

用于涉核场所中子能谱测量的中子旋转谱仪研制

李世焱¹, 聂萍², 陆慧晨², 秦茜¹, 李彪³, 肖凯歌¹, 侯志², 郑琦²

¹中国原子能科学研究院, 北京

²上海埃依斯航天科技有限公司, 上海

³上海宇航系统工程研究所, 上海

收稿日期: 2023年6月12日; 录用日期: 2023年7月19日; 发布日期: 2023年7月26日

摘要

针对涉核场所现场中子能谱测量问题, 研制了一种用于混合场中子能谱测量的智能化中子旋转谱仪。该谱仪主要由搭载在匀速转台上的探测器系统和电子学系统两部分组成。探测器系统包括5支气体探测器和1支塑料闪烁体探测器。电子学系统主要由信号调理电路、多通道信号采集处理电路和电源电路三部分组成。可实现所有探测器同时测量, 并同时信号采集与处理。该谱仪具有能量分辨率高(5.4%@1.2 MeV), 同时具备n/γ甄别能力(品质因数(Figure of Merit, FOM) = 1.37)等优点, 满足一般涉核场所中子能谱测量需求。

关键词

中子能谱仪, 气体探测器, 闪烁体探测器, 多道分析器, FPGA

Design of Neutron Rotation Spectrometer for Neutron Spectrum Measurement in Nuclear Sites

Shiyao Li¹, Ping Nie², Huichen Lu², Xi Qin¹, Biao Li³, Kaige Xiao¹, Zhi Hou², Qi Zheng²

¹China Institute of Atomic Energy, Beijing

²Shanghai ASES Aerospace Technology Co., LTD., Shanghai

³Shanghai Aerospace System Engineering Research Institute, Shanghai

Received: Jun. 12th, 2023; accepted: Jul. 19th, 2023; published: Jul. 26th, 2023

文章引用: 李世焱, 聂萍, 陆慧晨, 秦茜, 李彪, 肖凯歌, 侯志, 郑琦. 用于涉核场所中子能谱测量的中子旋转谱仪研制[J]. 核科学与技术, 2023, 11(3): 295-304. DOI: 10.12677/nst.2023.113031

Abstract

In order to solve the problem of neutron spectrum measurement in nuclear-related sites, an intelligent neutron rotation spectrometer for neutron spectrum measurement in mixed field is developed. The spectrometer is mainly composed of a detector system and an electronics system mounted on a turntable with uniform velocity. The detector system is mainly composed 5 gas detectors and 1 plastic scintillator detector. The electronic system is mainly composed of signal conditioning circuit, multi-channel signal acquisition and processing circuit and power supply circuit. All detectors can be measured simultaneously, and signal acquisition and processing can be carried out simultaneously. The spectrometer has high energy resolution (5.4%@1 MeV), and also has n/ γ discrimination capability (FOM (Figure of Merit) = 1.37), which can meet the requirements of neutron spectroscopy measurement in general nuclear-related sites.

Keywords

Neutron Spectrometer, Gas Detector, Scintillator, Multichannel Analyzer, FPGA

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 1932 年英国物理学家查德威克(J. Chadwick)发现中子以来,中子在核反应堆应用、核武器研制、材料检测分析和应用医学等领域中都发挥着至关重要的作用[1] [2] [3] [4]。中子能谱[1],即单位中子能量范围内中子的数目随能量变化的分布,是各类中子源的重要特征参数之一。准确的中子能谱分布为核物理实验及其他应用研究提供基础参数,目前针对不同的可测能量范围、探测效率、测量准确度和测量场所的需求,研制了基于不同中子探测方法的中子能谱仪,常见的有多球中子谱仪、半导体夹心中子谱仪和组合型中子谱仪等。

