

# 用于 $n, \gamma$ 混合场的新型脉冲中子探测器研究<sup>\*</sup>

杨洪琼<sup>1)†</sup> 朱学彬<sup>1)</sup> 杨高照<sup>1)</sup> 李林波<sup>1)</sup> 宋献才<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

<sup>2)</sup> (中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳 621900)

(2003 年 12 月 17 日收到 2004 年 1 月 16 日收到修改稿)

新型脉冲中子探测器采用特殊工艺将两个 PIN 半导体组合而成. 利用脉冲  $\gamma$  辐射源研究了探测器对  $\gamma$  的响应; 利用脉冲中子源研究了探测器对 DT 中子的响应, 并与闪烁探测器进行了比较. 结果表明, 脉冲中子探测器对脉冲  $\gamma$  辐射基本不灵敏, 对脉冲中子辐射的灵敏程度依赖于中子辐射体, 是一种用于  $n, \gamma$  混合脉冲辐射场中子测量的新型探测器.

关键词: 硅半导体, 差分补偿, 脉冲中子探测器,  $n, \gamma$  混合场

PACC: 2940P, 2940

## 1. 引 言

中子和  $\gamma$  辐射往往是伴随的, 在测量中子时, 必须消除  $\gamma$  辐射的干扰, 在中子探测器的描述中,  $n, \gamma$  甄别特性是探测器的重要参数之一.

在稳态的  $n, \gamma$  混合辐射场的中子测量中,  $n, \gamma$  甄别方法较多<sup>[1]</sup>.

在瞬态的  $n, \gamma$  混合辐射场中, 常采用飞行时间法原理, 将  $n, \gamma$  辐射脉冲分开, 实现对脉冲中子的探测<sup>[2]</sup>. 但在某些实验装置条件下, 由于测量环境或者中子源强度等受到限制, 不能采用成熟的  $n, \gamma$  飞行时间差甄别混合辐射场中的  $\gamma$ , 尤其是在近距离测量中,  $n, \gamma$  分辨成为难题, 因此, 必须探索和研究一种适合于  $n, \gamma$  混合辐射场的新型脉冲中子探测器.

用于测量中子的探测器种类很多<sup>[3-6]</sup>, 其中, 硅半导体探测器对中子和  $\gamma$  辐射都灵敏, 电流型 PIN 半导体探测器常用于脉冲中子和  $\gamma$  辐射测量<sup>[7]</sup>. 根据  $n, \gamma$  混合脉冲辐射场的特点<sup>[8,9]</sup>, 利用差分补偿原理, 研制了特殊组合结构的电流型半导体脉冲中子探测器.

利用三通道发生器产生的  $\gamma$  脉冲、中子发生器产生的 DT 中子脉冲, 对新型半导体脉冲中子探测器进行了研究, 并与闪烁探测器对 DT 中子脉冲的

响应作了比较. 研究获得的结果证明, 这种新型脉冲中子探测器, 可用于  $n, \gamma$  混合辐射场的瞬态中子测量.

## 2. 探 测 器

### 2.1. 探测器的设计思路

通常, PIN 电流型半导体探测器输出负脉冲信号. 根据 PIN 探测器始终施加反偏压的原则, 在 P 极加负偏压时, 探测器输出信号为负脉冲, 那么, 在 N 极加正偏压时, 探测器输出信号为正脉冲. 这样, 将两个探测器组合使用, 当辐射同时穿过组合探测器时, 可以达到正负脉冲抵消, 即称为差分补偿原理. 因此, 使用相同的硅半导体材料, 将外形尺寸、灵敏层厚度、死层厚度、结电容等参数相同的两个半导体硅片, 采用特殊的制作工艺, 组合成新型半导体探测器, 将探测器的四个电极按照施加偏压和信号输出的原则进行特殊连接, 为其提供偏压供电和信号输出, 我们将此称为组合探测器. 此外, 也可以将组合探测器的电极分开, 当作两个 PIN 半导体探测器单独使用.

新型脉冲中子探测器, 由组合探测器和安装在辐射入射端的中子辐射体(如  $\text{CH}_2$ )组成. 如图 1.

