

# SiC探测器的中子和 $\gamma$ 性能测试

施海宁<sup>1,2</sup> 应红<sup>1,2</sup> 张涛<sup>1,2</sup> 唐堂<sup>1,2</sup> 宋金霖<sup>3</sup> 龚频<sup>3</sup> 汤晓斌<sup>3</sup>

1(中国广核集团有限公司 苏州热工研究院有限公司 苏州 215004)

2(国家核电厂安全及可靠性工程技术研究中心 苏州 215004)

3(南京航空航天大学 核科学与技术系 南京 211106)

**摘要** 第三代SiC半导体探测器具有体积小、响应时间快、中子/伽马( $n/\gamma$ )甄别容易等优点,广泛应用于反应堆堆芯剂量监测。本文针对自研的第三代SiC半导体探测器,采用电子束蒸发真空镀膜的技术将中子转换层材料 ${}^6\text{LiF}$ ( ${}^6\text{Li}$ 丰度为95%)喷镀到SiC基底上,厚度为25  $\mu\text{m}$ ,实现了中子转换层厚度优化。利用 ${}^{241}\text{Am}$   $\alpha$ 放射源(活度 $9.37\times 10^3$  Bq)开展 $\alpha$ 粒子响应信号幅度的测量,并在 ${}^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 放射源(活度 $6.23\times 10^7$  Bq)环境下开展 $\gamma$ 射线的响应测试。另外,在标准辐射场系统中进行了SiC探测器的中子注量率响应线性度测量、 $\gamma$ 剂量率响应线性度测量以及中子注量率响应线性标定。结果表明:该探测器在 $1\times 10^3\sim 1\times 10^6$   $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 中子注量率范围内线性响应拟合 $R^2 = 0.9969$ ,具有良好的线性响应, $n/\gamma$ 剂量响应范围为 $0.005\sim 20$   $\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ ,可用于核电现场反应堆中子和 $\gamma$ 剂量的实时、精确监测。

**关键词** 碳化硅探测器, 中子注量率,  $\gamma$ 剂量, 线性响应

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030402

## Neutron and gamma performance testing of silicon carbide semiconductor detectors

SHI Haining<sup>1,2</sup> YING Hong<sup>1,2</sup> ZHANG Tao<sup>1,2</sup> TANG Tang<sup>1,2</sup> SONG Jinlin<sup>3</sup>

GONG Pin<sup>3</sup> TANG Xiaobin<sup>3</sup>

1(China General Nuclear Power Group, Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

2(National Engineering Research Center for Nuclear Power Plant Safety & Reliability, Suzhou 215004, China)

3(Department of Nuclear Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract** [Background] Detectors based on the third-generation semiconductor material silicon carbide (SiC) offer several important advantages, such as compactness, faster charge-collection times, and easier  $n/\gamma$  identification, and they are widely used in reactor core dose monitoring. [Purpose] In this study, the  $n/\gamma$  signal amplitude, neutron fluence rate, and linear response calibration performances were tested systematically for a self-developed third-generation SiC semiconductor detector. [Methods] Firstly, the neutron conversion layer material  ${}^6\text{LiF}$  (with a 95% abundance of  ${}^6\text{Li}$ ) was sprayed onto a SiC substrate using electron beam evaporation vacuum coating technology to achieve the optimized thickness of 25  $\mu\text{m}$  for the self-developed third-generation SiC semiconductor detector. Then,  ${}^{241}\text{Am}$   $\alpha$  radioactive source (activity  $9.37\times 10^3$  Bq) was used to observe  $\alpha$  particle response signal amplitude, and  $\gamma$  response testing of radiation was conducted in the  ${}^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  source (activity  $6.23\times 10^7$  Bq) environment. In addition, the SiC detector's neutron flux response linearity,  $\gamma$  dose rate response linearity and calibration of neutron fluence rate response linearity were measured in the standard radiation field systems. [Results] The measurement results show that the SiC semiconductor detector has a linear fit of  $R^2 = 0.9969$  in the neutron fluence rate range of  $1\times 10^3\sim$

