

# 具有统计增强效应的 $(CF_2)_n$ -PIN 夹层探测阵列

欧阳晓平<sup>1,2</sup> 李真富<sup>2</sup> 霍裕昆<sup>3</sup> 王义<sup>1</sup> 张忠兵<sup>2</sup>

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)

**摘要** 采用灵敏区尺寸为 $\phi 60\text{mm}$ , 厚度 $1000\mu\text{m}$ 的大面积电流型厚PIN半导体探测器+聚四氟乙烯片+PA101低噪声放大器, 构建了灵敏度为 $10^{-11}\text{C}\cdot\text{cm}^2$ , 具有显著统计增强效应的夹层高灵敏PIN探测阵列. 采用Monte-Carlo数值模拟方法, 研究了该探测阵列的统计增强效应对 $\gamma$ 射线探测灵敏度. 该阵列在极低强度脉冲 $\gamma$ 射线探测中具有明显的统计增强效应, 且能量响应平坦, 单个阵列探测范围可达7个量级, 其 $\gamma$ 灵敏度比直径为 $\phi 20\text{mm}$ , 厚度为 $250\mu\text{m}$ 的单个PIN探测器高4个量级并可进行直接标定, 是低强度裂变 $n/\gamma$ 混合场脉冲 $\gamma$ 射线波形面积测量较理想的探测器, 已在有关科学实验中获得成功应用.

**关键词** 统计增强  $(CF_2)_n$ -PIN夹层 半导体探测器

## 1 引言

在脉冲 $\gamma$ , X射线源参数诊断中, 源辐射的 $\gamma$ , X射线强度和波形面积是其最重要的参数之一. 对于测点注量为 $10-10^6/\text{cm}^2$ , 强度可能的变化范围在6个量级以上的低强度脉冲 $\gamma$ , X射线源强度及波形面积测量, 通常用于高强度脉冲 $\gamma$ 射线强度探测的真空康普顿探测器、介质康普顿探测器和ICI探测器, 由于其 $\gamma$ 射线灵敏度一般低于 $10^{-19}\text{C}\cdot\text{cm}^2$ , 不能满足测量的最低灵敏度要求<sup>[1-3]</sup>. 由闪烁体+光电倍增管组成的脉冲 $\gamma$ 射线探测器, 可获得 $10^{-10}-10^{-16}\text{C}\cdot\text{cm}^2$ 的 $\gamma$ 射线探测灵敏度, 但其线性电流一般为 $200-400\text{mA}$ , 单只探测器的测量范围一般为1-2个量级, 无法满足4个以上量级测量范围的要求. 已有尺寸为 $\phi 8-60\text{mm}$ , 灵敏区厚度为 $200-1000\mu\text{m}$ 的PIN探测器<sup>[4, 5]</sup>, 其单只探测器的 $\gamma$ 辐射灵敏度 $\leq 1.0 \times 10^{-14}\text{C}\cdot\text{cm}^2$ , 也很难解决测点注量 $10-10^3/\text{cm}^2$ 时脉冲信号记录和测量遇到的统计性难题. 本文采用灵敏区面积为 $\phi 60\text{mm}$ , 全耗尽层厚度为 $1000\mu\text{m}$ 的大面积电流型厚Si-PIN半导体探测器<sup>[6]</sup>+聚四氟乙烯薄片+PA101低噪声放大器

(放大倍数100), 构建了 $\gamma$ 灵敏度接近 $10^{-11}\text{C}\cdot\text{cm}^2$ , 最大线性电流输出达 $100\text{A}$ , 在 $10000/\text{pulse}$ 的低强度 $\gamma$ 射线测量中, 电流输出具有良好的统计性, 波形面积测量下限可达 $1000/\text{pulse}$ 的统计增强型高灵敏Si-PIN探测器阵列, 该阵列在满足测量统计性要求的条件下, 测量范围可达7个量级, 是低强度脉冲 $\gamma$ , X射线强度和波形面积测量较理想的探测器, 已在有关科学实验中得到成功应用.

## 2 探测阵列结构

$(CF_2)_n$ -PIN夹层探测阵列结构示意图如图1、图2所示. 其基本原理是通过PIN探测器收集放置其前面厚约 $2\text{mm}$ 的聚四氟乙烯片与 $\gamma$ 射线作用产生的康普顿电子, 使得进入探测阵列发生作用的事件数比仅在PIN中作用的事件数高出数倍, 实现低强度测量中的统计增强. 聚四氟乙烯夹层的厚度依入射 $\gamma$ 射线能量而变, 对于平均能量为 $1.25\text{MeV}$ 的 $\gamma$ 射线, 计算得到的优选厚度为 $2\text{mm}$ 左右. 图3和图4是实际研制的单个探测器及其构建的阵列.