<sup>\*</sup> 中国工程物理研究院科学技术基金(批准号 20030210)和中国工程物理研究院专项课题(303)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: LXL4\_me@163.com

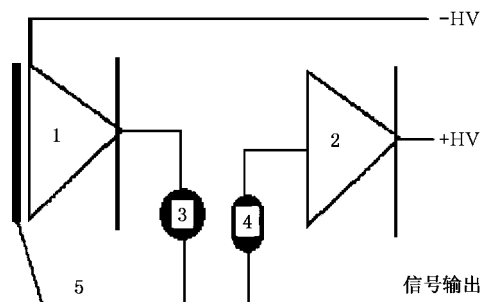


图1 脉冲中子探测器的组成示意图 1为PIN 1<sup>#</sup> ; 2为PIN 2<sup>#</sup> ; 3为补偿线路; 4为调制器 5为中子辐射体

## 2.2. 探测器的工作原理

新型半导体脉冲中子探测器始终施加反偏压。当脉冲中子和 $\gamma$ 辐射同时直接入射到脉冲中子探测器上,由于中子和 $\gamma$ 辐射均能穿过组合探测器,分别与组合探测器中的两个PIN电流型探测器作用,产生的脉冲波形在组合探测器的输出中相互抵消;只有中子在辐射体(聚乙烯薄膜 $\text{CH}_2$ )上产生的反冲质子在脉冲中子探测器中形成的电子-空穴对对输出信号有贡献(反冲质子的能量完全沉积在第一个PIN中),而 $\gamma$ 辐射在聚乙烯薄膜( $\text{CH}_2$ )上产生的干扰完全可以忽略。因此,脉冲中子探测器的输出信号为负信号。换言之,当采用脉冲 $\gamma$ 辐射标定脉冲中子探测器时,探测器的信号输出为“零”;当采用脉冲中子辐射标定时,探测器的信号输出为负信号。

## 3. 实验研究与结果

### 3.1. 组合探测器的调制

组合探测器的调制关系到对脉冲 $\gamma$ 辐射的抑制效果,是研制脉冲中子探测器的重要步骤之一。要使脉冲 $\gamma$ 辐射直接入射到探测器时的输出信号接近为“零”,那么,必须要求组合探测器中的两个硅半导体探测器的材料参数、探测器尺寸、灵敏层厚度、死层、暗电流等完全相同,还要考虑半导体厚度对 $\gamma$ 辐射的衰减。在研制过程中,除了采取有效的控制措施外,还需要在组合探测器制作完成后,采用线性电子元器件配合(如图1中的3和4),分别对两个半导体存在的不对称以及对 $\gamma$ 辐射的衰减进行调制或者补偿,使调制后的组合探测器达到抑制脉冲 $\gamma$ 辐射的效果,同时这也达到了抑制直接入射到组合探测器

的脉冲中子的输出。

### 3.2. 探测器的脉冲 $\gamma$ 辐射响应

三通道脉冲发生器CrC67装置的纳秒通道和皮秒通道,产生的 $\gamma$ 辐射脉冲: $\gamma$ 辐射能量平均值约0.7MeV,脉冲FWHM分别约为2ns和0.2ns。在CrC67装置上,分别利用纳秒通道和皮秒通道,研究了组合半导体脉冲中子探测器对脉冲 $\gamma$ 辐射的灵敏程度。脉冲中子探测器的输出 $\gamma$ 脉冲波形,见图2。

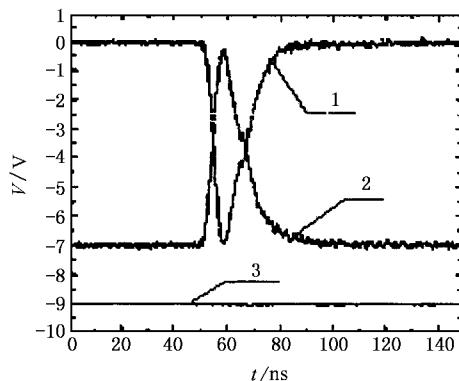


图2 探测器的脉冲 $\gamma$ 辐射输出波形比较

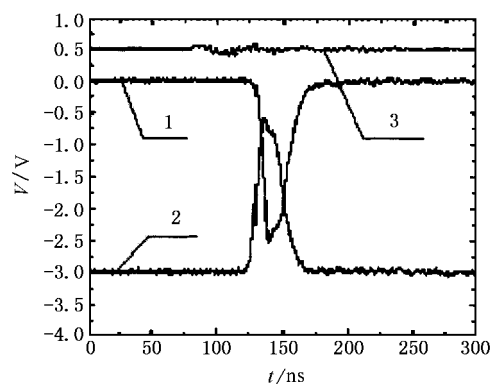
图2中,曲线1和曲线2分别是调制后的组合探测器中的单只PIN电流型探测器1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>的输出 $\gamma$ 脉冲波形(同一发 $\gamma$ 脉冲在探测器的入射端无辐射体),曲线3是脉冲中子探测器的输出 $\gamma$ 脉冲波形(辐射体是 $\text{CH}_2$ )。结果表明,脉冲中子探测器对脉冲 $\gamma$ 辐射基本不灵敏, $\gamma$ 辐射在聚乙烯薄膜( $\text{CH}_2$ )上产生的干扰完全可以忽略。