第一作者: 施海宁, 男, 1974年出生, 1995年毕业于东南大学, 目前从事核电站辐射探测技术研究, E-mail: shihaining@cgnpc.com.cn

收稿日期: 2023-05-09, 修回日期: 2023-07-11

First author: SHI Haining, male, born in 1974, graduated from Southeast University in 1995, focusing on radiation detection technology in nuclear power plants, E-mail: shihaining@cgnpc.com.cn

Received date: 2023-05-09, revised date: 2023-07-11

$1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , with a good linear response, and the response range of the neutron/gamma dose is  $0.005 \sim 20 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ .

**[Conclusion]** The SiC detectors with such good n/ $\gamma$  performance can be used for real-time and accurate monitoring of neutron and gamma doses in nuclear power field reactors.

**Key words** SiC detector, Neutron fluence rate, Gamma dose, Linear responses

核反应堆内的核辐射探测对核电机组的日常运行、老化管理、运行许可证延续等方面至关重要,但随着电厂老化管理、运行许可证延续等精益化管理工作的深入,现有辐射监测系统已难以满足更为精确的评估计算需求<sup>[1]</sup>。目前,中子监测的主要方法有:在堆芯和压力容器壁之间安装辐照监督管,里面包含有材料样本和中子活化片;或者在压力容器外安装中子注量探测器,其中子活化片安装在压力容器绝热反射层与堆坑混凝土之间。这样存在一定的局限性,如:中子挂片有放射性,需要在热室进行分析;无法实时在线监测;关键技术受到国外的制约和封锁。迫切需要研制一种具有耐高温、抗辐照、小型化、无线化等特点的新型核辐射(中子、 $\gamma$ 射线)探测与测量系统<sup>[2]</sup>,从而为核电厂的日常运行、老化管理、运行许可证延续提供数据支撑。

半导体中子探测器利用核反应产生的次级带电粒子在半导体耗尽区中沉积能量来进行探测,第三代SiC半导体探测器具有体积小、响应时间快、n/ $\gamma$ 甄别容易等优点,同时克服了传统探测器抗辐射性能差、性能随温度变化敏感等缺点。国内对SiC的研究主要集中于材料生长、缺陷和器件制造工艺等方面<sup>[3-7]</sup>,而针对SiC探测器n/ $\gamma$ 响应性能测试研究较少,尚不能满足反应堆堆芯剂量监测的需求。

本文基于自主研发的SiC半导体探测器,开展中子转换层厚度优化,对比不同粒子的探测器响应信号,研究探测器对n/ $\gamma$ 注量率线性响应度,给出探测器基本性能指标。

## 1 SiC探测器的中子转换层厚度优化

中子不带电,穿越半导体的过程中难以发生电离作用。因此,通常中子探测选择与中子发生核反应产生带电粒子的核素作为转换层,记录下带电粒子引起的电离激发现象,以实现对中子的探测。由于 ${}^6\text{Li}$ 与中子发生核反应的反应能较大,易于实验对 $\gamma$ 的甄别,同时有较高的反应截面,中子探测效率较高<sup>[8]</sup>,因此选择 ${}^6\text{LiF}$ 作为SiC半导体探测器的转换层,通过记录 ${}^6\text{Li}(n, T){}^4\text{He}$ 核反应产生的 $\alpha$ 粒子和T离子产生的信号实现对中子的测量。与中子探测原理不同, $\gamma$ 射线可直接与SiC半导体中的耗尽区作用而沉积的能量,通过测量该沉积能量探测 $\gamma$ ,但是这种能量较小,导致 $\gamma$ 信号幅度比中子信号小。采用