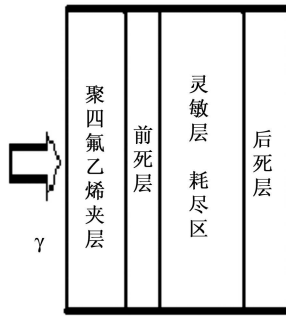


图 1 单只统计增强 PIN 探测器结构

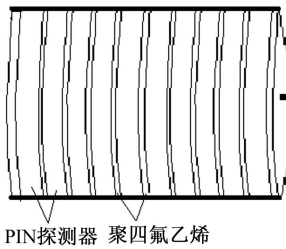


图 2 夹层式统计增强型 PIN 探测器阵列结构



图 3 直径  $\phi 60\text{mm}$ ，厚  $\sim 1000\mu\text{m}$  的大面积厚 PIN



图 4 10 片大面积厚 PIN+11 片  $(CF_2)_n$  组成的阵列

### 3 探测器阵列的统计增强效应

#### 3.1 测量的统计性

为了使探测器达到高灵敏，使用 10 个效率增强型硅 PIN 探测器组成探测器阵列，每个探测器结构为： $\phi 60\text{mm}$ ，前死层厚  $0.5\mu\text{m}$ ，后死层厚  $25\mu\text{m}$ ，灵敏区厚  $1000\mu\text{m}$ ，探测器前加  $2\text{mm}$  的  $(CF_2)_n$  层。探测器阵列的响应等于各探测器的响应之和。由于模拟程序对 10 个探测器分别记录，因此要将各探测器的计算结果综合起来。设各探测器的响应均值分别为  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{10}$ ，

则探测器阵列的响应  $y$  可表示为

$$y = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_{10}, \quad (1)$$

设各探测器的响应为相互独立的随机变量，相对不确定度分别为  $R_1, R_2, \dots, R_{10}$ ，则探测器阵列的响应的相对不确定度  $R$  可定义为

$$R = \frac{\sqrt{S^2}}{\sqrt{ny}}, \quad (2)$$

其中  $n$  为试验次数，即入射粒子数。  $S^2$  为方差。由于

$$S^2 = S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_{10}^2, \quad (3)$$

故得探测器阵列响应的相对不确定度  $R_d$  为

$$R_d = \frac{\sqrt{R_1^2 \bar{x}_1^2 + R_2^2 \bar{x}_2^2 + \dots + R_{10}^2 \bar{x}_{10}^2}}{y} \quad (4)$$

#### 3.2 探测器阵列统计增强效应 M-C 模拟

##### 3.2.1 探测 $\gamma$ 注量下限

在低强度脉冲  $\gamma$  射线测量中，探测下限和测量统计性是一个十分重要的指标，它直接指示测量数据的可靠性。探测器阵列输出电流  $I$  可表示为

$$I = NE_\gamma S(E_\gamma)/t, \quad (5)$$

其中  $N$  为粒子数目， $S(E_\gamma)$  为探测器阵列的  $\gamma$  绝对灵敏度， $E_\gamma$  为  $\gamma$  射线能量， $t$  为收集时间。

如  $\gamma$  射线与探测器阵列的作用概率为  $\eta$ ，则探测器阵列响应电流的统计涨落为  $\frac{1}{\sqrt{\eta N}}$ 。

设电子学线路对探测器阵列输出的可探测电流下限为  $1\mu\text{A}$  (放大后为  $100\mu\text{A}$ ，输出电压  $5\text{mV}$ )，探测阵列响应电流的统计涨落上限为 10%。对于平均能量为  $1\text{MeV}$  的  $\gamma$  射线源，不同  $\gamma$  注量率下的探测阵列响应电流及统计涨落的计算结果如表 1。可以看出，随着  $\gamma$  注量率的增加，探测器响应增大，且其统计涨落变小。当  $\gamma$  注量率低于  $10/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{s}$ ，统计涨落大于 10%。因此，从理论上说，该探测阵列的可探测  $\gamma$  注量率下限为  $10/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{s}$ 。

表 1 不同  $\gamma$  注量率下的探测器阵列响应电流及统计涨落

$\gamma$ 注量率/ $(\text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	响应电流/ $\mu\text{A}$	统计涨落(%)
4	0.52	12
6	0.73	10
10	1.31	7.5

