一种基于 ^{4}He 气闪烁体的裂变中子探测器

张小东† 邱孟通 张建福 欧阳晓平 张显鹏 陈亮

(西北核技术研究所辐射探测科学研究中心, 西安 710024)

(2012 年 4 月 9 日收到; 2012 年 7 月 2 日收到修改稿)

研制了一种新中子探测器, 它以 $^{235}UO_2$ 裂变靶作为转换靶, ^{4}He 气体作为闪烁体. 该探测器充分结合了 ^{235}U 和 ^{4}He 两种核素的特点, 从而具有中子能量响应平坦、中子灵敏度较高、n/γ 分辨本领高等优点, 能很好地在混合脉冲裂变辐射场中测量中子. 本文对探测器的原理和结构设计进行了介绍, 计算了不同能量中子、γ 射线在探测器中的能量沉积, 并从理论和实验上对探测器的中子灵敏度、γ 射线灵敏度、n/γ 分辨本领和时间响应进行了研究. 结果表明探测器的中子灵敏度约 10^{-15} C·cm^2, γ 灵敏度约 10^{-17} C·cm^2, 时间响应约 33.1 ns.

关键词: 中子探测器, ^{4}He 闪烁体, 裂变碎片, 灵敏度

PACS: 25.85.Ec, 29.30.Hs, 29.40.Mc

1 引 言

中子探测技术是研究材料科学、生命科学以及天体物理等前沿基础学科的重要手段, 对推动物理学科的发展起到了巨大作用. 而测量脉冲辐射场下的中子参数是中子探测的重要内容, 其测量结果对认识和了解脉冲辐射源的行为特征具有十分重要的意义. 这些脉冲辐射场包括脉冲裂变反应堆、加速器中子源等等, 它们具有中子能量范围宽, 脉冲持续时间短, 中子、γ 射线混合严重等特点 [1]. 要较为精确地测量脉冲辐射源的中子参数, 需要探测器具有较高的中子灵敏度、较平坦的能谱响应、较快的时间响应以及较高的 n/γ 分辨能力.

目前, 用于脉冲混合辐射场中子束流的探测器主要有 PIN 中子探测器、有机闪烁中子探测器、气体电离探测器等等, 它们存在中子能谱响应不够理想、n/γ 分辨能力不够高等缺点 [2,3]. 为弥补现有中子探测器的不足, 并研制能更好满足脉冲辐射场要求的探测器, 我们探索了一种基于 ^{4}He 闪烁体的新型裂变中子探测器 [4]. 该探测器采用 $^{235}UO_2$ 作为转换靶,^{4}He 气体作为闪烁体. $^{235}UO_2$ 裂变靶具有很多优点, 例如 ^{235}U 裂变截面随中子能量变化平坦 [5], 裂变碎片的能量较大 [6], 裂变碎片在 ^{4}He 气体的射程短, 便于实现最大能量沉积. 这能保证探测器具有较高的中子灵敏度、较平坦的能谱响应等特点. 而 ^{4}He 气闪烁体也具有光产额与能量沉积成正比 [7−9], 发光效率与带电粒子的类型无关 [7−9], 与 γ 射线的作用截面小 [10] 等特点. 这些特点使 ^{4}He 气闪烁体比固体和液体闪烁体更适合在裂变辐射场中探测裂变碎片等重带电粒子 [10]. 并且 ^{4}He 核的中子散射截面与 ^{235}U 的裂变截面能够互补, 使得探测器对中子的能量响应更加平坦. 本文介绍了依据该原理研制的 ^{4}He 气闪烁裂变中子探测器, 并对探测器的性能进行研究.

2 探测器的原理和结构

^{4}He 气闪烁裂变中子探测器的原理是中子与裂变材料、^{4}He 原子核反应产生的带电粒子进入到气体中并激发气体发光, 然后用光电倍增管接收气体所发的光, 并用电流计或示波器记录光电倍增管的输出信号, 从而实现对中子的测量. 也即入射中子在探测器中产生的信号由两部分组成: 1) 中子入射到裂变靶上与 ^{235}U 发生裂变反应 [11], 裂变产生的碎片进入到气体中并激发气体发光所产生的

† E-mail: zhangxd16899@163.com

© 2012 中国物理学会 Chinese Physical Society

信号; 2) 中子与 ^{4}He 原子核发生弹性散射产生的反冲 ^{4}He 核激发 ^{4}He 气发光所产生的信号. 该探测器的组成主要包括: ^{4}He 气闪烁体、$^{235}UO_2$ 裂变靶、光电倍增管, 其结构如图 1 所示. 在该探测器中, 气体被密封在容器中, 光电倍增管置于容器的侧面, 并在侧面安装石英窗以便于光子能透射出来. 两片裂变靶面对面地平行放置在光电倍增管的两侧, 这样的设计不仅可以提高中子灵敏度, 还可隔绝两片裂变靶之外的 ^{4}He 气发光, 以减少 γ 射线产生的信号, 并提高探测器的 n/γ 分辨本领.