较薄厚度耗尽区的SiC与 ${}^6\text{LiF}$ 结合可以实现高 $\gamma$ 甄别。

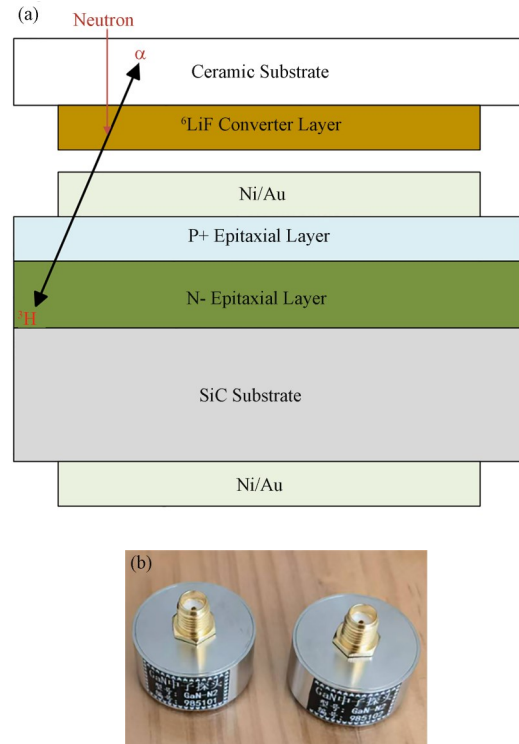


图1 SiC半导体探测器结构示意图(a)及实物图(b)  
Fig.1 Schematic diagram of SiC semiconductor detector structure (a) and physical image (b)

转换层厚度与中子探测效率直接相关,如果转换层太厚导致产生的带电粒子被吸收,如果太薄探测效率太低,因此需要对 ${}^6\text{LiF}$ 的厚度进行优化。采用Geant4程序计算了热中子平行入射条件下探测效率随 ${}^6\text{LiF}$ ( ${}^6\text{Li}$ 丰度为95%)厚度的变化趋势<sup>[9]</sup>,结果如图2所示。可以看出,热中子探测效率随 ${}^6\text{LiF}$ 中子转换层的厚度先增加后减少,在 $25 \mu\text{m}$ 时到达最大值,为4.6%。

本研究使用的SiC半导体探测器的制作主要包括基底材料制备、中子转换层喷镀、探测器封装等。通过对外延的工艺技术和工艺条件进行优化,提高衬底外延的外延生长速率、降低缺陷密度、提高片内均匀性和批次一致性,制备出SiC基底材料。采用电子束蒸发真空镀膜的技术将中子转换层材料 ${}^6\text{LiF}$ ( ${}^6\text{Li}$ 丰度为95%)喷镀到SiC基底上,实现转换层厚度为 $25 \mu\text{m}$ ,满足设计要求。然后,采用不锈钢外壳与SMA(SubMiniature version A)接头对探测器探头

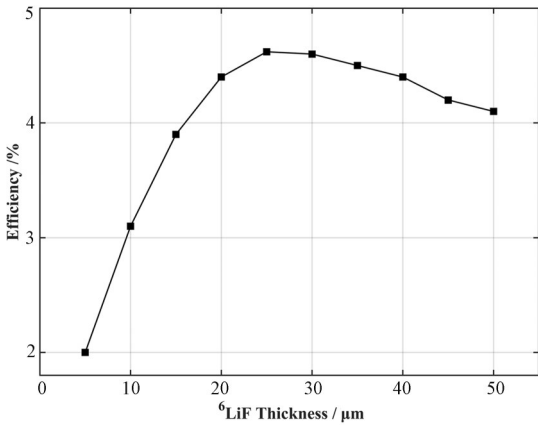


图2 热中子探测效率与不同 ${}^6\text{LiF}$ 厚度的关系  
Fig.2 Relationship between thermal neutron detection efficiency and different thicknesses of  ${}^6\text{LiF}$

