

狭缝式高灵敏裂变中子探测系统

欧阳晓平^{1)†} 李真富²⁾ 王群书¹⁾²⁾ 霍裕昆³⁾ 马彦良²⁾ 张前美²⁾ 张国光²⁾ 金玉仁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)

³⁾复旦大学现代物理研究所, 上海 200433)

(2004 年 9 月 3 日收到 2004 年 12 月 27 日收到修改稿)

研制了狭缝-外延式高灵敏大面积 PIN 裂变中子探测系统. 其对 14MeV、2.5MeV 中子灵敏度可达 $10^{-16} \text{C} \cdot \text{cm}^2$, 比原有典型的脉冲裂变中子探测系统高 4 个量级. 采用外延式铅狭缝准直结构, 研制灵敏区尺寸为 $\phi 60\text{mm}$ 、厚度为 $200\mu\text{m}$ — $300\mu\text{m}$ 的大面积 PIN 半导体探测器, 以 Be 膜为衬底, 有效直径为 $\phi 60$ 的 ^{235}U 裂变靶, 解决了该探测器研制中的高灵敏度和 n/γ 分辨难题. 该系统已在实践中获得成功应用.

关键词: 裂变中子探测系统, 大面积 PIN 探测器, 大面积裂变靶, 高灵敏探测系统

PACC: 2960J, 2970

1. 引言

在脉冲裂变反应堆等装置的脉冲中子参数测量中, 需要研制灵敏度高、能量响应平坦、具有 n/γ 分辨能力的脉冲裂变探测系统. 裂变法是中子探测的一种基本方法^[1], 其特点是中子诱发裂变的截面变化非常平缓, 对 ^{235}U 材料, 在 0.3MeV—6MeV 能量区间, 截面差异最多不超过 17%, 因此, 基于 ^{235}U 材料的裂变中子探测系统对能谱不能确切知晓的中子束强度测量, 具有极佳的能量响应. 然而, 由于裂变碎片质量大, 仅能穿透几 mg/cm^2 的裂变物质, 严重制约了该类探测系统的灵敏度. 例如, 典型强流脉冲裂变中子探测系统的灵敏度一般在 $10^{-21} \text{C} \cdot \text{cm}^2$ — $10^{-25} \text{C} \cdot \text{cm}^2$ ^[2], 这么低的灵敏度显然很难满足低强度脉冲中子辐射场的测量要求. 此外, 其结构设计在中子、伽玛等水平的脉冲辐射场中探测中子, 也不能解决 n/γ 分辨问题. 因此, 为解决这类中子参数测量困难, 需要研制具有高灵敏度、高 n/γ 分辨能力的裂变中子探测系统. 根据裂变靶室的探测原理和一般结构, 实现系统的高灵敏, 研究中需要解决三个问题: 1) 研制大面积 PIN 半导体探测器; 2) 研制大面积低本底裂变靶; 3) 采用创新结构设计, 显著缩短靶和探测器之间的距离, 增加探测器对裂变碎片的

接收概率. 实现系统的高 n/γ 分辨, 必须设法解决入射 γ 射线在系统入射窗上的散射干扰, 大幅度降低伴随 γ 射线在裂变靶上散射引起的干扰.

2. 探测器的结构设计

典型的裂变中子探测靶室结构如图 1 所示^[3]. 但该结构限制了系统的中子灵敏度, 无法满足低强度测量要求. 需要缩短探测器和靶之间的距离. 最可能采用的结构如图 2 和图 3 所示^[1].

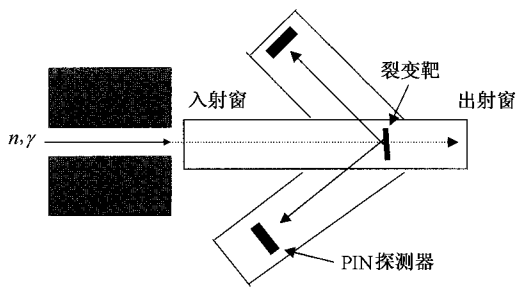


图 1 典型裂变碎片探测系统示意图^[2]

无论采用图 2 和图 3 中的那种结构, 都会遇到 2 个问题. 1) 来自于探测源 γ 射线在靶室入射窗上的散射产生的散射 γ , 将无遮挡地进入 PIN 探测器.

