

利用 Si-PIN 探测器测量 DPF 装置中子产额

张国光¹⁾ 欧阳晓平 张建福 李北京 宋纪文 张前美

(西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 介绍了 Si-PIN 中子探测器的结构和测量原理,分析了探测器对 14MeV 中子的灵敏度. 利用该探测器测量了等离子焦点装置的 D-T 脉冲中子产额,实验结果与 SDIN500 探测器测量结果在 5% 不确定度范围内一致.

关键词 Si-PIN 探测器 等离子焦点 中子产额 中子灵敏度

1 引言

对于等离子体焦点(DPF, Dense Plasma Focus)的研究约开始于 20 世纪 40 年代中期. 为了得到高中子产额,许多研究工作者开展了等离子体运动规律及中子发射机制方面的研究. 1990 前后,由于在 Tokamak 装置上的热核聚变研究有了突破性的进展,达到了非常接近热核聚变的劳逊条件,因而,用 DPF 装置进行核聚变的研究工作相对逐渐减小,而将等离子焦点的研究工作转移到用它来产生脉冲 X 射线和中子等方面的研究方向上来. 在国内,清华大学和西北核技术研究所共同研制的 DPF-200 主要用来产生脉冲 X 射线^[1],清华大学研制的 Mather 型结构 DPF40 等离子焦点装置在实验室中可以产生脉宽 40—60ns、平均产额 5.5×10^8 n/shot 的 D-D 中子^[2],中国工程物理研究院也有类似的 DPF 装置.

对于等离子焦点装置的脉冲中子产额的测量方法很多,较常见的有银活化方法、塑料闪烁体法等. 我们设计了利用硅半导体探测器(Si-PIN)配合聚乙烯靶组成的中子探测器,通过加铅和防电磁干扰等措施,有效的排除了伴随 X 射线的干扰,能准确测量等离子焦点装置的中子产额.

2 探测原理

2.1 Si-PIN 中子探测器结构

14MeV 中子与聚乙烯靶发生 $n + p \rightarrow p' + n'$ 散射,质子在后面的硅片上产生能量沉积;同时,14MeV 中子也与探测器灵敏层中的硅核发生 $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$, $^{28}\text{Si}(n, \alpha)^{25}\text{Mg}$ 反应或通过弹性碰撞引起反冲核在灵敏层的电离,从而在硅片中沉积能量. 因此,探测器输出信号包括反冲质子信号和中子直照信号. 通过探测器的输出电流波形,可以测量入射到探测器上的中子强度,然后推算到装置的脉冲中子产额.

典型的 DPF 装置发射脉冲时间谱如图 1 所示. 图 1 中前面峰为 X 射线,后面峰代表中子,该波形是由“ST-401 闪烁晶体 + 光电倍增管”组成的探测器(简称为 ST-PMT 系统)测到. 设计的硅半导体中子探测器选用直径 $\Phi 60$ 、厚 $265\mu\text{m}$ 的大面积 Si-PIN 探测器为探测元件,入射面贴上聚乙烯薄膜($(\text{CH}_2)_n$)组成反冲质子法脉冲中子探测器^[3,4],聚乙烯靶面密度为 $27.5\text{mg}/\text{cm}^2$,反向偏压 300V. 为了消除 X 射线对测量结果的影响,前面和周围用 5mm 厚的 Pb 进行屏蔽,并包裹 4 层铜网进行电磁屏蔽. Si-PIN 探测器的结构示意图见图 2 所示.

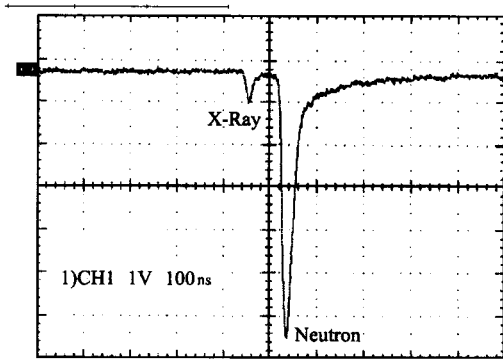


图 1 D-T 脉冲输出波形

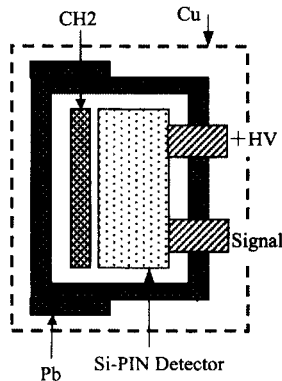


图 2 Si-PIN 中子探测器结构示意图

2.2 14MeV 中子灵敏度

在探测系统中,需要解决的是 Si-PIN 探测器的灵敏度(S_n)问题,它包括直照灵敏度(S_{nr})、反冲质子法中子灵敏度(S_{np})。灵敏度(S_n)可以表示为

$$S_n = S_{np} + S_{nr}, \quad (1)$$

利用 MCNP-4B^[5] 程序可以计算中子在硅片中的沉积能量,然后可以计算探测器的直照灵敏度 S_{nr} 。具有某一能量的中子在硅片中的平均能量沉积可以表示为下式:

$$\Delta E = E - \sum_i p_i(E) [\bar{E}_{out_i}(E) - Q_i + \bar{E}_{\gamma_i}(E)]. \quad (2)$$

式中 E 为入射中子能量, $p_i(E)$ 为第 i 种反应的几率, E_{out_i} 为第 i 种反应出射中子能量, Q_i 为第 i 种反应的反应能, \bar{E}_{γ_i} 为第 i 种反应次级伽玛的平均能量。由能量沉积,采用下式计算探测器直照灵敏度:

$$S_{nr} = \frac{\Delta E \times 10^6 \times e}{E_{ep}} \times S_0, \quad (3)$$

其中 ΔE 为计算的能量沉积 (MeV); E_{ep} 为 3.62eV; e

为电子电荷, $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, S_0 为探测器有效面积。经过计算,该探测器对 14MeV 中子的直照灵敏度为 $4.02 \times 10^{-15} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ 。