进行封装得到SiC半导体探测器。

## 2 SiC探测器的信号响应测试

基于制备的SiC半导体探测器(SiC半导体面积为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ),首先利用 ${}^{241}\text{Am}$   $\alpha$ 放射源(活度 $9.37\times 10^3\text{ Bq}$ )开展了 $\alpha$ 粒子响应信号幅度的测量,测试实验室环境如图3所示。测试结果如图4所示,可观察到清晰的 $\alpha$ 粒子信号,信号幅度250 mV,脉冲宽度70 ns,基线噪声5 mV。基于Am-Be中子源(活度 $1.09\times 10^{10}\text{ Bq}$ )的测试结果如图5所示,可观察到清晰的中子转换的T粒子信号,其信号幅度40 mV,脉冲宽度200 ns,基线噪声5 mV。



图3 实验室 $\alpha$ 源测试环境照片  
Fig.3 Snapshot  $\alpha$  test environment in laboratory

同时,基于 ${}^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 放射源(活度 $6.23\times 10^7\text{ Bq}$ )开展了SiC探测器( $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,  $30\text{ }\mu\text{m}$ )对 $\gamma$ 射线的响应测试,测试结果如图6所示。图中清晰测量到了 $\gamma$ 射线信号,信号幅度为22 mV,脉冲宽度100 ns,基线噪声5 mV。其信号幅度远小于SiC中子探测器的信号,这是由于中子的探测器转换层 ${}^6\text{LiF}$ 产生的次级粒子 $\alpha$ 与T在半导体中沉积的能量远大于 $\gamma$

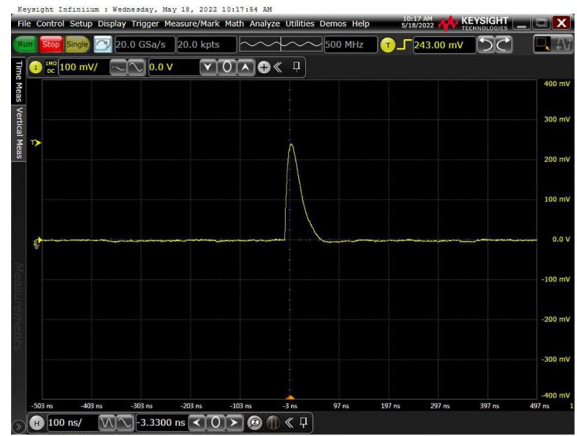


图4  $\alpha$ 脉冲信号波形图  
Fig.4 Waveform of  $\alpha$  pulse signal of  $\alpha$



图5  ${}^3\text{H}$ 脉冲信号波形图  
Fig.5 Waveform of  ${}^3\text{H}$  pulse signal



图6  $\gamma$ 脉冲信号波形图  
Fig.6 Waveform of  $\gamma$  pulse signal

在SiC半导体耗尽区的电子能量沉积。

## 3 中子注量率响应线性度测量

热中子探测效率是中子探测器的重要参数指标<sup>[10]</sup>,为此,基于中国计量科学研究所的Am-Be中子源标准辐射场开展了SiC半导体中子探测器的效率测

度<sup>[1]</sup>。该辐射场测试点热中子注量率为 $374.1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 不确定度为 $5.0\%$  ( $k=1$ ), 热中子 ( $<0.5 \text{ eV}$ ) 占比为 $99.9\%$ 。测量时间为 $1200 \text{ s}$ , 探测器总计数为 $4564$ , 校准结果显示, SiC 半导体中子探测器在热能点的探测效率为 $1.01\%$  (校准因子为 $98.36$ , 校准因子合成标准不确定度为 $7.0\%$ )。

探测器中子注量率响应线性度也是探测器的重要指标。线性度是描述传感器静态特性的一个重要指标, 以被测输入量处于稳定状态为前提。在规定的条件下, 传感器校准曲线与拟合直线间的最大偏差 ( $\Delta Y_{\max}$ ) 与满量程输出 ( $Y$ ) 的百分比称为线性度 (线性度又称为“非线性误差”), 该值越小, 表明线性特性越好。表示为公式:  $\delta = \Delta Y_{\max} / Y \times 100\%$ 。