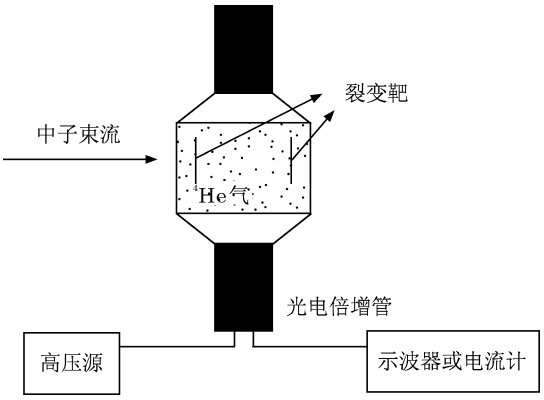

图 1 探测器结构示意图

3 探测器的性能

根据探测器的设计理论, 研制了一套 ^{4}He 气闪烁裂变中子探测器, 其实物照片如图 2 所示 [4]. 在探测器中使用的 ^{4}He 气气压为 1.013×10^5 Pa; 采用了两片厚 1.0 mg/cm^2, 直径为 Φ 4.0 cm 的 $^{235}UO_2$ 裂变靶, 由于裂变碎片在 1.013×10^5 Pa ^{4}He 气中平均射程约为 10.2 cm[4], 为便于裂变碎片在 ^{4}He 气中能量沉积最大, 这两片裂变靶相距约 10.2 cm 放置在光电倍增管两侧. 用光电倍增管 SB9215 探测气体发光并输出信号 (工作电压为 –1100 V), 光电倍增管的光阴极距离靶室中心线约 8 cm.

3.1 中子灵敏度

中子与裂变靶反应产生的裂变碎片进入 ^{4}He 气后会激发 ^{4}He 气发光, 而中子与 ^{4}He 原子核发生弹性散射产生的反冲 ^{4}He 核也会激发 ^{4}He 气发光, 通过光电倍增管收集光子即可得到入射至该探测器的中子强度信号. 那么该探测器的中子灵敏度为

$$S_{\rm n}=\frac{(E_{\rm f}+E_\alpha)\,G}{I_{\rm n}}, \tag{1}$$

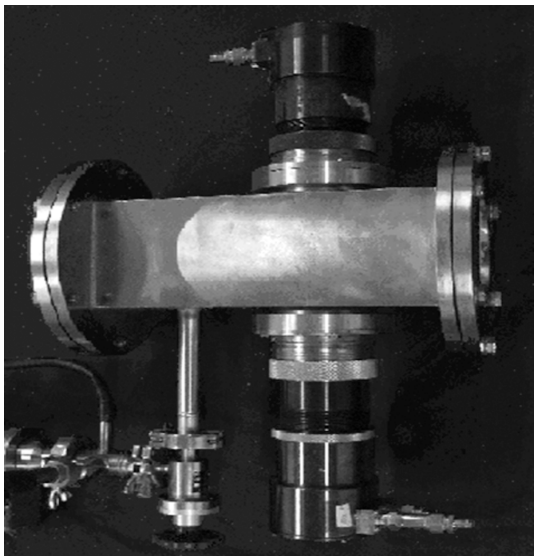

图 2 探测器实物图

式中, $S_{\rm n}$ 为中子灵敏度 (C·cm^2); $E_{\rm f}$ 为中子入射裂变靶产生的碎片在 ^{4}He 气体中的能量沉积 (MeV); E_α 为反冲氦核在 ^{4}He 气体中的能量沉积 (MeV); G 为每沉积单位能量激发气体发光在光电倍增管上产生的电荷量 (C·MeV^{-1}); $I_{\rm n}$ 为入射至裂变靶的中子通量 (cm^{-2}).

