

# 组合式 Si-PIN 14 MeV 中子探测器

张显鹏<sup>1)</sup> 欧阳晓平<sup>1,2)</sup> 张忠兵<sup>1)</sup> 田 耕<sup>1)</sup> 陈彦丽<sup>1)</sup> 李大海<sup>1)</sup> 张小东<sup>1)</sup>

1) 西北核技术研究所, 西安 710024)

2) 西安交通大学核科学与技术学院, 西安 710049)

(2007 年 3 月 24 日收到, 2007 年 4 月 26 日收到修改稿)

提出了一种在薄片 Si-PIN 探测器中间用 2 mm 厚的聚乙烯作为灵敏度增强介质, 采用加法电路模式进行信号输出的组合式新型 DT 聚变中子(14 MeV)探测技术原理. 这种组合的主要特点有: 1) 大幅度提高了 Si-PIN 探测器的中子灵敏度和测量统计性; 2) 提高了探测器的 n/γ 分辨本领; 3) 在实现多个探测器信号相加的同时, 组合探测器相对于单片探测器时间响应没有明显改变. 从实验及理论上对组合探测器的 14 MeV 中子及 1.25 MeV γ 灵敏度、n/γ 分辨、时间特性和测量统计性进行了研究.

关键词: Si-PIN 半导体探测器, 灵敏度, n/γ 分辨, 时间响应

PACC: 2940P, 2970J

## 1. 引 言

电流型 Si-PIN 半导体探测器主要用于带电粒子(电子、质子、α 粒子、裂变碎片)的探测, 也可通过射线与探测器灵敏介质或者辐射转换靶的相互作用产生次级带电粒子而实现对脉冲中子、γ 射线以及 X 射线的探测. 它具有结构简单、灵敏度高、时间响应快、动态范围大等优点, 已广泛用于脉冲辐射探测<sup>[1-3]</sup>.

Si-PIN 探测器对中子、γ 射线的直照灵敏度与入射粒子能量密切相关, 因此, 以它为探测器件构成的探测器的本征 n/γ 分辨能力随辐射场粒子能量的不同而变化. 中子与 Si 相互作用, 可产生(n, α)或者(n, p)反应, 两反应的阈能分别为 2.66 MeV 和 3.86 MeV. 因此, 在阈能以下, 中子与 Si 作用主要是弹性散射, 其对中子的直照灵敏度为 γ 射线的直照灵敏度的几分之一到十分之一; 而在阈能以上, Si-PIN 的中子直照灵敏度随粒子能量迅速升高, 当中子能量为 14 MeV 时, 其直照灵敏度比 1.25 MeV γ 射线的直照灵敏度要高出近一倍<sup>[1]</sup>. 利用这一特性, 文献[4, 5]以聚四氟乙烯作为探测效率和测量统计的增强介质, 研制了用于裂变 n, γ 混合场中脉冲 γ 射线探测的 Si-PIN 探测阵列. 该阵列的 γ 探测灵敏度远高于单片 Si-PIN 探测器, 但其信号输出均采用直接并联的方式, 使得其时间响应比单片探测器

要慢得多<sup>[4-6]</sup>. 虽然不影响波形面积或粒子数目的测量, 但不能用于快信号时间参数的探测, 成为阵列探测的一种不足. 探寻在低强度脉冲中子、γ 混合场测量中, 既能实现信号相加, 又不改变时间特性的探测器组合模式, 具有十分重要的意义. 此外, 对于裂变 γ 背景下低强度 14 MeV 中子的探测, 需要研制具有高灵敏度和测量统计性、一定 n/γ 分辨能力和较好时间特性的新型阵列 DT 聚变中子探测器. 本文工作探索满足这些特定性能要求的新探测技术原理.

## 2. 探测器的结构与原理

组合式 Si-PIN 中子探测器的基本结构如图 1 所示, 探测器由多个基本探测单元组成. 每个基本探测单元由单片 Si-PIN 探测器前加聚乙烯片构成, 各个探测单元产生的信号经加法电路合成后形成最终的输出信号. 入射中子在基本探测单元中产生的信号由两部分构成: 1) 硅对中子的直照响应信号; 2) 中子在聚乙烯中发生(n, p)反应产生的质子进入 Si-PIN 探测器产生的信号. 聚乙烯厚度需要根据探测器的中子灵敏度以及 n/γ 分辨的要求来确定, 基本探测单元的数目、每片 Si-PIN 的面积及厚度需要依据灵敏度以及统计性获得. 本文中, 单片 Si-PIN 的尺寸为 φ60 mm × 1 mm, 对 5 层结构的一个组合进行了实验研究, 探测器实物照片见图 2.