注： $\gamma$  射线源平均能量取为  $E_\gamma = 1\text{MeV}$ ， $\eta = 0.36$ 。

##### 3.2.2 探测阵列的统计增强效应

为了解探测器夹层对统计增强效应的影响进而得到测量下限的概念，做了进一步的 M-C 的模拟计算，

设输入脉冲为高斯型,  $(CF_2)_n$  厚度均为 2mm, 计算得到的测量统计性示于图 5—10 中. 从图中可以看出, 聚四氟乙烯夹层具有显著的统计增强效应. 在单个脉冲包含粒子数为 10000 个时, 输出波形很光滑, 在包含 1000 个粒子的单脉冲作用下, 依然具有较好的统计性.

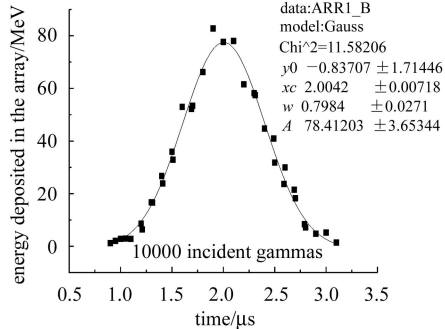


图 5 脉冲粒子数 10000, 2mm  $(CF_2)_n$

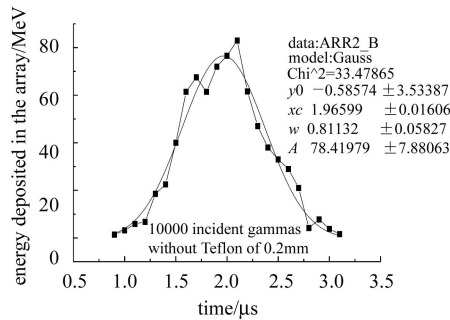


图 6 脉冲粒子数 10000, 无  $(CF_2)_n$

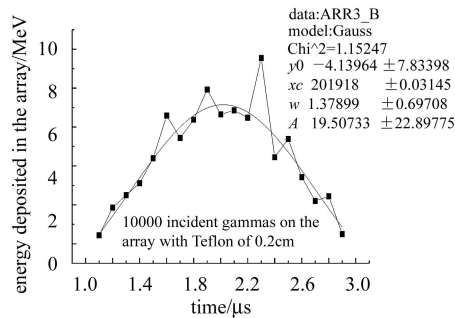


图 7 脉冲粒子数 1000, 2mm  $(CF_2)_n$

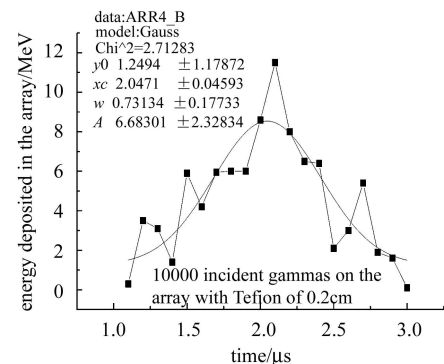


图 8 脉冲粒子数 1000, 无  $(CF_2)_n$

从单个脉冲包含粒子数目与输出信号的线性关系模拟中, 有无  $(CF_2)_n$  夹层区别明显. 因此, 探测阵列的夹层设计对于测量低强度脉冲裂变伽玛射线强度或波形面积具有很好的统计效益. 在实际模拟中, 每次开始计算, 随机数都需要随机的改变, 这样才能模拟出真实效果.

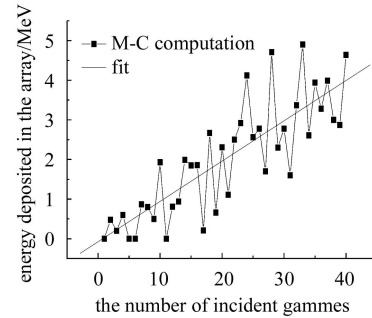


图 9 响应随入射粒子数的变化, 2mm  $(CF_2)_n$

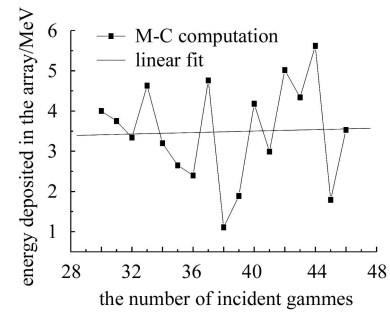


图 10 响应随入射粒子数的变化, 无  $(CF_2)_n$

### 3.3 探测阵列的能量响应和灵敏度增强效应

#### 3.3.1 能量响应

采用 M-C 方法对总 PIN 耗尽层厚度的  $(CF_2)_n$ -PIN 探测阵列的  $\gamma$  灵敏度进行了模拟计算, 得到的单位面积 ( $1\text{cm}^2$ ) 灵敏度如图 11 所示<sup>[6]</sup>. 从图中不难看出, 当入射  $\gamma$  射线能量大于 0.2MeV 时, 灵敏度随  $\gamma$  能量的变化比较平坦.