采用蒙特卡罗方法编写的程序模拟计算了中子在探测器内的能量沉积 (详细模拟过程参见文献 [4], ^{235}U 中子裂变截面和 ^{4}He 中子弹性散射截面由文献 [12] 查得), 当入射中子通量 $I_{\rm n}=1$ cm^{-2} 时, 可计算得到 0.1—15 MeV 中子在探测器的能量沉积, 计算结果如图 3 所示. 从图 3 中可以看到, 裂变碎片与反冲 ^{4}He 核的能量沉积在不同的中子能区能够互补, 那么将两者的能量沉积相加, 可使得总能量沉积变得更平坦. 由文献 [4] 可知, 当所充 ^{4}He 气为 1.013×10^5 Pa, 光电倍增管工作电压为 –1100 V 时, 在 ^{4}He 中每沉积单位能量所产生的信号为 5.48×10^{-13} C·MeV^{-1}, 那么利用 (1) 式可计算得到该探测器的中子灵敏度, 结果如图 4 所示. 从图 4 可知, 探测器的中子灵敏度约为 10^{-15} C·cm^2 量级, 其对中子能量响应比较平坦. 例如, 当中子能量为 1—15 MeV 时, 探测器的中子灵敏度基本位于 4.5×10^{-15} C·cm^2—5.0×10^{-15} C·cm^2 之间.

探测器的中子灵敏度标定实验是在原子能科学院 K600 高压倍加器上进行的, 利用 D-T 反应获得的稳态中子作为测量中子源, 产生的中子能量约为 14.9 MeV. 整个探测系统放入中子屏蔽体内, 中子束入射到法线方向与其入射方向成 0° 的裂变靶

上. 从实验结果可知, 探测器对 14.9 MeV 中子灵敏度约为 4.60×10^{-15} C·cm^2, 实验相对标准不确定度约为 8.70%[4]. 将该实验值与理论计算值进行比较, 两者相差约 4.8%, 这表明理论计算值与实验值比较一致.

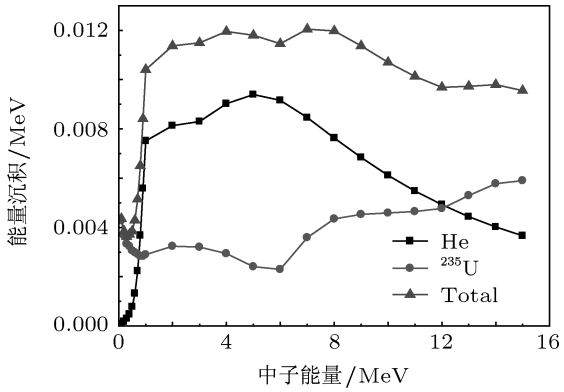

图 3 中子在 ^{4}He 中产生的能量沉积

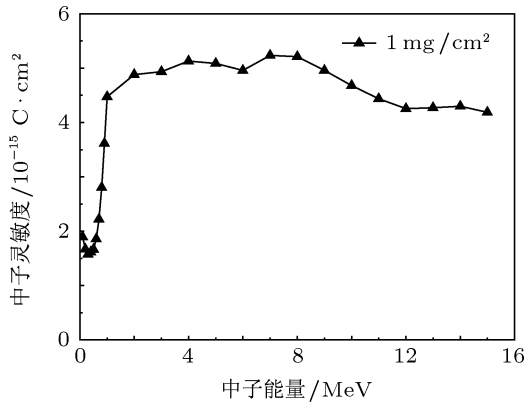

图 4 探测器的中子灵敏度理论计算结果

3.2 γ 灵敏度和 n/γ 分辨

γ 射线与裂变靶及 ^{4}He 气体相互作用产生的次级电子也会使气体激发发光, 从而在探测器中产生信号. 该探测系统的 γ 灵敏度可用下面的公式计算

$$S_\gamma = E_\gamma \cdot G/I_\gamma, \tag{2}$$

式中, E_γ 为 γ 射线在气体中沉积的能量 (MeV); G 为每沉积单位能量激发气体发光在光电倍增管上产生的电荷量 (C·MeV^{-1}); I_γ 为入射至裂变靶的 γ 射线通量 (cm^{-2}). 由文献 [10] 可知, ^{4}He 气发光产额与带电粒子种类无关, 只与粒子能量沉积有关, 因此 (2) 式中的 G 值与 (1) 式中的 G 值是一致的.