### 3.3. 探测器的DT脉冲中子响应

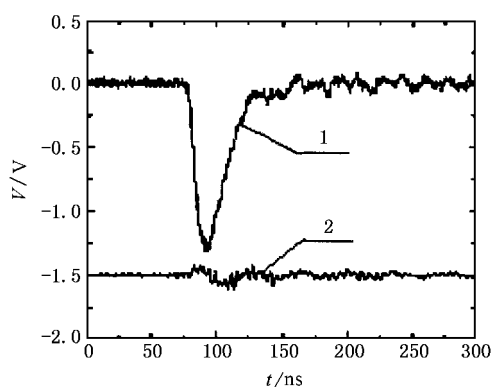
ИИГ-103型脉冲中子发生器(DPF),中子是在一个特殊的真空装置——等离子区聚集的腔内产生的,DPF工作在单次中子脉冲方式。DPF产生的脉冲中子能量为14MeV(对于DT反应),脉冲中子产额 $1 \times 10^9 - 5 \times 10^9$ /脉冲,脉冲的FWHM < 10ns。利用DPF产生的DT中子,研究了脉冲中子探测器对DT中子的响应。由于无 $\text{CH}_2$ 辐射转换体时的脉冲中子探测器输出信号太小,实验采用了铜网屏蔽电磁干扰。

脉冲中子探测器的DT中子响应研究获得的输出中子脉冲波形,见图3。

图3(a)中,曲线1和曲线2分别是调制后的组合探测器中的单只PIN电流型探测器1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>的输出中子脉冲波形(同一发中子脉冲),曲线3是脉冲



(a) 无辐射体的单只和组合 PIN 的输出



(b) 组合 PIN 在有、无辐射体时的输出

图 3 探测器的脉冲中子输出波形比较

中子探测器的输出中子波形(波形中的电磁干扰出现在中子爆发时刻),在探测器的入射端均无辐射体。

图 3(b)中,曲线 1 是脉冲中子探测器的输出 DT 中子脉冲波形;曲线 2 是脉冲中子探测器在无  $\text{CH}_2$  辐射体时的输出 DT 中子脉冲波形(波形中存在电磁干扰的影响)。

由脉冲中子探测器或者无中子辐射体的脉冲中子探测器的输出波形可以看出:探测器对脉冲中子辐射的灵敏程度依赖于中子辐射体;采用不同厚度的  $\text{CH}_2$  辐射体,可以获得不同幅度的 DT 中子输出波形。

### 3.4. 脉冲中子探测器与闪烁探测器的比较

在 DPF 装置上,利用产生的 DT 脉冲中子,测量了闪烁探测器对 DT 脉冲中子的响应,与新型脉冲中子探测器的输出比较。如图 4。

图 4 中,曲线 1 是脉冲中子探测器的输出 DT 中

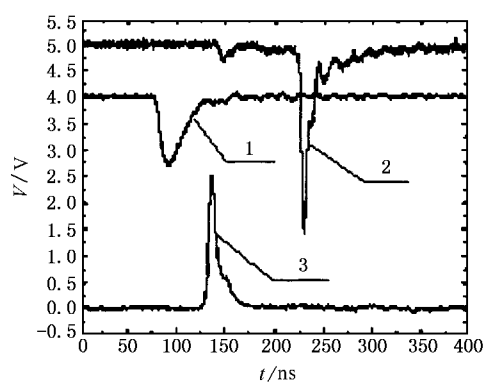


图 4 探测器与闪烁探测器的中子输出波形比较

子脉冲波形。曲线 2 和曲线 3 分别是 PMT 探测器和 GD100 探测器的输出波形。

PMT 闪烁探测器,由光电倍增管(PMT)加 ST401 闪烁体( $\phi 50\text{mm} \times 20\text{mm}$ )组成。由于 PMT 具有大于  $10^4$  的增益,为了输出信号在探测器的线性动态范围内,将探测器放置在距离中子源约 500cm 处。PMT 探测器测量获得的波形显示出了  $\gamma$  和中子的独立脉冲,前面幅度小的波形是  $\gamma$  脉冲,后面幅度大的波形是 DT 中子波形,两波形的时间差是  $\gamma$  和 DT 中子飞行时间差。如图 4 中的曲线 2。

GD100 闪烁探测器,由 GD100 光电管加 ST401 闪烁体( $\phi 100\text{mm} \times 20\text{mm}$ )组成。GD100 光电管的线性动态范围大,但它的增益为 1,受脉冲中子源强度的限制,在考虑到立体角的同时能有较大的输出信号,因此,尽可能靠近中子源(放置在约 16cm 处)。由于距离太近以及脉冲中子源本身的宽度, $\gamma$  和 DT 中子的飞行时间差不能将  $\gamma$  和中子波形分开。因此,只显示出了一个波形,这个波形是  $\gamma$  脉冲和 DT 中子脉冲的叠加,如图 4 中的曲线 3。如果曲线 2 中的  $\gamma$  脉冲幅度较大,这个叠加波形的影响则很明显地被观察。