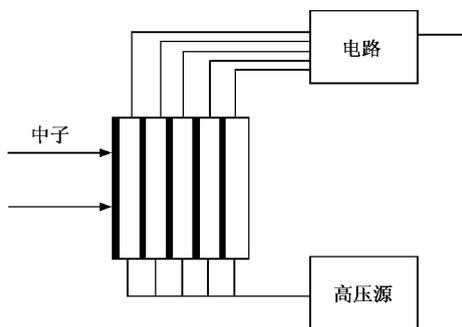


图 1 探测器基本结构示意图



图 2 组合式探测器实物照片

### 2.1. 聚乙烯最佳厚度的选取

以直径为  $\phi 60$  mm 的 Si-PIN 为例,对于 14 MeV 中子和 1.25 MeV 的  $\gamma$  射线,通过计算几种不同厚度的单片聚乙烯加 Si-PIN 的中子灵敏度、 $\gamma$  灵敏度(相对值)以及  $n/\gamma$  分辨,综合考虑选择聚乙烯的最佳厚度。计算结果见图 3、图 4、图 5。

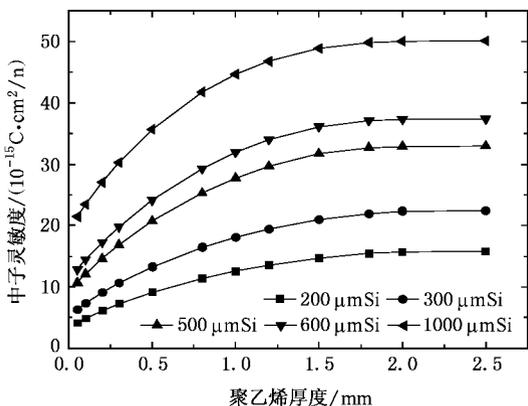


图 3 14 MeV 中子灵敏度随聚乙烯厚度的变化

由图 3 可以看出, Si-PIN 探测器对 14 MeV 中子灵敏度随聚乙烯的厚度增加而增大,当聚乙烯厚度

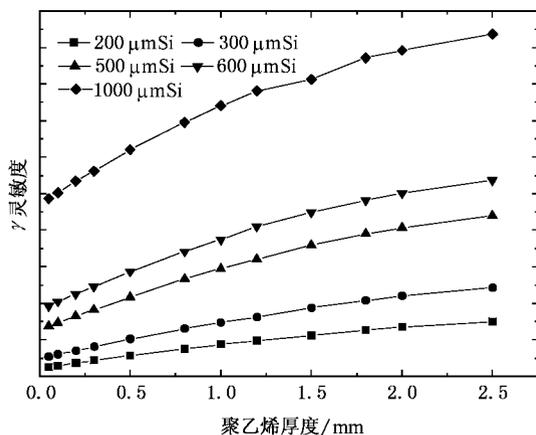


图 4 1.25 MeV  $\gamma$  灵敏度随聚乙烯厚度的变化(相对值)

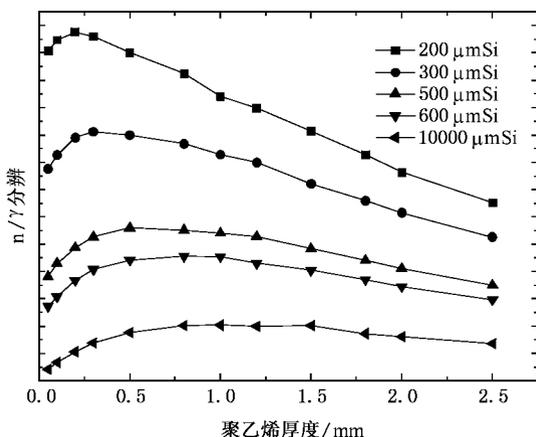


图 5  $n/\gamma$  分辨随聚乙烯厚度的变化(相对值)