当 $I_\gamma = 1$ cm^{-2} 时, 采用 MCNP 程序模拟计算得到 γ 射线在探测器的能量沉积, 计算结果如图 5 所示. 由文献 [4] 可知, 当所充 ^{4}He 气为 1.013×10^5 Pa, 光电倍增管工作电压为 –1100 V 时, 在 ^{4}He 中每沉积单位能量所产生的信号为 5.48×10^{-13} C·MeV^{-1}, 那么利用 (2) 式可计算得到该探测器的 γ 灵敏度, 结果如图 6 所示. 从图中可知, 探测器的 γ 灵敏度约为 10^{-17} C·cm^2, 其中 1.25 MeV γ 灵敏度约为 5.68×10^{-17} C·cm^2.

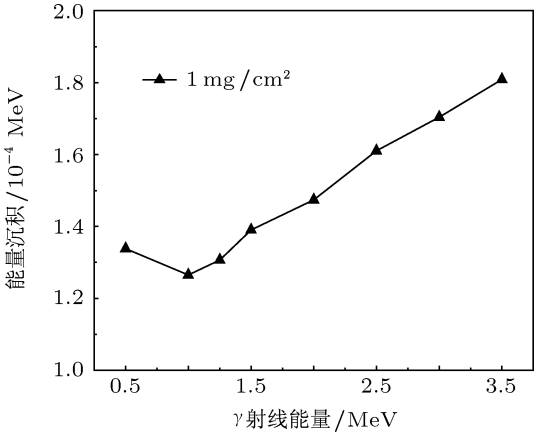

图 5 γ 射线在 ^{4}He 中产生的能量沉积

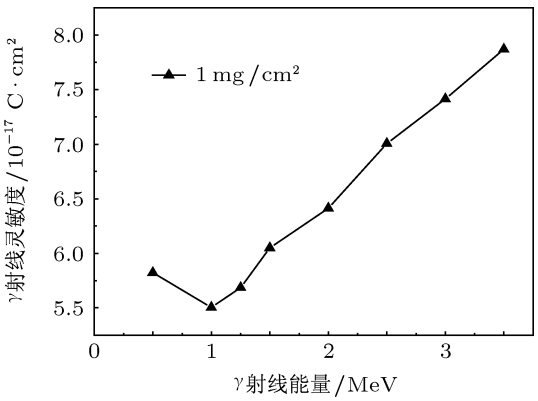

图 6 γ 射线灵敏度理论计算结果

对探测器的 1.25 MeV γ 射线灵敏度实验标定是在西北核技术研究所的 8000 Ci ^{60}Co 源上进行的. 在实验中需对光电倍增管进行良好的屏蔽以减少散射 γ 射线的干扰, 因此在探测器周围垒上足够的铅墙以屏蔽散射的 γ 射线, 实验现场如图 7 所示. 实验结果表明探测器对 1.25 MeV γ 射线的灵敏度约为 5.50×10^{-17} C·cm^2, 实验相对标准不确定度约为 2.86%[4], 理论计算值 5.68×10^{-17} C·cm^2 (见图 6) 与实验值基本吻合.

探测器的 n/γ 分辨是探测器性能的一项重要指标, 它的大小决定了探测器能否在中子、γ 混合

严重的辐射场中测量中子. 将探测器的中子灵敏度与 γ 灵敏度相比即可求得探测器的 n/γ 分辨本领. 通常选择 1.25 MeV γ 灵敏度作为探测器 n/γ 分辨的比较对象. 探测器的 $n/\gamma_{1.25}$ 分辨计算结果如图 8 所示, 从图上可以看到, 探测器的 $n/\gamma_{1.25}$ 分辨都在 25 倍以上, 其中 1—15 MeV 中子的 $n/\gamma_{1.25}$ 都在 70 倍以上. 从实验结果可知, 探测器的 14.9 MeV 中子灵敏度比 1.25 MeV γ 射线灵敏度高 80 多倍, 这表明探测器具有很好的 $n/\gamma_{1.25}$ 分辨能力.