基于中国原子能科学研究院的高压倍加器产生的  $14.8 \text{ MeV}$  单能中子参考辐射场<sup>[12]</sup>, 开展 SiC 半导体中子探测器中子注量率响应线性度测试。实验大厅散射中子本底利用影锥法扣除<sup>[13]</sup>, 靶-待校仪器测试点距离为  $115 \text{ cm}$ , 通过调节加速器功率实现测试点注量率范围  $6.08 \times 10^2 \sim 2.14 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 6 个中子注量率:  $6.08 \times 10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $2.99 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $1.4 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $3.62 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $2.27 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $2.14 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。测试现场环境如图 7 所示。表 1 为不同中子注量率值对应的探测器计数率。相对扩展不确定度为  $U_{\text{rel}} = 7.0\%$  ( $k=2$ )。

表 1 参考点中子探测器计数率  
Table 1 Counting rates of neutron detector in different reference points

中子注量率约定真值 Agreed true value of neutron fluence rate / $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	待测仪器计数率 Counting rate of the instrument to be tested / $\text{s}^{-1}$
$2.14 \times 10^6$	3 490
$2.27 \times 10^5$	542
$3.62 \times 10^4$	233
$1.40 \times 10^4$	90
$2.99 \times 10^3$	18
$6.08 \times 10^2$	4

当中子能量达到  $14.8 \text{ MeV}$  时, C 和 Si 的 ( $n, p$ )、( $n, \alpha$ ) 反应道已打开, 在此能量下 SiC 半导体中子探测器探测的中子信号不仅是中子转换层  ${}^6\text{LiF}$  产生的次级带电粒子, 还包括  ${}^{12}\text{C}$  和  ${}^{28}\text{Si}$  产生的次级带电粒子<sup>[14]</sup>。  $14.8 \text{ MeV}$  能点,  ${}^{12}\text{C}$  和  ${}^{28}\text{Si}$  反应截面远大于  ${}^6\text{Li}$  的反应截面, 这说明 SiC 半导体中子探测器既可测量热中子, 又可测量快中子<sup>[15]</sup>。

根据测量计数率与中子注量率结果, 可得线性拟合曲线  $y = 624.54x - 52134$ ,  $R^2 = 0.9969$ 。拟合曲线如图 8 所示, 线性度为  $3.346\%$ 。



图 7 中子辐照测试环境照片  
Fig.7 Snapshot of neutron irradiation testing environment

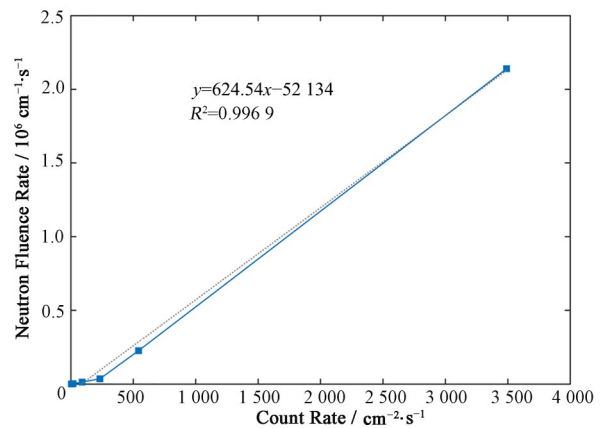


图 8 中子注量率线性拟合曲线  
Fig.8 Curve of linear fitting of neutron fluence rate

#### 4 $\gamma$ 剂量率响应线性度测量

基于中国计量科学研究院的  ${}^{60}\text{Co}$  源标准  $\gamma$  辐射场, 开展了 SiC 半导体  $\gamma$  探测器剂量率响应线性度测量, 通过调节源与探测器的距离测试点剂量率范围为  $0.005 \sim 20 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。测试点  $\gamma$  空气比释动能率参考值为  $0.005 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $0.01 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $0.03 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $0.1 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $3 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $5.54 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $7 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $10 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $12 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $20 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。测试现场环境如图 9 所示。