利用分层分块方法^[6] 计算反冲质子法中子灵敏度 S_{np} 。为了保证计算精度,在计算反冲质子在靶和探测器内能量损失时,要将靶和探测器进行分层,以各种物质能使相应能量的反冲质子损失能量 δE (一般取 0.2MeV) 为一层来计算,同时每一层厚度要足够薄;在涉及几何条件及其他与几何条件有关参数时,将探测器和靶平面分块计算,分块要足够小,使得几何条件计算准确。利用分层分块方法计算得到对于 14MeV 中子的 S_{np} 为 $4.84 \times 10^{-15} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$, 计算方法误差小于 6.4%。

这样, Si-PIN 探测器的灵敏度 S_n 为 $8.86 \times 10^{-15} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$, 考虑到 5mm 铅外套对 14MeV 的衰减因子为 0.886, 最终探测器的灵敏度为 $7.85 \times 10^{-15} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ 。DPF 脉冲中子产额 Y_n (单位: n/shot) 可以定义为

$$Y_n = \frac{S}{R_0 \cdot S_n} \cdot 4\pi r^2 = S \cdot 8E16, \quad (4)$$

其中 r 为中子探测器到 DPF 装置焦点的距离; R_0 为示波器输入阻抗, 一般取 50Ω ; S 为示波器测量的波形积分面积 (单位: $\text{V} \cdot \text{s}$)。

3 测量结果

图 3 为利用 Si-PIN 中子探测器测到的某一炮脉冲中子波形, 采用宽频数字示波器记录。从图中可以看出, 伴随的 X 射线峰位没有出现, 由于铜网的包裹使得电磁干扰大为降低, 波形较为光滑。经过实验测量, 得到了 SDIN-500 中子探测器 (DPF 装置配套设备) 和 Si-PIN 两种探测器对 D-T 脉冲中子产额的测量数据。结果见表 1 所示, 可以看出两者结果在误差 $\pm 5\%$ 范围内相符。

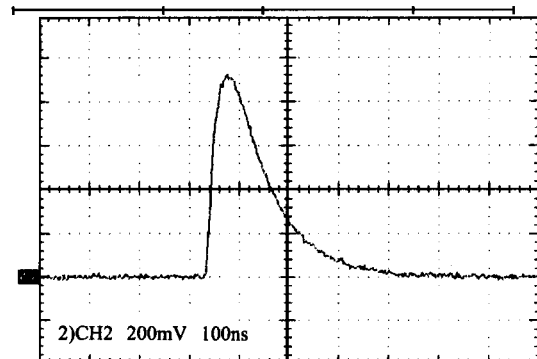


图 3 Si-PIN 中子探测器典型输出波形

表 1 两种测量系统测量脉冲中子产额的实验结果

编号	脉冲中子产额 ($\times 10^{10}$ n/shot)		$K = \frac{n_{\text{PIN}}}{n_{\text{SDIN}}}$
	测量值 (SDIN-500)	测量值 (Si-PIN)	
054	1.49	1.56	1.05
042	1.04	1.08	1.04
055	0.79	0.77	1.04
045	0.84	0.86	1.02
053	0.91	0.88	0.97

4 结论

利用大面积硅 PIN 探测器可以较为方便地测量 DPF 装置的脉冲中子产额, 探测器性能稳定, 测量数据准确可靠, 处理结果快捷方便. 该探测器的成功应用为以后类似的研究提供了很好的实验方法, 也可以为 ICF 中子产额分析研究提供参考.

参考文献 (References)

- HAN Min, LUO Chen-Mu et al. High Power Laser and Particle Beams, 1995, 8:461—465 (in Chinese)
(韩旻, 罗承沐等. 强激光与粒子束, 1995, 8:461—465)
- LU Ming-Fang, HAN Min et al. Journal of Tsinghua University (Sci&Tech), 1996, 36(5):36—41 (in Chinese)
(吕铭方, 韩旻等. 清华大学学报 (自然科学版), 1996, 36(5): 36—41)
- OUYANG Xiao-Ping, LI Zhen-Fu, ZHANG Guo-Guang et al. Acta Physica Sinica, 2002, 51(7):1502—1505 (in Chinese)
(欧阳晓平, 李真富, 张国光等. 物理学报, 2002, 51(7):1502—1505)
- ZHANG Guo-Guang. Scientific & Technical Report of Northwest Institute of Nuclear Technology, 1999, E1701 (in Chinese)
(张国光. 西北核技术研究所科技报告. 1999, E1701)
- Briesmeister J F MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. 1997, LA-12625-M
- HUANG Bao et al. Experiment and Research, 1982, 3:280—294 (in Chinese)
(黄豹等. 试验与研究, 1982, 3:280—294)

A Si-PIN Detector Used for DPF Neutron Yield Measurement

ZHANG Guo-Guang¹⁾ OUYANG Xiao-Ping ZHANG Jian-Fu LI Bei-Jing
SONG Ji-Wen ZHANG Qian-Mei

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract In this paper, the structure and performance of the Si-PIN detector system are introduced. The neutron sensitivity of the proton recoil Si-PIN detector to 14 MeV neutron is analyzed. Meanwhile, the direct irradiation sensitivity is simulated by MCNP-4B program. Using the Si-PIN detector, the pulsed neutron yield from DPF device has been measured. The results are in accordance with the SDIN500 detector within 5% uncertainty.

Key words Si-PIN detector, dense plasma focus, neutron yield, neutron sensitivity