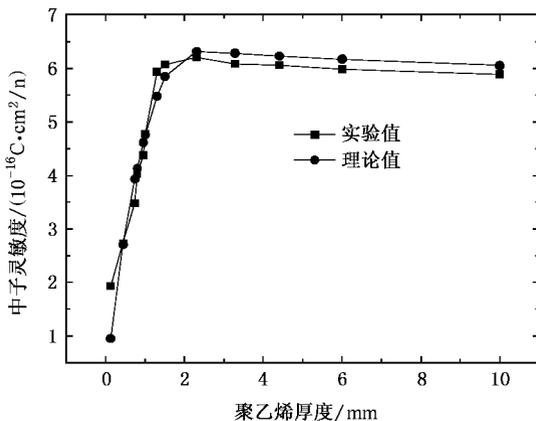


图 6 14 MeV 中子灵敏度随聚乙烯厚度的变化实验理论对比

小于 1 mm 时,中子灵敏度随厚度的变化而增加较快,当聚乙烯厚度继续增大时,灵敏度随厚度变化的增加变慢,到聚乙烯厚度为 2.0 mm 时达到饱和值。图 4 说明,当聚乙烯厚度变化时, $\gamma$  灵敏度随聚乙烯

厚度不断增加. 图 5 说明, 探测器的  $n/\gamma$  分辨在聚乙烯的厚度为 0.5 mm 左右时达到最大值, 稍后随聚乙烯厚度的增加缓慢下降. 但总体来说, 聚乙烯厚度的变化对探测器的  $n/\gamma$  分辨影响不超过 2 倍. 因此, 选择聚乙烯和 Si-PIN 探测器的厚度时应该从灵敏度及  $n/\gamma$  分辨综合考虑. 从中子灵敏度较高这个条件考虑, 聚乙烯选 1.8—2.0 mm 左右为宜(3.1 节将说明对于组合式探测器, 这样的选择也可使  $n/\gamma$  较大). 实际应用时, 我们选聚乙烯厚度为 2 mm.

图 6 是用厚度在 0.065—10.0 mm 范围内的若干聚乙烯片 + 10 mm × 10 mm 的矩形 Si-PIN 探测器, 在 DPF 中子源上进行的测量结果(测量方法见 3.1). 图中理论和实验符合得较好.

## 2.2. 求和电路实现信号相加

将每片 Si-PIN 的信号直接并联后, 探测器的输出虽然可以实现电流相加. 但由于并联后整个阵列的电容增加, 它的时间响应会变慢. 求和电路利用虚短和虚断的概念实现了各个输入端基本不相互影响地相加<sup>[7]</sup>. 图 7 以一个三输入端反相求和电路说明求和电路的原理. 所用的求和电路实物照片见图 8, 这里采用的是多端输入的反相求和电路, 将电路装在一个铜盒内以减少实验时的电磁干扰(实验时要根据情况对铜盒包铜网进一步减小电磁干扰).

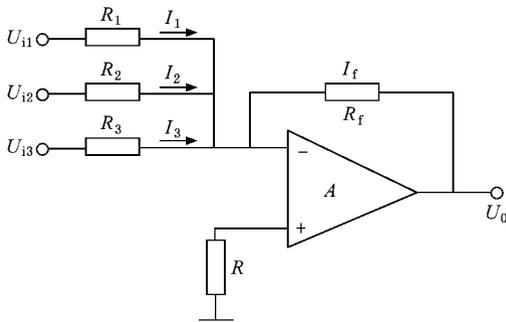


图 7 反相求和电路原理图

## 3. 组合探测器的特性

### 3.1. 组合探测器的灵敏度、 $n/\gamma$ 分辨

探测器的灵敏度理论值通过 MC 程序计算探测器中的能量沉积获得(中子灵敏度用 GEANT4<sup>[8,9]</sup> 计算,  $\gamma$  灵敏度用 MCNP4B<sup>[10]</sup> 程序计算). 如果每个具有能量  $E$  的源粒子最终在探测器中的电荷能量沉

