3 和 4 可以看出,两款不同型号的硅漂移探测器的实际探测效率在 7~16 keV 能量段内比较符合模拟效率,这一方面说明了这两个硅漂移探测器的性能是优异的,可以在该能段获得可靠的数据,另一方面也证明了基于晶体布拉格衍射单能 X 射线用于探测器标定的可行性。

标定实验表明单能 X 射线标定探测器的探测效率在实验上是可行的,且具有传统的放射源标定所不具有的巨大优势,那就是可以在感兴趣的能量段取多个能量点进行效率标定,而放射源只能在特定的几个能量相差很大的能量点进行标定,并且使用单能 X 射线标定装置可以完全非接触式实验,摆脱了放射源的放射性辐射的危害,保证实验人员的身体健康,整套装置具有良好的可重复操作性。未来需要在单能 X 射线的稳定性和出射光斑大小两个方面进行细致的研究,使硬 X 射线地面标定装

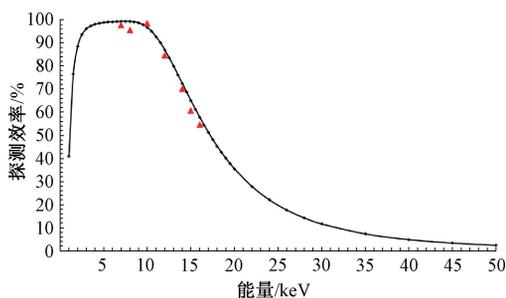


图6 MLC SDD 标定探测效率曲线

Fig. 6 Calibration detection efficiency curve of the MLC SDD

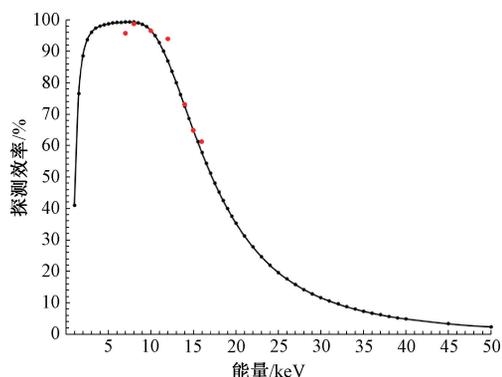


图7 BEV 133 SDD 标定探测效率曲线

Fig. 7 Calibration detection efficiency curve of the BEV 133 SDD

置具有更高的准确度和可重复性。

4 结论

本实验使用中国计量院电离辐射所的硬 X 射线地面标定装置对两个硅漂移探测器进行了地面探测效率标定,由于硅漂移探测器的灵敏探测范围为较低能段,故将实验点设定到 20 keV 以下。首先使用蒙特卡洛模拟,将硅漂移探测器的探测效率进行模拟计算,并分析了曲线的成因。之后进行实测得到两个硅漂移探测器的探测效率,并与模拟值进行比较,在比较关心的 7~16 keV 能量段,PNDetector 的 SDD 的最大误差仅为 4.23%@15keV,而 KETEX 的 SDD 的实测效率的最大误差为-6.88%@12keV。同时也注意到,影响标定实验的因素还包括束流光斑是否完全被探测器接收。这样的结果表明,硬 X 射线地面标定装置可以为 X 射线探测器提供精确的标定服务,克服了核素标定的劣势,即只能在几个能量相差较大的能量点标定,并且可以提供能量连续变化的近似平行的单能 X 射线,这也是放射源标定所不具备的巨大优势,并且也验证了使用单能可调节的 X 射线标定探测器的可行性,为今后探测器标定工作提供了参考。经过标定后的硅漂移探测器在今后的工作中将主要用于 3~12 keV

能量段的工作,此能量段内实际效率接近 100%,为接下来的探测工作奠定了基础,也为国产化 X 射线探测器提供可靠的性能研究与测试平台。

参考文献

- [1] 霍彬彬,过晓阳,徐志勇,等.淮安市 2017 年医用 X 射线诊断应用频度调查[J].中华放射医学与防护杂志,2020,40(10):765-769.
HUO B B, GUO X Y, XU ZH Y, et al. Investigation and estimation of medical X-ray diagnostic examination frequency in Huai-an city in 2017[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2020,40(10):765-769.
- [2] 黄海鸿,姚结艳,刘儒军,等.基于金属磁记忆技术的车桥壳损伤检测[J].电子测量与仪器学报,2014,28(7):770-776.
HUANG H H, YAO J Y, LIU R J, et al. Damage detection of axle housing based on metal magnetic memory testing technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28 (7): 770-776.
- [3] GUO S M, WU J J, HOU D J. The development, performances and applications of the monochromatic X-rays facilities in (0.218-301) keV at NIM, China[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, 32(6): 1-14.
- [4] HOU D, WU J, GUO S, et al. The realization and study of (21-301) keV monochromatic X-rays [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 927: 382-389.
- [5] JIANG Z, WANG E, SONG R, et al. Optimization of a double crystal monochromator [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2021, 79(8): 697-705.
- [6] 王二彦,蒋政,郭思明,等.30~160 keV 单能 X 射线装置的单色性实验研究[J].计量学报,2021,42(5):645-649.
WANG ER Y, JIANG ZH, GUO S M, et al. Experimental study on monochromaticity of 30 ~ 160 keV single energy X-ray device[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021,42(5):645-649.
- [7] GUO S, JIANG Z, WU J, et al. Research on a tunable monochromatic X-rays source in (5 approximately 40) keV [J]. Appl Radiat Isot, 2022, 181: 110096.
- [8] 黄永益,马涛,张永强,等.ASO-S 卫星 HXI 量能器探测单元的标定[J].天文学报,2020,61(4):101-108.
HUANG Y Y, MA T, ZHANG Y Q, et al. Calibration of the detector units of the spectrometer of the hard X-ray imager payload onboard the ASO-S mission [J]. Acta Astronomica Sinica, 2020,61(4):101-108.