多球中子谱仪[5] [6]结构简单、制作容易,对 γ 射线响应很低,具有各项同性。英国和德国分别在英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)和德国联邦物理研究院(Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, PTB)建立了多球谱仪测量系统。PTB 与英国 Centronic 公司合作,研制了热中子~150 MeV 能量测量范围的商售多球中子谱仪。原子能院计量站建立了基于 9 个不同尺寸慢化球的商售多球谱仪,其能量测量范围是热中子~15 MeV。但其能量分辨率较低,作为中子谱注量传递标准时校准积分中子注量的不确定度较差, $U = 30\%$ ($k = 2$)。且其质量重体积大,测量时需频繁更换探测器,测量过程繁琐。

半导体夹心中子谱仪[7] [8] [9] [10]是在两个半导体探测器之间放置 ${}^6\text{LiF}$ 薄膜或充满 ${}^3\text{He}$ 气体作为中子转换靶,通过符合测量的方式可以扣除干扰,因此具有较好的能量分辨效果。同时其较小的体积可以减少对辐照场的扰动。上世纪 90 年代,美国 Marsh 等人研制了能量测量范围 0.1~15 MeV 的 ${}^3\text{He}$ 夹心谱仪。2008 年西北核技术所江新标等人研制了用于西安脉冲堆中子能谱测量的 ${}^3\text{He}$ 夹心谱仪。但 Au-Si 面垒半导体探测器抗快中子辐照能力差,使用寿命短。

组合型中子谱仪[11] [12] [13] [14] [15]通常由多个探测器组合而成,每个探测器测量不同能量范围内的中子,通过对各能区内中子计数率的测量重建中子能谱。2000 年以来 Bubble 公司研发了一款 ROSPEC

谱仪, 该谱仪由 2 支 ^3He 正比计数管和 4 支反冲质子正比计数管组成, 所有探测器同时测量, 显著缩短测量时间。谱仪采用圆盘旋转设计, 能够降低中子场的各向异性影响。通过单能中子场对单个探测器的响应进行了校准, 但没有考虑探测器之间的相互散射影响。此外, 该谱仪的可测量中子能量范围较窄, 为 50 keV~4.5 MeV。

目前国际上商售的现场中子能谱测量仪只有 2~3 种, 其中有部分非常昂贵, 且部分谱仪对中国禁售。国内针对现场中子能谱测量仪的研究目前还停留在实验室阶段, 且多为多球谱仪系统。因此本工作在参考国内外中子谱仪的基础上, 针对涉核场所现场中子能谱测量问题, 研制了一种用于混合场中子能谱测量的智能化中子旋转谱仪。

2. 总体设计

中子旋转谱仪的总体设计可分为探测器系统和电子学系统两部分。探测器系统承担的主要任务是测量辐射粒子, 并将其转化为可采集的电信号。电子学系统的主要任务是将探测器系统输出的信号进行捕获与处理, 转化为中子能谱信息, 并提供探测器系统所需的电气环境。

研制的中子旋转谱仪实物图见图 1, 整机尺寸为 $\Phi 300\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 。探测器系统主要由 2 支 ^3He 气体探测器, 3 支含氢气体探测器与 1 支塑料闪烁体探测器组成。电子学系统主要包含探测器信号调理电路、多通道信号采集处理电路和电源电路三部分。探测器系统与电子学系统固定于可匀速旋转的转台机构上, 从而减少因中子辐射场各向异性导致的测量不准确, 缩短测量时间。整机结构简图如图 2 所示, 主要部组件排布如图 3 所示。

3. 探测器系统

研制的中子旋转谱仪由 5 支气体探测器与 1 支塑料闪烁体探测器组成。其中两支 ^3He 气体探测器一支为裸管, 可对所有能量的中子产生响应; 另一支包镅, 可探测能量高于热能的中子。三只含氢气体探测器内充不同成分的工作气体, 分别探测 144 keV~250 keV 能区、250 keV~565 keV 能区、565 keV~1.2 MeV 能区的中子。塑料闪烁体型号为 EJ-276, 可探测 1.2 MeV~20 MeV 能区的中子, 并同时进行中子/伽马甄别。