† 联系人. E-mail: oyxp2003@yahoo.com.cn

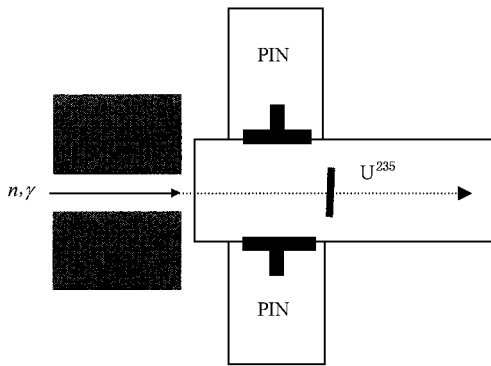


图 2 探测系统可能的采用的结构之一

之间的距离,而且, γ 射线在入射窗上的散射能够被铅狭缝准直器所屏蔽,这样降低探测靶室的窗 γ 散射影响和提高灵敏度要求得到满足; 3) U^{235} 裂变靶与束流平行放置,以缩短靶和 PIN 探测器的距离,提高系统中子灵敏度. 实际结构如图 4 所示.

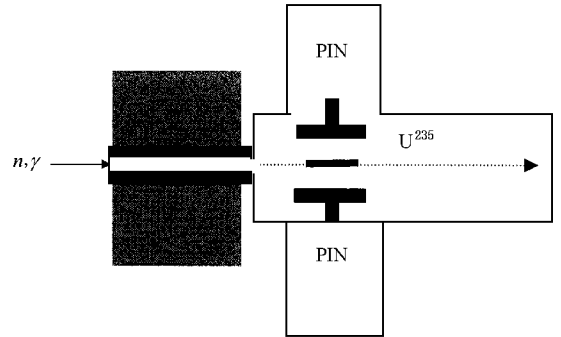


图 4 探测系统的狭缝—外延结构设计

2.1. 大面积 PIN 探测器研制

传统 PIN 探测器面积一般为 $\phi 20\text{mm}$,为满足探测系统中子灵敏度设计要求,必须研制大面积 PIN 探测器. 该探测器采用电阻率为 $4000\text{—}20000\Omega\cdot\text{cm}$ 的高阻单晶硅片,经磨片、腐蚀和离子注入,在硅片两侧通过掺杂形成 N^+ 区薄层和 P^+ 区薄层,经清洗、烘干和真空退火处理封装而成. 同时,在 P^+ 区和 N^+ 区的外表面蒸上约 $300\text{—}500\text{nm}$ 左右的金层,作为欧姆接触电极. 探测器灵敏区面积最大为 $\phi 60\text{mm}$,灵敏区(全耗尽)厚度为 $200\mu\text{m}\text{—}300\mu\text{m}$,在 600V 偏压下漏电流一般为 $30\mu\text{A}$,死层厚度小于 150.0nm ,外形见图 5 所示^[4].

2.2. 大面积低本底裂变靶研制

通常,裂变靶厚度为几十 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{—}$ 几百 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,

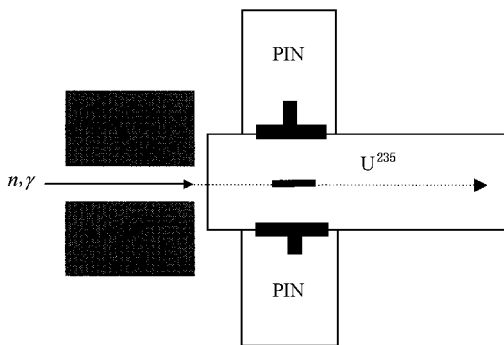


图 3 探测系统可能采用的结构之二

而 $\phi 60\text{mm}$ 的探测器对散射 γ 的灵敏度为 $\sim 10^{-15}\text{C}\cdot\text{cm}^2$,因而需要从结构设计上设法消除这部分干扰; 2) 探测器不能在辐射通道中直照,几何上探测器与裂变靶的距离将受到限制,其中子灵敏度将很难达到 $\sim 10^{-16}\text{C}\cdot\text{cm}^2$ 水平. 为解决这两个问题,我们采取如下结构设计: 1) 准直孔采用狭缝设计,从而极大缩短探测器与裂变靶之间的距离,为大幅度提高灵敏度提供可能; 2) 准直器采用铅材料,将入射窗向前外延 $20\text{—}30\text{cm}$,这样,不仅增加了入射窗与探测器

