

大面积 PIN 探测器性能参数实验测量*

郭洪生, 何锡钧, 彭太平

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用 CGC-67 型三通道 γ 源加速器测量了 $\phi 50$ mm, $\phi 60$ mm PIN 探测器的时间响应、线性电流及相对灵敏度, 并与理论计算结果进行了比较, 验证了实验结果的可靠性。

关键词: PIN 半导体探测器; 时间响应; 线性电流; 相对灵敏度

中图分类号: TL811 **文献标识码:** A

1 引言

半导体探测器, 特别是电流型 PIN 半导体探测器在脉冲辐射场测量中有广泛应用, 主要用于带电粒子的探测, 也可通过 γ 辐射、中子和 X 辐射与半导体探测器灵敏介质或辐射转换靶物质相互作用产生次级带电粒子的探测, 实现对脉冲中子、脉冲 γ 和脉冲 X 辐射的探测。半导体探测器的优点是: 体积小、入射窗薄、产生电子-空穴对平均消耗的能量低。脉冲辐射场测量中最常见的 PIN 电流型半导体探测器的工作原理和探测器结构见文献[1—3]。

一般说来, 光电倍增管与闪烁体组成的探测系统探测效率范围在 10^{-9} — 10^{-14} C·cm², 而光电管与闪烁体组成的探测系统探测效率范围在 10^{-16} — 10^{-19} C·cm², 而大面积($\phi 60$ mm)电流型 PIN 半导体探测器的探测效率范围约在 10^{-14} — 10^{-16} C·cm², 正好可以弥补光电倍增管与光电管探测系统灵敏度范围的空白^[4,5]。为此, 我们请中国工程物理研究院 5 所采用高阻单晶硅棒, 经切片、磨片和腐蚀等工艺, 采用离子注入法, 再经清洗、烘干和退火等封装而成了大面积($\phi 60$ mm)电流型 PIN 半导体探测器, 其灵敏区(全耗层)厚度约为 200 μ m。表征 PIN 半导体探测器的主要性能指标有时间响应、线性电流及相对灵敏度。本文主要讨论 PIN 电流型半导体探测器时间响应、线性电流及相对灵敏度的测量方法。

2 实验内容

对于我们的实验目的而言, PIN 电流型半导体探测器最有用的特性参数有 3 个: 时间响应、线性电流及相对灵敏度。一般来说, PIN 半导体探测器的时间响应与灵敏层厚度、外加偏压、电子和空穴的迁移率、电子和空穴的收集时间、探测器灵敏层电容、外接负载电阻、入射辐射的类型、输出电流的大小等诸多因素有关, 难于用数学解析式表达。PIN 半导体探测器输出线性与外加偏压在灵敏层内形成的有效电场的大小、入射辐射在灵敏层中产生的载流子形成空间电荷的密度以及由其引起的电场抵消外加偏压在灵敏层内形成的有效电场的多少、灵敏层的有效面积和厚度、输出端外接负载的大小、电极的连接方式和接触电阻的大小等诸多因素有关。PIN 半导体探测器的灵敏度(在此处指效率)可以用数学公式表达:

$$S(E) = A_{\text{eff}} \times \eta(E) \times \overline{E_c}(E) \times \frac{e}{w} \times k_1, \quad (1)$$

式中, $S(E)$ 为探测器对能量为 E 的 γ 辐射的能量灵敏度(C·cm²), E 为入射 γ 粒子的能量(MeV), A_{eff} 为探测器接收入射辐射的有效面积(cm²), $\overline{E_c}(E)$ 为被测到能量为 E 的入射辐射粒子在探测器中产生次级带电粒子的平均能量, e 为电子电荷 1.6×10^{-19} , w 为每产生一对电子-空穴对所消耗的平均

收稿日期: 2004-12-09; 修改日期: 2005-06-29

* 基金项目: 中国工程物理研究院国防科技预研资助项目(421030302)

作者简介: 郭洪生(1961-), 男(汉族), 福建上杭人, 副研究员, 博士, 从事核辐射脉冲测量技术研究;

E-mail: ghongsheng@163.cn

能量(一般取 3.62 eV), k_1 为与光电器件及晶体有关的参数(一般取 $k_1 = 1$), ρ 为晶体物质的质量密度(g/cm^3), d 为晶体物质在 γ 辐射入射方向上的厚度(cm), $\eta(E)$ 为辐射粒子的转换效率。 $\eta(E)$ 计算公式为

$$\eta(E) = 1 - e^{-\mu(E)\rho d} \quad (2)$$

$\eta(E) \times \overline{E}_e(E)$ 有两种选择:

(1) 取 $\mu(E)$ 为晶体物质对能量为 E 的 γ 辐射的质量吸收系数(cm^2/g); 则 $\eta(E)$ 为探测器对能量为 E 的入射辐射粒子的探测效率(无量纲), 且 $\overline{E}_e(E)$ 应为被测到能量为 E 的入射辐射粒子损失于晶体中产生次级带电粒子的平均能量(MeV)。数值上可使用 γ 光子在探测器物质中产生的康普顿电子的平均能量。

(2) 取 $\mu(E)$ 为晶体物质对能量为 E 的 γ 辐射的质能吸收系数(cm^2/g), 则 $\eta(E)$ 为探测器对能量为 E 的入射辐射粒子的能量吸收效率(无量纲); 且 $\overline{E}_e(E)$ 应取入射辐射光子能量 E (MeV)。