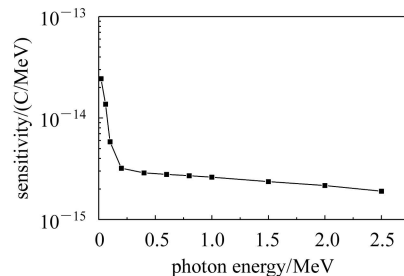


图 11 单位面积夹层式统计增强型 PIN 探测器阵列的  $\gamma$  灵敏度与入射光子能量的关系  
探测器面积取  $1\text{cm}^2$ .

### 3.3.2 探测阵列的灵敏度增强效应

研制探测阵列的主要目的是提高其对脉冲射线束的探测灵敏度. 采用聚四氟乙烯夹层则明显提高其测量的统计性, 对提高灵敏度并不明显.  $\gamma$ 射线与聚四氟乙烯作用产生的康普顿电子, 部分能够穿出聚四氟乙烯表面进入PIN探测器, 对输出信号有贡献. 但是, 在PIN探测器中产生的康普顿电子, 也有一部分进入聚四氟乙烯, 对灵敏度增强产生抵消作用. 表2是探测器及其阵列对 $^{60}Co$   $\gamma$ 射线灵敏度的实验测量结果. 对于1.25MeV的 $\gamma$ 射线, 其总灵敏度接近 $10^{-13}C \cdot cm^2$ , 经100倍低噪声放大器信号放大, 总灵敏度接近 $10^{-11}C \cdot cm^2$ , 比常用的 $\phi 20mm$ ,  $250\mu m$ 的PIN探测器高出4个量级.

表2 PIN探测器、阵列 $^{60}Co$ - $\gamma$ 灵敏度测量结果( $\phi 60mm$ )

探测器	厚度/ $\mu m$	输出 电流/ $\mu A$	总 $\gamma$ 灵敏度/ $10^{-15}$ ( $C \cdot cm^2$ )	单位体积 灵敏度/ $10^{-18}$ ( $C/MeV \cdot mm^3$ )
4 <sup>#</sup>	286	1.89	2.49	2.44
10 <sup>#</sup>	256	1.68	2.22	2.45
夹层PIN阵列 ( $(CF_2)_n$ 为2mm)	9770	72.0	94.0	2.74
PIN阵列 (无 $(CF_2)_n$ )	9770	58.0	75.6	2.21

注: 测量不确定度为 $\pm 15\%$ . 夹层PIN阵列含聚四氟乙烯, PIN阵列不含聚四氟乙烯.

### 3.4 探测阵列对脉冲的时间响应

单个大面积厚PIN探测器的时间响应在80ns左右<sup>[6]</sup>, 对于夹层式大面积PIN阵列, 由于输出信号采用单个探测器并联方式, 其输出电容明显增大, 因此, 时间响应也明显变慢. 图12(a), (b)是单只和阵列对脉冲X射线响应的原始波形, 其半高宽分别为81ns和346ns. 因此, 探测器阵列在提高测量统计性和探测灵敏度的同时, 其时间响应变慢了, 主要是探测阵列电容明显增加了. 根据线性系统对脉冲的响应规律, 系统时间响应不影响波形面积测量(面积归一). 在夹层式阵列的概念下, 如果采用响应速度快的半导体探测器(例如CVD探测器)或特殊的输入输出结构, 可获得快响应的探测阵列.

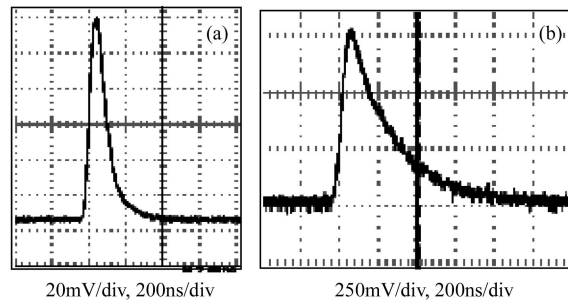


图12 大面积厚PIN探测器及探测器阵列对脉冲X射线的时间响应波形

(a) 单片探测器时间响应波形; (b) 探测器阵列的时间响应波形.