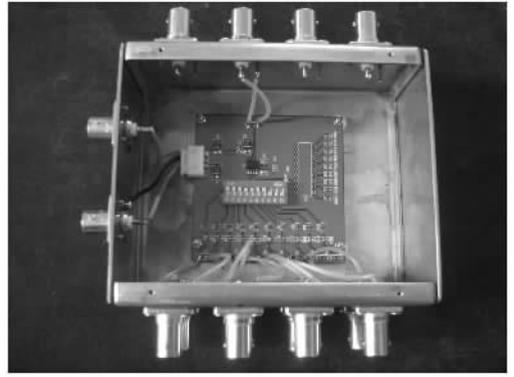


图 8 加法电路及铜盒

积为  $\Delta E$  (MeV),  $\omega$  为硅的电离能 (3.62 eV),  $S$  为探测器有效面积,  $e$  为电子电荷 ( $1.6 \times 10^{-19}$  C), 得到该粒子对硅探测器的灵敏度为

$$S(E) = \frac{\Delta E \cdot e \cdot 10^6 \cdot S}{\omega} \quad (1)$$

探测器对 1.25 MeV  $\gamma$  射线的灵敏度是在 2800Ci ( $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}$  Bq) 的钴源上测得. 用小电流测量仪测得探测器的信号电流为  $I$  (A), 通过 UNIDOS 剂量仪测得测点剂量, 然后换算为注量率  $\phi$  ( $1/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ), 则探测器的灵敏度为

$$S(E) = \frac{I}{\phi} \quad (2)$$

探测器对 14 MeV 中子的灵敏度在 ING-103 DPF 脉冲中子发生器上测得. DPF 脉冲中子发生器以单次脉冲方式工作, 脉冲宽度 15 ns 左右, 平均产额约  $10^8$ — $10^9$  n/pulse, 中子能量 14 MeV. 实验时, 将整个探测器装在一个铁盒内并用铜网包裹, 以减少电磁屏蔽. 在探测器前挡 2 cm 厚的铅块对源头的伴随 X 射线进行衰减. 实验装置见图 9.



图 9 DPF 实验装置图

此时探测器的灵敏度可记为

$$S(E) = \frac{Q(E)}{\Phi(E)} \cdot \frac{(1-a)}{\eta} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt}{Z \cdot \Phi(E)} \cdot \frac{(1-a)}{\eta}, \quad (3)$$

式中,  $Q(E)$  为示波器输出波形的积分电荷 (C);  $\Phi(E)$  为测点的中子注量 ( $1/\text{cm}^2$ );  $Z$  为示波器的输入阻抗 ( $50 \Omega$ );  $V(t)$  为探测器输出电压波形幅度;  $t_1, t_2$  为探测器输出波形的积分长度;  $\eta$  为 2 cm 铅对

14 MeV 中子的衰减系数 (0.9);  $a$  为周围散射对探测器信号的贡献 (0.07)。

表 1 给出了实验得出的 5 层组合探测器的中子、 $\gamma$  灵敏度及  $n/\gamma$  分辨的计算值及理论值。可以看出, 对于直照灵敏度或者单片 Si-PIN 与聚乙烯的组合, 实验值与理论值有一定偏差, 而对于组合式探测器, 计算结果较接近实验值。组合探测器的灵敏度得到了基本成探测器倍数的增加,  $n/\gamma$  分辨比其本征值提高了 1 倍多。

表 1 5 层组合探测器灵敏度及  $n/\gamma$  分辨 (14 MeV 中子, 1.25 MeV  $\gamma$ )

灵敏度 $/10^{-15} \text{C} \cdot \text{cm}^2$							$n/\gamma$ 分辨			
	$S_{1n}$	$S_{1\gamma}$	$S_{2n}$	$S_{2\gamma}$	$S_n$	$S_\gamma$		理论值	$S_{2n}/S_{2\gamma}$	$S_n/S_\gamma$
理论值	19.3	4.66	50.0	8.92	254	471	理论值	4.14	5.6	5.4
实验值	26	10.0	55	11.0	297	472	实验值	2.6	5.0	6.3

注: 表中  $S_1$  为单片 Si-PIN 的直照灵敏度,  $S_2$  表示 2 mm 聚乙烯 + Si-PIN 的灵敏度,  $S$  表示组合探测器的灵敏度。

实际使用时, 要求探测器具有更高的灵敏度和较好的统计性, 则可采用更多层数的结构来实现。以 10 层结构为例, 计算了不同厚度 Si-PIN 探测器与 2 mm 聚乙烯组合的上述参数, 结果见表 2。可以看