- [9] 杨体波,王敏,代光明,等. 溴化镧探测器探测效率刻度及影响因素分析[J]. 核技术,2021,44(10):25-31.
YANG T B, WANG M, DAI G M, et al. Efficiency calibration of lanthanum bromide scintillation detector and analysis of influencing factors of the detection efficiency[J]. Nuclear Techniques, 2021,44(10):25-31.
- [10] 王福如,王进,余宁乐,等. 南京“5.7”放射源丢失事故受照者照后医学随访观察[J]. 中华放射医学与防护杂志,2019,39(11):859-863.
WANG F R, WANG J, YU N L, et al. Medical follow-up of exposed victims after the “5.7” accident of radioactive source in Nanjing [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2019, 39(11): 859-863.
- [11] ELTON L R B, JACKSON D F. X-ray diffraction and the Bragg law [J]. American Journal of Physics, 1966, 34(11): 1036-1038.
- [12] GERDAU E, RÜFFER R, WINKLER H, et al. Nuclear Bragg diffraction of synchrotron radiation in yttrium iron garnet[J]. Physical Review Letters, 1985, 54(8): 835-838.
- [13] ARISTOV V V, ERKO A I, NIKULIN A Y, et al. Observation of X-ray Bragg diffraction on the periodic surface relief of a perfect silicon crystal [J]. Optics Communications, 1986, 58(5): 300-302.
- [14] WEIDEMÜLLER M, HEMMERICH A, GÖRLITZ A, et al. Bragg diffraction in an atomic lattice bound by light[J]. Physical review letters, 1995, 75(25): 4583-4586.
- [15] 宋文刚,张立军,张晶,等. 硅漂移探测器数字脉冲处理技术[J]. 物理学报, 2022, 71(1):80-88.
SONG W G, ZHANG L J, ZHANG J, et al. Research on digital pulse processing techniques for silicon drift detector [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(1): 80-88.
- [16] 高尚,黄梦诗,杨振英,等. 扫描电镜中 X 射线能谱仪的技术进展 [J]. 分析科学学报, 2022, 38(1): 115-121.
GAO SH, HUANG M SH, YANG ZH Y, et al. Technical progress of X-ray energy dispersive spectroscopy in scanning electron microscope [J]. Journal of Analytical Science, 2022, 38(1): 115-121.
- [17] 杨进蔚,张炜,宋先瑛,等. 硅漂移(SDD)阵列探测器 X 射线能谱测量诊断 [J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(4): 331-334.
YANG J W, ZHANG W, SONG X Y, et al. Silicon drift detector array for X-ray spectroscopy [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(4): 331-334.
- [18] 严永强,孙圣涛,吴金杰,等. 宽能平面型 HPGe 探测器能量刻度及 MC 模拟[J]. 计量学报,2021,42(11): 1511-1516.
YAN Y Q, SUN SH T, WU J J, et al. Energy calibration and MC simulation of broad energy planar HPGe detector [J]. Acta Metrologica Sinica, 2021,42(11):1511-1516.
- [19] 张建芳,赵广义,王玉德,等. 高纯锗探测器探测效率的 MCNP 模拟 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2010, 48(5):843-846.
ZHANG J F, ZHAO G Y, WANG Y D, et al. MCNP simulation of high-purity germanium detector efficiency[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2010, 48(5):843-846.
- [20] 李自维,白立新,张一云. 不确定度评价方法在高纯锗探测器参数修正中的应用[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2020, 57(5):961-967.
LI Z W, BAI L X, ZHANG Y Y. Application of uncertainty evaluation method in parameter correction of high-purity Germanium detector[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2020, 57(5): 961-967.
- [21] 杨静,关伟,白万春. MC 模拟 HPGe 探测器探测效率[J]. 核电子学与探测技术,2018,38(6):811-814.
YANG J, GUAN W, BAI W CH. Study on the efficiency of HPGe detector by Monte Carlo simulation[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2018,38(6):811-814.

作者简介



郭思明(通信作者),2016年于中国科学院高能物理研究所获得博士学位,现为中
国计量科学研究院副研究员,主要研究方向
为单能 X 射线辐射装置和探测器标定方法
领域。

E-mail: gsm@nim.ac.cn

Guo Siming (Corresponding author) received his Ph. D. degree from the Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences in 2016. Now he is an associate researcher in National Institute of Metrology. His main research interests include the monochromatic X-rays radiation device and the detector calibration method.



郄晓雨,2020年于邢台学院获得学士学位,现为河北科技大学硕士研究生,主要
研究方向为 X 射线计量学。

E-mail:840094775@qq.com

Qie Xiaoyu received his B. Sc. degree from Xingtai University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate in Hebei University of Science and Technology. His main research interest includes the X-rays metrology.