Figure 1. Neutron Rotation Spectrometer
图 1. 中子旋转谱仪整机

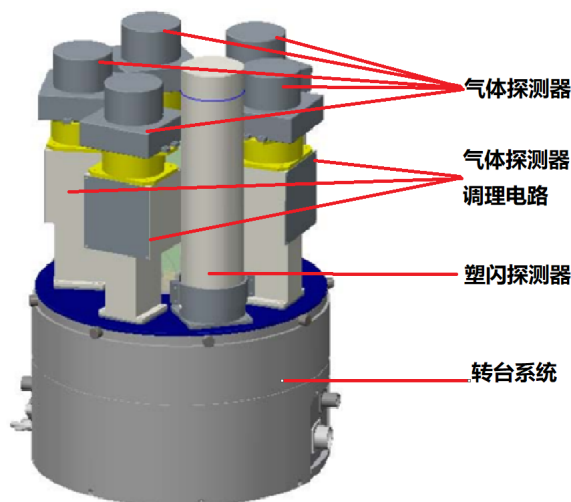


Figure 2. Schematic diagram of the neutron rotation spectrometer

图 2. 中子旋转谱仪简图

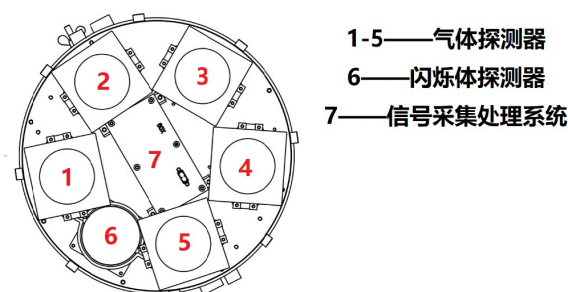


Figure 3. Arrangement diagram of the main components of the spectrometer

图 3. 谱仪主要部组件排布图

3.1. 气体探测器

气体探测器是中子旋转谱仪的重要组成部分，负责捕获与探测中子辐射。本工作使用的气体探测器以中国原子能科学研究院核技术综合研究所中子室自研气体探测器为原型。该探测器的外形设计见图 4，外壳为不锈钢材质，内部组件主要有场笼、气体电子倍增器(Gas Electron Multiplier, GEM)、阳极收集板、螺丝与导线等。可根据实验需求，在使用时充入不同气体种类、混合比例和气压的工作气体，从而达到不同的中子探测性能指标要求。同时各气体探测器的重要零部件可以通用，降低谱仪的制造难度，提高可维修性。

含氢气体探测器的工作原理是，不同能量的中子与工作气体中的氢原子发生弹性散射产生的反冲质子使工作气体电离和激发从而产生次级电子，次级电子在电场的作用下向阳极漂移，经过气体倍增装置 GEM 后在阳极上产生感应电荷。n-p 散射的反应截面已经得到非常精确的测量，20 MeV 以下的全截面和弹性散射微分截面的测量不确定度分别为 0.2%和 1%。根据运动学原理，反冲核的质量数越小，中子入射产生反冲核的能量就越高。氢核是质量数最小的原子核，因此在相同条件下反冲质子能量最高，更易于测量。采用 ^{241}Am α 源对含氢气体探测器的能量分辨率进行了测量，测量结果见图 5，能量分辨率为 4.52%。

^3He 气体探测器基于 $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ 反应对 neutron 进行探测, 其出射带电粒子的动能之和对于某一固定入射中子能量是一常数(其值为 $E_n + 0.77\text{ MeV}$), 因此其输出脉冲幅度理论上也是一常数。本工作研制的中子旋转谱仪利用镉对热能中子的屏蔽作用, 通过一支探测器包镉, 另一支探测器为裸管的测量方法得到 $0.025\text{ eV}\sim 0.5\text{ eV}$ 能区中子的计数。利用同位素中子源对 ^3He 气体探测器进行了测试, 实验结果见图 6。图 6 中, 淡蓝色部分为噪声信号, 红色部分为中子信号, 电子学噪声可以与信号完全分开, 峰形的展宽主要是由于气体放大, 粒子重组的统计涨落和电子学噪声引起的。