表 2 为不同参考点的  $\gamma$  剂量率值和对应的探测器计数率以及校准因子<sup>[16-19]</sup>。从表 2 可以看出, 系统  $\gamma$  剂量率的测量范围为  $0.005 \sim 20 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

#### 5 结语

基于自主研发的第三代 SiC 半导体中子/ $\gamma$  探测器, 利用标准辐射场, 开展了中子探测器刻度、线性响应测试, 测试结果显示, 在  $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  中子注量范围内具有良好的线性响应, 中子注量  $\gamma$  剂量率范围高达  $0.005 \sim 20 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ , 为核电现场反应堆中子和  $\gamma$  的无线、实时、精确监测奠定了基础。

表2 参考点 $\gamma$ 探测器计数率  
Table 2 Counting rates of gamma detector in different reference points

参考点及不确定度( $k=2$ ) Reference points / ( $\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ) and uncertainty ( $k=2$ ) / %	探测器计数率 Counting rate of detector / $\text{s}^{-1}$	校准因子 Calibration factor / $\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
0.005 (3)	41	0.000 121
0.01 (1)	96	0.000 104
0.03 (1)	291	0.000 103
0.1 (1)	901	0.000 111
0.5 (1)	4 459	0.000 112
3 (1.7%)	25 587	0.000 117
5.54 (1.7%)	32 805	0.000 169
7 (1.7%)	34 207	0.000 205
10 (1.7%)	35 717	0.000 280
12 (1.7%)	36 636	0.000 328
20 (1.7%)	38 185	0.000 524



图9  $\gamma$ 辐照测试环境  
Fig.9  $\gamma$  irradiation testing environment

**致谢** 感谢南京航空航天大学、中国原子能科学研究院、中国计量科学研究院提供的中子束流和 $\gamma$ 辐射场。感谢中国科学院上海应用物理研究所老师们对该工作的支持和帮助。

**作者贡献声明** 施海宁、应红、张涛、唐堂负责本文工作中的文献查阅、实验测试与总结；宋金霖负责模拟计算；龚频、汤晓斌对文章进行了统筹修改和指导，并对文章的撰写与修改提供了积极的建议。全体作者都阅读并同意最终的文本。

#### 参考文献

- 1 陈伟, 周建斌, 方方, 等. 大批量人群核辐射体内污染快速检测仪的研制[J]. 核技术, 2017, **40**(2): 020403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.020403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.020403).  
CHEN Wei, ZHOU Jianbin, FANG Fang, *et al.* Develop an instrument for fast measuring internal radiation contamination of large crowds[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(2): 020403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.020403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.020403).

- 2 黄平, 段兴彪, 周鹏, 等. CPR1000核电机组RPV辐照监督管提取方案及实践[J]. 核安全, 2022, **21**(4): 36 - 41. DOI: [10.16432/j.cnki.1672-5360.2022.04.004](https://doi.org/10.16432/j.cnki.1672-5360.2022.04.004).  
HUANG Ping, DUAN Xingbiao, ZHOU Peng, *et al.* Extraction scheme and practice of RPV irradiation supervision tube for CPR1000 nuclear power unit[J]. Nuclear Safety, 2022, **21**(4): 36 - 41. DOI: [10.16432/j.cnki.1672-5360.2022.04.004](https://doi.org/10.16432/j.cnki.1672-5360.2022.04.004).
- 3 唐彬, 蔡军, 黄文博, 等. 基于碳化硅中子探测器的实验研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, **38**(5): 050702. DOI: [10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.050702](https://doi.org/10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.050702).  
TANG Bin, CAI Jun, HUANG Wenbo, *et al.* Experimental study of silicon carbide neutron detectors [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2020, **38**(5): 050702. DOI: [10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.050702](https://doi.org/10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.050702).
- 4 Jiménez-Ramos M C, López J G, Osuna A G, *et al.* IBIC analysis of SiC detectors developed for fusion applications [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, **177**: 109100. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2020.109100](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109100).
- 5 Puglisi D, Bertuccio G. Silicon carbide microstrip radiation detectors[J]. Micromachines, 2019, **10**(12): 835. DOI: [10.3390/mi10120835](https://doi.org/10.3390/mi10120835).
- 6 胡青青. 碳化硅中子探测器的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.  
HU Qingqing. Study on silicon carbide neutron detector [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- 7 Liu L Y, Ouyang X, Ruan J L, *et al.* Performance comparison between SiC and Si neutron detectors in deuterium - tritium fusion neutron irradiation[J]. IEEE