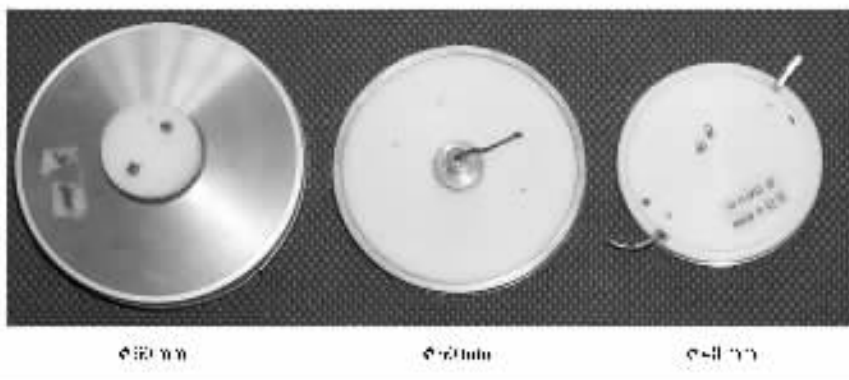


图 5 研制的三种大面积 PIN 半导体探测器外形,其灵敏区面积分别为 40mm , 50mm 和 60mm

靶面积为 $\phi 10\text{mm}$ ，为实现探测系统的高灵敏，需要研制靶厚为 $0.9\text{--}3\text{mg}/\text{cm}^2$ ，对 γ 射线散射相对很小的大面积低本底 ^{235}U 裂变靶。

我们采用电沉积方法，通过系列条件实验，研制

成功基于 Be 膜的大面积低本底 ^{235}U 裂变靶^[5]。靶参数为：尺寸： $\phi 10\text{mm}\text{--}\phi 70\text{mm}$ ，裂变材料面密度 $\rho \sim 1.8\text{mg}/\text{cm}^2$ ，Be 衬底厚度 $d \sim 50\mu\text{m}$ 。裂变靶外形如图 6 所示。

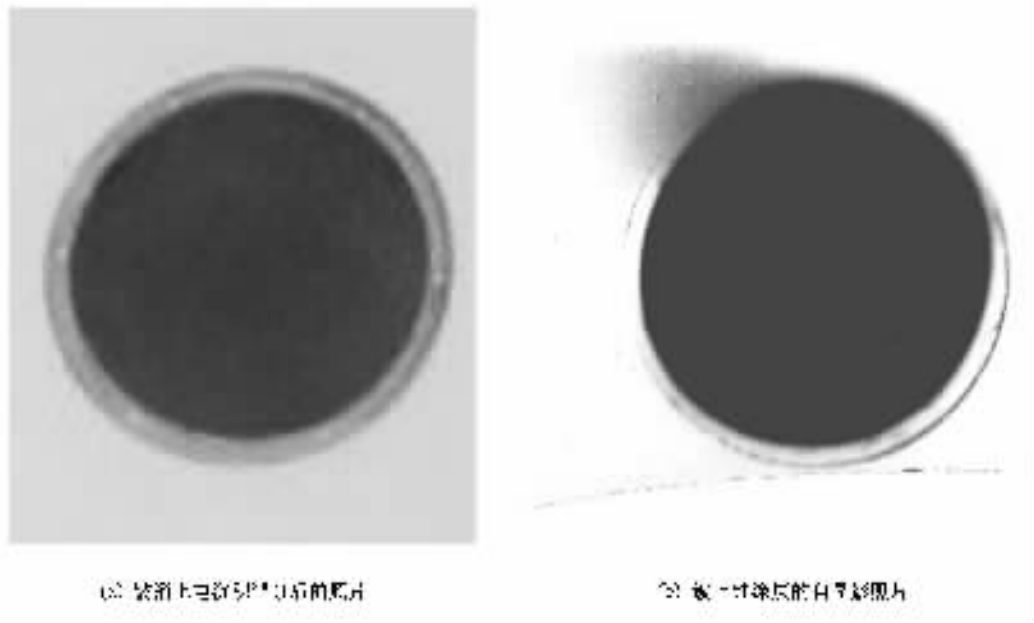


图 6 研制的大面积低本底裂变靶外形，靶尺寸最大为 $\phi 70\text{mm}$

3. 探测系统的中子灵敏度和 n/γ 分辨

根据设计，研制了 2 套实验靶室。在中国科学院兰州近代物理研究所 K600 倍加速器中子源上对狭缝—外延式大面积 PIN 裂变中子探测系统中子灵敏度进行了系统的实验研究，实验装置及准直器等布

局如图 7 和图 8 所示。大面积 Si-PIN 探测器记录到的典型裂变碎片谱见图 9，实测中子灵敏度部分结果见表 1 所示。

系统的 n/γ 分辨能力直接决定测量数据的质量。我们采用 Monte Carlo 方法对系统的 γ 灵敏度进行了理论计算并进行了实验测量。研究表明，探测系统的净 n/γ 分辨能力一般在 10 倍以上，最高可达 30 倍，部分结果见表 1。