出 Si-PIN 探测器较薄时, 组合探测器的灵敏度较低, 但  $n/\gamma$  分辨较高。而 Si-PIN 探测器厚度增加时, 中子灵敏度的增大比  $\gamma$  灵敏度的增加速度慢, 因此, 组合探测器的  $n/\gamma$  分辨降低。

表 2 10 层组合探测器的灵敏度、 $n/\gamma$  分辨及可测量下限的计算值 (14 MeV 中子, 1.25 MeV  $\gamma$ )

Si 厚度/ $\mu\text{m}$	200	250	300	500	800	1000
$S_n/10^{-13} \text{C} \cdot \text{cm}^2$	1.56	1.89	2.19	3.26	4.42	5.07
$S_\gamma/10^{-14} \text{C} \cdot \text{cm}^2$	1.74	2.21	2.67	4.59	7.38	9.2
$n/\gamma$ 分辨	9.0	8.6	8.2	7.1	6.0	5.5
可测量下限/ $\text{cm}^{-2}$	64	59	55	43	32	28

当聚乙烯厚度变化时, 10 层 Si-PIN 探测器组合结构的灵敏度及  $n/\gamma$  分辨随聚乙烯厚度的变化如图 10 所示。 $n/\gamma$  分辨在聚乙烯厚度为 1.5 mm 左右时达到最大值, 而单层聚乙烯与 Si-PIN 的组合当聚乙烯的厚度小于 1 mm 时  $n/\gamma$  分辨就达到了最大值 (见图 5)。这主要是因为中子在前层硅中因 ( $n, p$ ) 反应而产生的质子穿过聚乙烯并将能量沉积在后层硅中, 造成了中子灵敏度的进一步增强, 从而提高了  $n/\gamma$  分辨。但随着聚乙烯厚度的增加, 前层硅中产生的质子被阻止在聚乙烯中, 这个灵敏度的增强效应越来越小, 直到  $n/\gamma$  分辨开始变小。

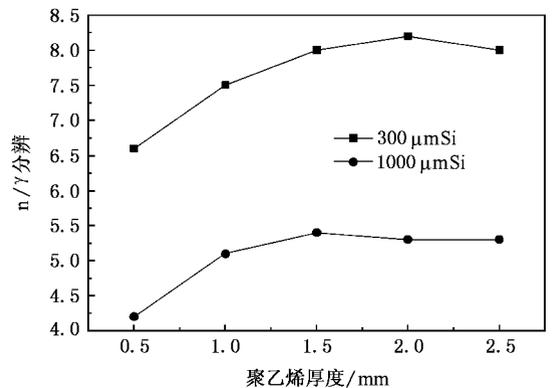


图 10 10 层组合探测器的  $n/\gamma$  分辨随聚乙烯厚度的变化

### 3.2. 探测器的统计特性

探测器的相对标准偏差表示为

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{\eta N}}, \quad (4)$$

其中,  $N$  为探测器入射面处的粒子数,  $\eta$  为射线与探

测器作用的概率。对于组合式探测器, 它表示为

$$\eta \approx n(\eta_{\text{CH}_2} + \eta_{\text{Si}}), \quad (5)$$

式中,  $n$  为探测器的层数 (聚乙烯片或者 Si-PIN 的个数);  $\eta_{\text{CH}_2}$  为中子在单片聚乙烯中打出质子并进入

Si-PIN 的概率,  $\eta_{\text{Si}}$  为中子与单片 Si-PIN 直接作用的概率. 如果以相对标准偏差为 10% 为探测器的统计下限, 10 层结构的探测器可测得的 14 MeV 的中子注量下限见表 2.

### 3.3. 组合探测器的时间特性

分别测量了单个探测器的波形以及 5 个探测器直接相联和通过求和电路相联后的输出波形, 见图 11. 表 3 为相应的上升时间及半高宽. 可以看出, 直

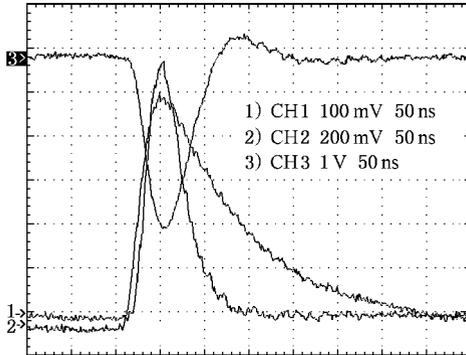


图 11 DPF 实验波形 1) 单个探测器; 2) 5 个探测器直接连接; 3) 5 个探测器经加法电路

接将探测器信号相连接后的波形上升时间基本不变, 而半高宽明显变宽了. 经过加法电路合成后的信号宽度在实验误差范围内没有明显变宽.