### 3.5 探测器的线性电流输出及测量动态范围

对于 $\phi 60mm$ 的大面积PIN探测器, 在600V偏压下其线性电流可达10A以上. 采用10个探测器并联输出, 它们的线性输出互不影响, 因此, 其线性电流输出估计100A以上. 探测阵列+PA101低噪声放大器, 使得其最小输出电流在 $10\mu A$ 时还可以被示波器记录. 因此, 采用适当的电子学记录技术, 夹层式统计增强型PIN探测阵列在满足统计性条件下, 可实现 $10\mu A$ —100A的输出. 测量动态范围可达7个量级以上.

## 4 探测阵列应用

已将本文研制的探测阵列应用于脉冲 $\gamma$ 波形面积的实际测量中, 其单个阵列的测量范围覆盖7个量级, 并取得了满意的结果. 获得的脉冲源的原始记录波形如图13所示<sup>[6]</sup>, 波形干净光滑, 数据质量高, 所获结果与原有其他探测器的一致. 因此, 我们研制的探测阵列具有很高的效费比和广阔的应用前景.

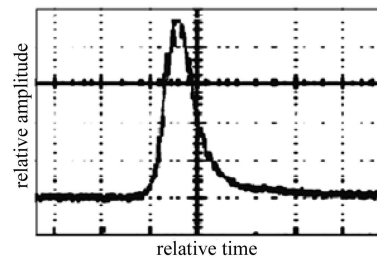


图13 探测阵列获得的典型脉冲 $\gamma$ 波形

## 参考文献(References)

- 1 Fewell T R. SC-DR-72 0118. 1972
- 2 Ebert P, Lauzon A F. Sci. Instr., 1967, **38**(12): 1747—1750
- 3 OUYANG Xiao-Ping, ZHANG Zhong-Bing, WANG Wei. HEP & NP, 2006, **30**(3): 228 (in Chinese)  
(欧阳晓平, 张忠兵, 王伟. 高能物理与核物理, 2006, **30**(3): 228)
- 4 OUYANG Xiao-Ping, LI Zhen-Fu, ZHANG Guo-Guang et al. Acta Phys. Sin., 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)
- 5 Kuckuck R W. UCRL-51011. 1971
- 6 OUYANG Xiao-Ping. Studies on the Detection of Pulsed Fission Neutrons from Low-Intensity Radiation Sources, 2002, Shanghai: Fudan University (in Chinese)  
(欧阳晓平. 低强度脉冲裂变中子探测技术研究. 上海: 复旦大学博士论文, 2002)

## A $(\text{CF}_2)_n$ -PIN Sandwich Detecting Array with Statistics Enhancement in Low Pulsed $\gamma$ Flux Measurement

OUYANG Xiao-Ping<sup>1,2</sup> LI Zhen-Fu<sup>2</sup> HUO Yu-Kun<sup>3</sup> WANG Yi<sup>1</sup> ZHANG Zhong-Bing<sup>2</sup>

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

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

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

**Abstract** A  $(\text{CF}_2)_n$ -PIN sandwiched detecting array with statistics enhancement in low pulsed  $\gamma$  flux measurements has been constructed. The array uses 2mm thick  $(\text{CF}_2)_n$  overlaid with Si-PIN detector of  $\phi 60\text{mm} \times 1000\mu\text{m}$ , then coupled to PA101 amplifier with gain 100. The array exhibits four distinct properties: (1) very high detecting efficiency: The  $\gamma$  detecting sensitivity of the array can reach  $10^{-11}\text{C}\cdot\text{cm}^2$ , which is 4 orders of magnitude higher than that of a signal PIN detector of  $\phi 20\text{mm} \times 250\mu\text{m}$ ; (2) remarkable statistics enhancement: The statistics enhancement of the array has been studied with M-C simulation, which displays highly enhanced statistics in very low pulsed  $\gamma$  flux measurement; (3) huge dynamic range: A single array can cover seven orders of magnitude's measurement range of  $\gamma$  flux; and (4) flat response in given  $\gamma$  energy range. The array has found its applications in experimental measurements.

**Key words** statistics enhancement,  $(\text{CF}_2)_n$ -PIN sandwich, semiconductor detector