图 4 的曲线 1 是脉冲中子探测器的输出,尽管探测器距离脉冲中子源很近( $\sim 10\text{cm}$  处),但由于对  $\gamma$  不灵敏,因此,曲线 1 是 DT 中子在  $\text{CH}_2$  辐射体上产生的反冲质子在探测器中的贡献。

从图 4 中的 3 个波形可以分析脉冲中子探测器的时间响应。闪烁探测器的时间响应很快,信号传输电缆很短(约 10m),记录示波器的频带为 1GHz,测量系统的时间响应对于脉冲中子源宽度完全可忽略。因此,GD100(ST401)的输出波形基本上代表了脉冲中子源波形(这里不考虑叠加在前沿上的  $\gamma$  脉

冲的贡献) ;PMT(ST401)的输出波形时间参数包含中子飞行时间展宽 ;脉冲中子探测器的输出波形时间特性是探测器的时间响应和中子源时间谱的总效应,脉冲中子探测器的时间响应特性将利用理论分析和实验验证作进一步研究.

## 4. 结 论

目前的研究结果表明 :

1. 脉冲中子探测器的信噪比大约为 30:1.
2. 脉冲中子探测器对  $\gamma$  脉冲辐射基本不灵敏.
3. 对脉冲中子辐射的灵敏程度依赖于中子辐射

体.探测器的灵敏度与探测效率、粒子沉积能量以及辐射体的厚度等有关,我们将进一步研究.

研究获得预期的效果,脉冲中子探测器对  $\gamma$  脉冲辐射具有很强的抑制作用,是一种适用于  $n, \gamma$  混合辐射场近距离测量的新型脉冲中子探测器.

我们将采用不同厚度的  $\text{CH}_2$  中子辐射体,研究探测器的中子灵敏度随辐射体厚度的变化 ;选取不同材料的中子辐射体(如  $^{235}\text{U}$  辐射体),研究并获得探测器的较平坦中子能量响应 ;采取必要的措施,扩展探测器的动态范围 ;使脉冲中子探测器在  $n, \gamma$  混合脉冲辐射场的中子测量中,成为一种很有前景的新型探测器,以便得到更广泛的应用.

- 
- [1] Ji C S 1998 *Neutron Detection Experiment Method* (Beijing : Atomic Energy Press) p249 (in Chinese) [汲长松 1998 中子探测实验方法(北京 :原子能出版社)第 249 页]
  - [2] Tang Z Y *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* (Overseas Edition) **8** 913
  - [3] Yang J L *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* (Overseas Edition) **8** 768
  - [4] Yang H Q *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2408 (in Chinese) [杨洪琼等 2001 物理学报 **50** 2408]
  - [5] Ouyang X P *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1502 (in Chinese) [欧阳小平等 2002 物理学报 **51** 1502]
  - [6] Xu R K *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2140 (in Chinese) [徐荣

- 昆等 2003 物理学报 **52** 2140]
- [7] Hu M C *et al* 2002 *Nuclear Electronica & Detection Technology* **22** 338 (in Chinese) [胡孟春等 2002 核电子学与探测技术 **22** 338]
- [8] Liu Q Z 1994 *The Diagnosis Technology of Pulse Radiation Filed* (Beijing : Science Press) p3 (in Chinese) [刘庆兆 1994 脉冲辐射场诊断技术(北京 :科学出版社)第 3 页]
- [9] Ouyang X P 2002 *The Dr. Thesis* (Fudan University) p7 (in Chinese) [欧阳晓平 2002 复旦大学博士学位论文 第 7 页]

# A new pulse neutron detector used in the mixture radiation fields of neutron and gamma rays<sup>\*</sup>

Yang Hong-Qiong<sup>1)†</sup> Zhu Xue-Bin<sup>1)</sup> Yang Gao-Zhao<sup>1)</sup> Li Lin-Bo<sup>1)</sup> Song Xian-Cai<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

<sup>2)</sup> (Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 17 December 2003 ; revised manuscript received 26 January 2004)

## Abstract

The new type of pulse neutron detector consists of two PIN detectors. The response for the  $\gamma$  rays was studied with the pulse gamma sources. The neutron response was studied using the DT neutron sources and compared with the scintillator detector. Results show that the detector is insensitive to gamma radiation, and the neutron sensitivity was determined by the neutron radiator. It is a new pulse neutron detector in the neutron and gamma mixed radiation fields.

**Keywords:** Si-semiconductor detector, differentiating compensation, pulse neutron detector, neutron and gamma mixture radiation fields

**PACC:** 2940P, 2940

<sup>\*</sup> Project supported by China Academy of Engineering Physics Science & Technique Fund (Grant No. 20030210) and 303 Project.

<sup>†</sup> E-mail: LXL4\_me1979@163.com