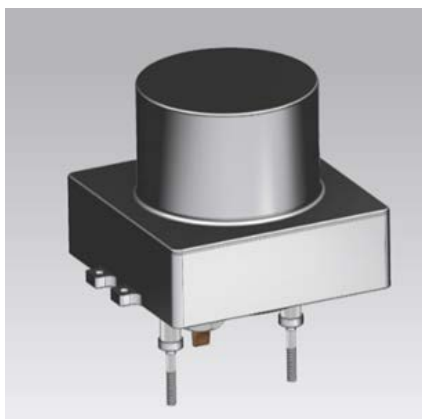


Figure 4. Gas detector design
图 4. 气体探测器设计图

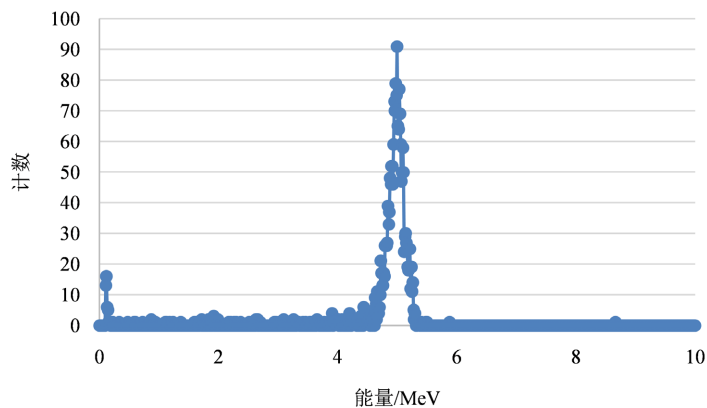


Figure 5. Experimental measurements of energy resolution
图 5. 能量分辨率测量结果

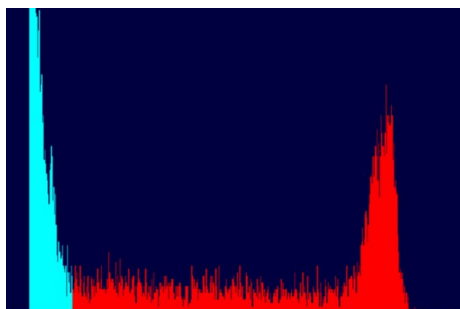


Figure 6. ^3He gas detector pulse amplitude spectrum
图 6. ^3He 气体探测器脉冲幅度谱

3.2. 闪烁体探测器

闪烁体探测器具有较好的中子/伽马甄别能力,其中塑料闪烁体相比液体闪烁体具有更强的稳定性,不易发生泄漏、破裂等故障。中子进入塑料闪烁体后与氢原子发生相互作用产生反冲质子,反冲质子在闪烁体中沉积能量,使闪烁体电离或激发。第一闪烁物质退激后放出波长约为 350~400 nm 范围的荧光,第二闪烁物质退激时放出 420~480 nm 范围的荧光。荧光光子穿过闪烁体后通过光耦合剂和光导打到光电倍增管的光阴极上产生光电子,光电子经多级倍增后从打拿极或阳极引出。本工作选用型号为 EJ-276 的塑料闪烁体探测器,如图 7 所示。在中国原子能科学研究院核技所中子室 5SDH-2 串行加速器产生的单能中子参考辐射场上对 EJ-276 塑料闪烁体探测器进行了能量刻度。



Figure 7. EJ-276 plastic scintillator detector

图 7. EJ-276 塑料闪烁体探测器

4. 电子学系统

本工作研制的中子能谱仪同时具备中子能谱测量和中子/伽马甄别能力。因此电子学系统需设计不同增益与带宽的信号放大电路,分别处理气体探测器与闪烁体探测器的信号,并利用采样率不同的模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)将波形数字化,最后通过现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)实现中子/伽马信号甄别与脉冲幅度谱的生成[16] [17] [18] [19]。该电子学系统的总体设计如图 8 所示,主要包含探测器信号调理电路、多通道信号采集处理电路和电源电路三部分。