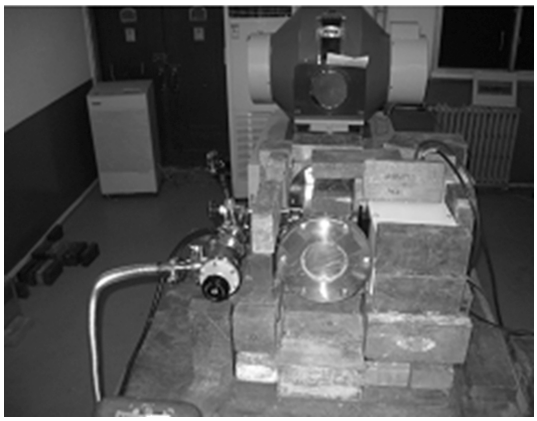

图 7 γ 灵敏度实验现场图

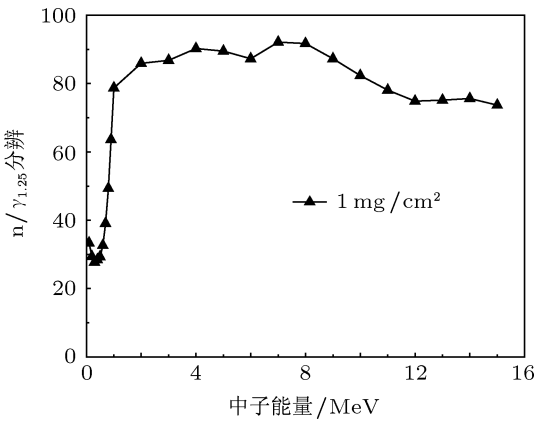

图 8 探测器的 $n/\gamma_{1.25}$ 分辨

3.3 时间响应

探测器的时间响应实验是在 DPF 装置 14 MeV 脉冲中子发生器上进行的, 实验现场如图 9 所示. 该装置利用等离子聚焦使氘氚核发生聚变反应产生 14 MeV 脉冲中子, 其脉冲宽度约为 10 ns[13]. 该探测器测得的 DPF 脉冲中子波形如图 10 所示 (已归一化), 从图上可知波形上升时间约 21.6 ns, 半高宽约为 34.5 ns. 将所测波形时间半高宽与 DPF 脉冲宽度反卷积可得探测器的时间响应约 33.1 ns.

经分析可知, 裂变碎片在 ^{4}He 气中的飞行时间对探测器的时间响应影响最大. 如果减少两片裂变靶之间的放置距离, 那么裂变碎片在 ^{4}He 气中的飞行时间会缩短, 探测器的时间响应也会降低 [4].

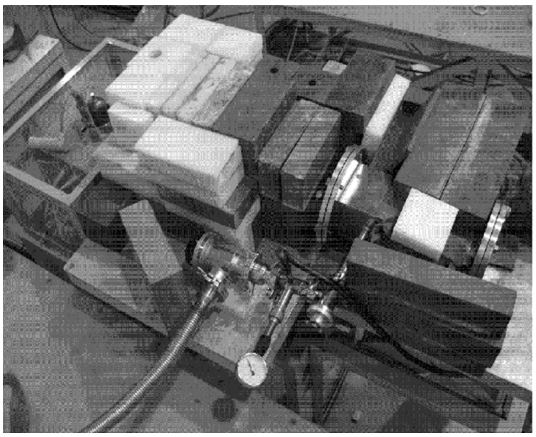

图 9 DPF 实验现场图

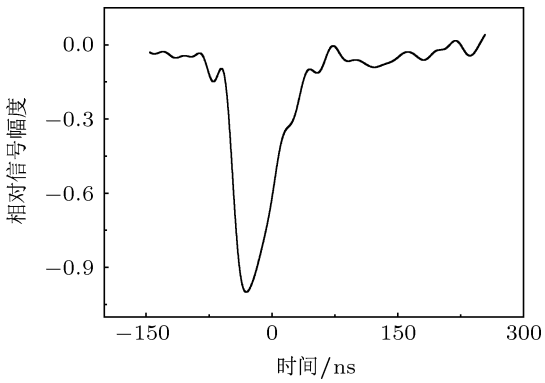

图 10 探测器对 DPF 的时间响应波形

4 结 论

本文提出一种新的中子探测器, 通过研究中子与 ^{4}He 气、裂变材料的作用特点, 设计并研制了基于 ^{4}He 气闪烁体的裂变中子探测器. 理论研究结果表明探测器的中子灵敏度约 10^{-15} C·cm^2, γ 灵敏度约 10^{-17} C·cm^2, n/γ 分辨约几十倍. 实验结果表明探测器的 14.9 MeV 中子灵敏度为 4.60×10^{-15} C·cm^2, 1.25 MeV γ 射线灵敏度为 5.50×10^{-17}, 时间响应约 33.1 ns. 理论计算值与实验值比较一致. 这表明探测器的原理设计是可行的, 探测器能结合 ^{4}He 气闪烁体和裂变材料的优点, 具有能量响应平坦、n/γ 分辨本领高等优点, 可应用于中子、γ 混合辐射场的中子测量, 将为脉冲裂变辐射场的中子测量提供一种新的选择.