图 7 狭缝实验系统

表 1 裂变靶探测器灵敏度标定结果

探测器 编号(尺寸)	靶面密度/ (mg/cm^2)	靶-探测器 距离/cm	14MeV 中子灵 敏度/ $\text{C}\cdot\text{cm}^2$	n/γ 分辨 (理论计算值)
2 # ($\phi 60$)	1.8 ($\phi 50$)	1.71	$1.06 \cdot 10^{-16}$	11.2
3 # ($\phi 60$)	0.945 ($\phi 30$)	1.71	$1.0 \cdot 10^{-17}$	
4 # ($\phi 60$)	1.8 ($\phi 50$)	2.21	$9.41 \cdot 10^{-17}$	13.8
6 # ($\phi 60$)	1.8 ($\phi 50$)	2.21	$9.50 \cdot 10^{-17}$	
48 # ($\phi 20$)	0.945 ($\phi 30$)	3.22	$3.23 \cdot 10^{-18}$	30
49 # ($\phi 20$)	1.69 ($\phi 30$)	3.22	$4.40 \cdot 10^{-18}$	32



图 8 狭缝外延式准直器和屏蔽体系统

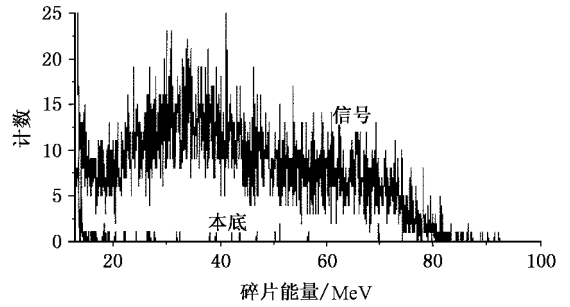


图 9 实验中记录到的裂变碎片谱形和本底谱

4. 结 论

通过铅狭缝-外延式结构设计,研制大面积 PIN 探测器和大面积低本底裂变变靶,我们研制成功了高灵敏裂变中子探测系统. 该系统中子灵敏度由通常

的 $\sim 10^{-21} \text{C} \cdot \text{cm}^{2[2]}$ 提高到 $\sim 10^{-16} \text{C} \cdot \text{cm}^2$ 量级, n/γ 分辨能力一般大于 10 倍,最高可达 30 多倍,适用于高 γ 环境下脉冲裂变中子参数的测量.

作者衷心感谢中国科学院兰州近代物理研究所 K600 倍加器中子源负责人王贤义教授及其同事在实验研究中提供的宝贵帮助.

- [1] Fudan Uni., Tsinghua Uni. and Peking Uni. 1985 *Experimental Methods in Nuclear Physics I*, (Beijing: Atomic Energy Press ㄨ in Chinese), [复旦大学、清华大学、北京大学合编:1985 原子核物理实验方法,上册(北京:原子能出版社)]
- [2] Liu Q Z *et al* 1994 *Diagnostic Technologies in Pulsed Radiation Fields* (Beijing: Science Press ㄨ in Chinese). [刘庆兆等 1994 脉冲辐射场诊断技术 北京:科学出版社]
- [3] Ouyang X P 2002 *Studies on the Detection of Pulsed Fission Neutrons from Low-Intensity Radiation Sources* (Shanghai: Fudan University)

(in Chinese) 欧阳晓平 2002 低强度脉冲裂变中子探测技术研究,上海:复旦大学]

- [4] Ouyang X P, Li Z F, Zhang G G *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1502 (in Chinese) [欧阳晓平、李真富、张国光等 2002 物理学报 **51** 1502]
- [5] Jing Y R, Ouyang X P, Li L *et al* 2001 *Science report of NINT B 2986* (in Chinese) [金玉仁、欧阳晓平、李琳等 2001 西北核技术研究所科技报告 B 2986]

A high sensitive fission neutron detector system with a lead slot collimator

Ouyang Xiao-Ping^{1)†} Li Zhen-Fu²⁾ Wang Qun-Shu^{1)‡} Huo Yu-Kun³⁾ Ma Yian-Liang²⁾ Zhang Qian-Mei²⁾
Zhang Guo-Guang²⁾ Jin Yu-Ren²⁾

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

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

³⁾(*Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

(Received 3 September 2004; revised manuscript received 27 December 2004)

Abstract

A fission neutron detector system with frontward-extended lead slot collimator has been developed and tested. By designing the slot collimator and developing large area PIN detectors as well as large area fissionable target with thin Be backing, this detector system can reach high neutron sensitivities up to $10^{-16} \text{C} \cdot \text{cm}^2$, which is about 4-5 orders of magnitude higher than that of existing fission detectors and high n/γ discrimination ratio up to 30.

Keywords : neutron detection, high sensitivity, high n/γ discrimination, fission, Be backing

PACC : 2960J, 2970

[†]Corresponding author. E-mail : oyxp2003@yahoo.com.cn