探测器信号调理电路 5305 含五路气体探测器调理电路与一路闪烁体探测器调理电路,分为高压电源模块和信号调理电路两部分。高压电源模块为探测器提供工作所需的直流偏压,信号调理电路利用模拟器件将探测器输出的信号进行放大、成型处理。

多通道信号采集电路主要依靠差分驱动电路与高速 ADC 芯片实现信号的模数转换,经 ADC 转换后的数字信号在 FPGA 处理下实现脉冲波形采集、脉冲幅度分析和脉冲波形甄别功能。采用以太网通信方式在信号采集处理模块与上位机之间进行数据交互,可以实现高达 1 Gbps 的传输速率。

电源模块分为模拟电源和数字电源两部分,分别为弱电荷信号放大成型电路和 FPGA 及相关数字芯片提供电能。

5. 性能测试

5.1. 能量分辨率测试

采用中国原子能科学研究院 5SDH-2 型串行加速器 $T(p,n)^3\text{He}$ 反应产生的 1.2 MeV 中子对谱仪的能量分辨率进行了测试,通过中国原子能科学研究院核技术综合研究所中子室研发的基于遗传基因算法的中

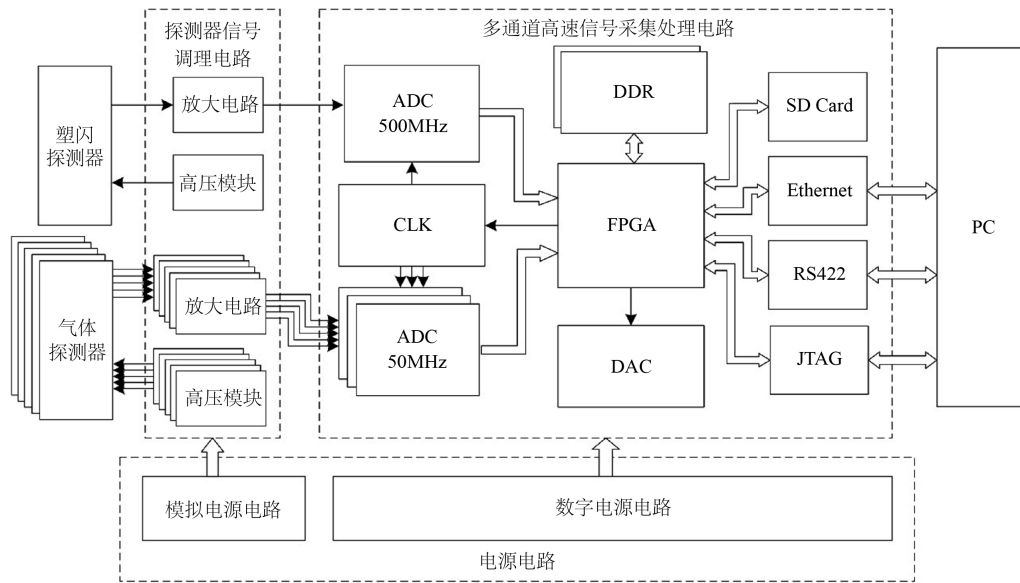


Figure 8. Block diagram of spectral electrographic system

图 8. 谱仪电子学系统框图

子能谱解谱程序获得的中子能谱见图 9，图中 1.2 MeV 峰值高度为 $3.62\text{E}+06$ ，半峰全宽(Full Width at Half Maximum, *FWHM*) [20] [21]为 0.64 MeV。相对能量分辨率为 $5.4\%\text{@}1.2\text{ MeV}$ 。