表 3 DPF 实验波形时间特性

	上升时间 /ns	半高宽 /ns
单个 Si-PIN	24	56
5 个 Si-PIN 直接连接	27	107
5 个 Si-PIN 电路连接	24	57

## 4. 结 论

理论和实验研究表明, 研制的组合式 Si-PIN DT 聚变中子探测器, 采用 2 mm 厚的聚乙烯作为灵敏度和统计增强介质, 采用加法电路作为信号输出模式. 在获得灵敏度与统计性、 $n/\gamma$  分辨能力大幅度提高的同时, 保持了单片 Si-PIN 探测器的快时间响应性能, 与单片 Si-PIN 探测器的相当, 获得了所期待的性能指标. 这种探测器为  $n, \gamma$  混合场低强度脉冲 DT 聚变中子探测提供了新的选择.

- [ 1 ] Kuckuck R W 1971 *Semiconductor Detectors for Use in the Current Mode* UCRL-51011
- [ 2 ] Liu Z Q 1994 *Diagnostic Technologies in Pulsed Radiation Fields* ( Beijing : Science Press )( in Chinese )[ 刘庆兆 1994 脉冲辐射场诊断技术 ( 北京 : 科学出版社 )]
- [ 3 ] 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 ]
- [ 4 ] Ouyang X P 2002 *Ph. D. Thesis* ( Shanghai : Fudan University )( in Chinese )[ 欧阳晓平 2002 博士学位论文 ( 上海 : 复旦大学 )]
- [ 5 ] Ouyang X P , Li Z F , Huo Y K *et al* 2006 *HEP&NP* **30** 704 ( in

Chinese )[ 欧阳晓平、李真富、霍裕昆等 2006 高能物理与核物理 **30** 704 ]

- [ 6 ] Hu M C , Ye W Y , Tang Z K *et al* 2005 *IEE* **3** 141 ( in Chinese ) [ 胡孟春、叶文英、唐章奎等 2005 信息与电子工程 **3** 141 ]
- [ 7 ] Tong S B 1988 *Base of Analogue electronic technology* ( Beijing : High Education Press )( in Chinese )[ 童诗白 1988 模拟电子技术基础 ( 北京 : 高等教育出版社 )]
- [ 8 ] CERN : *Geant4 User 's Guide- for Application Developers* 2005
- [ 9 ] CERN : *Physics Reference Manual* 2005
- [ 10 ] Briesmeister J F 1997 *MCNP-A general Monte Carlo N -Particle Transport Code* ( Version 4B ) LA -12625-M

# A composite Si-PIN 14 MeV neutron detector

Zhang Xian-Peng<sup>1)</sup> Ouyang Xiao-Ping<sup>1,2)</sup> Zhang Zhong-Bing<sup>1)</sup> Tian Geng<sup>1)</sup>  
Chen Yan-Li<sup>1)</sup> Li Da-Hai<sup>1)</sup> Zhang Xiao-Dong<sup>1)</sup>

1 *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*

2 *Institute of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

(Received 24 March 2007 ; revised manuscript received 26 April 2007)

## Abstract

This paper presents the principle of a new composite ( $C_2H_4$ )<sub>n</sub>-PIN sandwiched fusion neutron detector, which uses 2 mm ( $C_2H_4$ )<sub>n</sub> as sensitivity enhancement medium, and add circuit to merge the output signals. The main merits of the detector are : (1) greatly improved neutron sensitivity and better statistics ; (2) improved n/γ discrimination ; (3) implementing the signal summation without obviously affecting the time response. Characteristics of the detector, including the sensitivity to 14 MeV neutron and 1.25 MeV γ ray, n/γ discrimination, time response, and statistics are studied theoretically and experimentally.

**Keywords** : Si-PIN semiconductor detector, sensitivity, n/γ discrimination, time response

**PACC** : 2940P, 2970J