- Transactions on Nuclear Science, 2019, **66**(4): 737 - 741. DOI: [10.1109/TNS.2019.2901797](https://doi.org/10.1109/TNS.2019.2901797).
- 8 冉建玲, 卢小龙, 马占文, 等. 基于微通道板的快中子像探测器转换器的模拟研究[J]. 核技术, 2015, **38**(9): 090401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090401).  
RAN Jianling, LU Xiaolong, MA Zhanwen, *et al.* Simulation study on the converter of fast neutron imaging detector based on micro-channel plates[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(9): 090401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090401).
- 9 蒋勇, 李俊杰, 郑春, 等. <sup>6</sup>LiF 夹心谱仪探头用金硅面垒探测器性能测定[J]. 核动力工程, 2008, **29**(5): 94 - 97.  
JIANG Yong, LI Junjie, ZHENG Chun, *et al.* Performance measurement of aurum-silicon surface barrier detector in <sup>6</sup>LiF sandwich semiconductor spectrometer[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, **29**(5): 94 - 97.
- 10 张少华, 吴健, 蒋勇. 碳化硅热中子探测器的优化设计[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(4): 439 - 443. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2016.04.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2016.04.021).  
ZHANG Shaohua, WU Jian, JIANG Yong. Optimization design of silicon carbide thermal neutron detectors[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, **36**(4): 439 - 443. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2016.04.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2016.04.021).
- 11 包宗渝, 岳骞, 陈军, 等. 热中子参考辐射场[J]. 原子能科学技术, 1999, **33**(6): 510 - 514. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6931.1999.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6931.1999.06.005).  
BAO Zongyu, YUE Qian, CHEN Jun, *et al.* The neutron reference radiation field at the thermal energy region[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1999, **33**(6): 510 - 514. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6931.1999.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6931.1999.06.005).
- 12 陈红涛, 赵芳. 高压倍加器微秒脉冲束系统的建立[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(7): 1300 - 1303. DOI: [10.7538/yzk.2014.48.07.1300](https://doi.org/10.7538/yzk.2014.48.07.1300).  
CHEN Hongtao, ZHAO Fang. Establishment of microsecond pulse beam system on cockcroft-walton accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(7): 1300 - 1303. DOI: [10.7538/yzk.2014.48.07.1300](https://doi.org/10.7538/yzk.2014.48.07.1300).
- 13 骆海龙, 刘毅娜, 王志强, 等. 中子剂量仪表校准的本底扣除方法研究[J]. 辐射防护, 2012, **32**(5): 273 - 276.  
LUO Hailong, LIU Yina, WANG Zhiqiang, *et al.* Comparison of response with different background subtracting methods in neutron dosimeter calibration[J]. Radiation Protection, 2012, **32**(5): 273 - 276.
- 14 赵燕子. 体源中<sup>60</sup>Co  $\gamma$ 射线的符合相加修正因子测量[J]. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(5): 994 - 998. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2008.05.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2008.05.032).  
ZHAO Yanzi. Measurement of compensation factors for coincidence in detection of Co-60 in solid source[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **28**(5): 994 - 998. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2008.05.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2008.05.032).