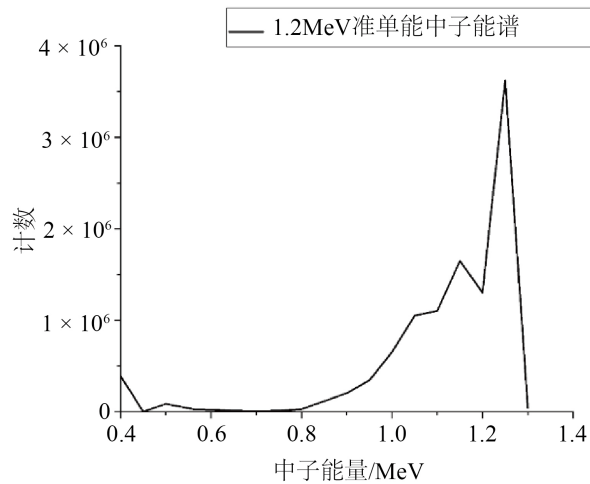


Figure 9. Energy resolution measurement results

图 9. 能量分辨率测量结果

5.2. n/γ 甄别因子测试

采用 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源对谱仪的 n/γ 甄别因子进行测量。使用长短积分时间窗法进行 n/γ 甄别。选择适当的积分长窗和短窗，绘制脉冲形状甄别(Pulse Shape Discriminator, PSD)谱，在脉冲形状甄别谱中选出中子峰的范围，并将其投影在脉冲幅度谱上，根据脉冲形状甄别谱的谱形，计算 γ 峰半高宽 P_γ ，中子峰半高宽 P_n 和两峰值之间的距离 L 。测量结果见图 10，图中左峰值为 γ 峰，峰半高宽 *FWHM* 为 15；右峰为中子峰，峰半高宽 *FWHM* 为 52；中子峰与 γ 峰峰位之间的距离为 92，用 L 表示。根据 $FOM = L/(P_\gamma + P_n)$ [22]计

算得到品质因数 FOM 为 1.37。

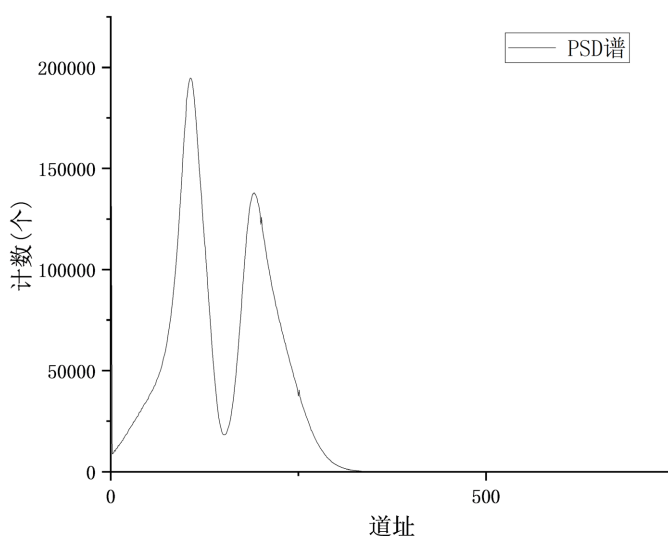


Figure 10. n/γ Discrimination Spectrum From $^{241}\text{Am-Be}$ Source
图 10. $^{241}\text{Am-Be}$ 源 n/γ 甄别谱

6. 总结

针对涉核场所现场中子能谱测量，本文研制了一种智能化中子旋转谱仪。其在匀速旋转平台上搭载 5 只气体探测器和一只闪烁体探测器同时测量，适用于热能~20 MeV 中子/伽马混合辐射场中子能谱测量。其集成电子学系统满足气体探测器与闪烁体探测器信号的同时采集与处理。分别采用加速器中子源和同位素中子源对该谱仪进行了性能测试，测试结果表明该谱仪具有能量分辨率高(5.4%@1.2 MeV)，同时具备 n/γ 甄别能力($FOM = 1.37$)的特点。为解决目前现场中子能谱测量仪器质量重、体积大、操作繁琐以及精度不高等问题提供参考。