[1] Ouyang X P 2002 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Fudan University) (in Chinese) [欧阳晓平 2002 博士学位论文 (上海: 复旦大学)]

[2] Yang H Q, Zhu X B, Peng T P, Tang Z Y, Yang G Z, Li L B, Song X C, Hu M C 2004 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **28** 744 (in Chinese) [杨洪琼, 朱学彬, 彭太平, 唐正元, 杨高照, 李林波, 宋献才, 胡孟春 2004 高能物理与核物理 **28** 744]

[3] Yang H Q, Peng T P, Yang J L, Tang Z Y, Yang G Z, Li L B, Hu M C, Wang Z T, Zhang J H, Li Z B, Wang L Z 2004 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **24** 640 (in Chinese) [杨洪琼, 彭太平, 杨建伦, 唐正元, 杨高照, 李林波, 胡孟春, 王振通, 张建华, 李忠宝, 王立宗 2004 核电子学与探测技术 **24** 640]

[4] Zhang X D 2010 *M. S. Dissertation* (Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology) (in Chinese) [张小东 2010 硕士学位论文 (西安: 西北核技术研究所)]

[5] Ouyang X P, Li Z F, Wang Q S, Huo Y K, Ma Y L, Zhang Q M, Zhang G G, Jin Y R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4643 (in Chinese) [欧阳晓平, 李真富, 王群书, 霍裕昆, 马彦良, 张前美, 张国光, 金玉仁 2005 物理学报 **54** 4643]

[6] Simmons J E, Henkel R L 1960 *Phys. Rev.* **120** 198

[7] Tornow W 1976 *Nucl. Instr. Meth.* **133** 435

[8] Mutterer M 1977 *Nucl. Instr. Meth.* **144** 159

[9] Elena A, Aleksey E, Bolotnikov 2006 *Noble Gas Detector* (Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA) p5

[10] Glennf K 1999 *Radiation Detection and Measurement* (New York: John Wiley & Sons, Inc) p246

[11] Lu X T 1999 *Nuclear Physics* (Beijing: Atomic Energy Press) p312 (in Chinese) [卢希庭 1999 原子核物理 (北京: 原子能出版社) 第 312 页]

[12] Tian D F, Sun W L 2006 *Excitation Functions in Neutron-induced Reactions* (Beijing: National Defence Industry Press) (in Chinese) [田东风, 孙伟力 2006 中子核反应激发函数 (北京: 国防工业出版社)]

[13] Zhang J F, Chen L, Li H Y, Xia L B, Zhang X D, Zhang X P, Liu L Y, Liu J L 2010 *Nuclear Techniques* **33** 749 (in Chinese) [张建福, 陈亮, 李宏云, 夏良斌, 张小东, 张显鹏, 刘林月, 刘金良 2010 核技术 **33** 749]

A fission neutron detector based on helium scintillator

Zhang Xiao-Dong† Qiu Meng-Tong Zhang Jian-Fu Ouyang Xiao-Ping
Zhang Xian-Peng Chen Liang

(*Radiation Detection Research Center of Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024*, China*)

(Received 9 April 2012; revised manuscript received 2 July 2012)

Abstract

A new neutron detector is designed. Two $^{235}UO_2$ target foils are used as radiators, and the ^{4}He gas is used as scintillator in the detector. The detector combines the features of ^{235}U and ^{4}He fully, so it has some excellent performances, such as flat energy response to neutrons, better n/γ discrimination, etc. It can be used well to detect neutrons in a pulsed mixture radiation field. In this paper, the principle and structure of the detector are introduced. The energy depositions of different energies of neutrons and γ-rays in ^{4}He gas are calculated. The neutron sensitivity, γ ray sensitivity, n/γ discrimination, and time response of the detector are investigated theoretically and experimentally. The neutron sensitivity is about 10^{-15} C·cm^2, γ ray sensitivity is about 10^{-17} C·cm^2, and time response is about 33.1 ns.

Keywords: neutron detector, ^{4}He scintillator, fission fragments, sensitivity

PACS: 25.85.Ec, 29.30.Hs, 29.40.Mc

† E-mail: zhangxd16899@163.com