参考文献

- [1] 刘圣康. 中子物理[M]. 北京: 原子能出版社, 1986.
- [2] 丁大钊, 叶春堂, 等. 中子物理学原理、方法与应用上[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.
- [3] 丁厚本, 王乃彦. 中子源物理[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [4] 卢希庭. 原子核物理修订版[M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
- [5] 宋逢泉, 祝庆军, 廖燕飞, 宋钢. Bonner 球谱仪对 Pu-Be 源中子能谱的测量[J]. 核科学与工程, 2013(1): 60-64.
- [6] Bedogni, R., Pelliccioni, M. and Esposito, A. (2010) A Parametric Model to Describe Neutron Spectra around High-Energy Electron Accelerators and Its Application in Neutron Spectrometry with Bonner Spheres. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **615**, 78-82. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.01.031>
- [7] 李润良, 汪崇森, 周守荣, 谢让达, 庄秀群, 金荣华, 卢慧筠, 孙汉城. 用 ^6Li 半导体谱仪测量临界装置中子能谱[J]. 核科学与工程, 1983(2): 128-134+10+7.
- [8] 刘颖. 基于 PIPS 的 ^6LiF 夹心中子谱仪的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [9] 蒋勇. 基于 PIPS 的数字化 ^6Li 夹心谱仪中子能谱测量技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 中国工程物理研究院, 2019.
- [10] 李俊杰, 蒋勇, 郑春. ^3He 半导体夹心中子能谱仪[J]. 核技术, 2011, 34(9): 705-709.
- [11] Heimbach, C. (2008) NIST Calibration of a Neutron Spectrometer ROSPEC. *Journal of Research of the National In-*

-
- stitute of Standards and Technology*, **111**, 419-428. <https://doi.org/10.6028/jres.111.032>
- [12] Ing, H., Clifford, T., McLean, T., Webb, W., Cousins, T. and Dhermain, J. (1997) ROSPEC—A Simple Reliable High Resolution Neutron Spectrometer. *Radiation Protection Dosimetry*, **70**, 273-278. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a031959>
- [13] Weaver, J.A., Joyce, M.J., Peyton, A.J. and Roskell, J. (2002) Recent Improvements to a Transportable Neutron Spectrometer (TNS). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **476**, 143-148. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01420-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01420-6)
- [14] Williams, A.M., Spyrou, N.M., Brushwood, J.M. and Beeley, P.A. (2002) Considerations in the Design of an Improved Transportable Neutron Spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **476**, 149-154. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01421-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01421-8)
- [15] 李哲, 张译文, 孙世峰, 王宝义, 魏龙. γ 射线闪烁体探测器响应函数模型研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(8): 1354-1358.
- [16] 高嵩. 基于 FPGA 的多道脉冲幅度分析器研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [17] 邹伟. 基于 FPGA 的数字化多道脉冲幅度分析器的研制[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [18] 姚阳. 基于 FPGA 的数字多道脉冲幅度分析器的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [19] 任印权. 基于 FPGA 的数字多道脉冲幅度分析器关键技术与系统实现[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 东华理工大学, 2019.
- [20] 丁洪林. 核辐射探测器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [21] 复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1981.
- [22] Mianowski, S., Brylew, K., Dziedzic, A., *et al.* (2020) Neutron Hardness of EJ-276 Scintillation Material. *Journal of Instrumentation*, **15**, P10012. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/10/P10012>

附 录

文章中出现与中子能谱测量相关的专业名词注释如下。

1) 半峰全宽(Full Width at Half Maximum, *FWHM*): 又叫半高宽、半峰宽。针对测量谱中的某个单能峰, 半极大值处的宽度。

2) 相对能量分辨率: 在能量 E 时的单能峰半峰全宽 ΔE 与能量 E 的比值。本文中单能峰能量 $E = 1.2$ MeV, 半峰全宽 $\Delta E = 0.64$ MeV

$$R(E) = \Delta E / E$$

3) 品质因数(Figure of Merit, *FOM*): 峰值之差与半峰全宽之和的比值。在中子/伽马脉冲形状甄别(PSD)谱上, 中子峰到伽马峰的峰值之差为 L , 中子峰半峰全宽为 P_n , 伽马峰半峰全宽为 P_γ 。

$$FOM = L / (P_\gamma + P_n)$$