虽然如此, 但是也受到诸多因素的影响, 故 PIN 半导体探测器的灵敏度一般仍以实验为主。

2.1 实验测量方法

2.1.1 PIN 电流型半导体探测器时间响应测量方法

实验以 CTC-67 型三通道加速器脉冲辐射源上产生的 γ 辐射为测量源, 由于该辐射的半高宽 FWHM 小(约为 300 ps), 可认为是 δ 脉冲源, 这时在示波器上记录到的探测器输出电流波形时间响应可直接作为探测器的时间响应。我们采用的是美国 Tek 公司的 TDS684A 数字示波器, 它的带宽为 1 G, 所用探测器输出回路的负载电阻 $R = 50 \Omega$, 探测器

的电容值约为 600 pF, 故探测器的 $RC = 30 \text{ ns}$ 。

2.1.2 PIN 电流型半导体探测器线性电流测量方法

实验由 CTC-67 型三通道加速器脉冲辐射源的纳秒通道释放的 γ 辐射为测量源, 调整探测器与辐射源的相对距离, 分别记录下不同距离(即不同照射量)时探测器的输出电流 I , 观察示波器的记录波形特征。当探测器的输出电流偏离线性约 10% 时, 可认为此时的输出电流为探测器的最大线性电流(如图 1 所示)。

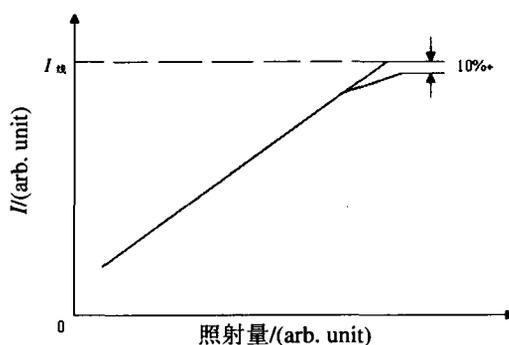


图 1 PIN 探测器线性电流测量方法

2.1.3 PIN 电流型半导体探测器相对灵敏度测量方法

以一个探测器的灵敏度作为基准, 每个探测器测量的灵敏度均与此基准探测器的灵敏度进行比较, 可得到各探测器的相对灵敏度; 如果基准探测器的绝对灵敏度已标定好, 则可由此得到各探测器的绝对灵敏度。

2.2 实验测量结果

(1) $\phi 50 \text{ mm}$, $\phi 60 \text{ mm}$ PIN 探测器时间响应实验测量数据见表 1 和表 2。

表 1 $\phi 60 \text{ mm}$ PIN 探测器时间响应实验数据

探测器号	9011	9033	9035	9039	9026	9025	9020	9042	9032
前沿/ns	11.34	10.76	11.93	10.99	10.99	10.33	11.61	10.77	9.58
半高宽/ns	39.61	40.23	41.15	38.47	41.07	42.92	40.37	38.44	34.58

表 2 $\phi 50 \text{ mm}$ PIN 探测器时间响应实验数据

探测器号	9001	9003	9032
前沿/ns	10.16	10.31	9.58
半高宽/ns	37.51	33.42	34.54

(2) $\phi 50 \text{ mm}$, $\phi 60 \text{ mm}$ PIN 探测器线性电流范围实验测量数据见表 3 和表 4。此线性电流即为保持探测器电流线性输出时的最大电流。

(3) 实验测量 $\phi 50 \text{ mm}$, $\phi 60 \text{ mm}$ PIN 探测器相对灵敏度见表 5、表 6 和表 7。

表 3 $\phi 60$ mm PIN 探测器线性电流实验数据

探测器号	9011	9033	9035	9039	9026	9025	9020	9042	9032
线性电流/A	6.29	8.73	9.38	8.4	6.8	9.06	8.89	7.82	3.14

表 4 $\phi 50$ mm PIN 探测器线性电流实验数据

探测器号	9001	9003	9032
线性电流/A	6.37	7.26	3.14

表 5 $\phi 60$ mm PIN 探测器相对灵敏度 (以 $\phi 60$ mm PIN 探测器 9032 为基准)

探测器号	9011	9033	9035	9039	9026	9025	9020	9042	9032
相对灵敏度	0.84	1.03	0.95	0.94	1.36	0.98	0.93	0.96	1

表 6 $\phi 50$ mm PIN 探测器相对灵敏度 (以 $\phi 60$ mm PIN 探测器 9032 为基准)

探测器号	9001	9003	9032
相对灵敏度	0.747	0.726	1

表 7 $\phi 60$ mm PIN 探测器 9032 的相对灵敏度 (以 $\phi 20$ mm PIN 探测器 95007 为基准)

探测器号	9032	95007
相对灵敏度	1	0.17

由上面的实验测量结果可得出:

$\phi 50$ mm, $\phi 60$ mm PIN 探测器前沿时间约在 9—11 ns 之间, 半高宽时间约在 33—43 ns 之间;

$\phi 50$ mm, $\phi 60$ mm PIN 探测器最大线性电流约在 6—9 A 之间;

$\phi 60$ mm PIN 探测器 (以 $\phi 60$ mm PIN 探测器 9032 为基准) 的相对灵敏度在 0.8—1 之间;

$\phi 50$ mm PIN 探测器 (以 $\phi 60$ mm PIN 探测器 9032 为基准) 的相对灵敏度约 0.72;

$\phi 20$ mm PIN 探测器 (以 $\phi 60$ mm PIN 探测器 9032 为基准) 的相对灵敏度为 0.17。

根据 $\phi 20$ mm PIN 探测器曾经在辐射脉冲 γ 源加速器上标定的灵敏度数据, 对平均能量为 1.2 MeV 的 γ 灵敏度约为 $3 \times 10^{-16} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$, 可推算出 $\phi 60$ mm PIN 探测器灵敏度大约为 1.41×10^{-15} —

$1.77 \times 10^{-15} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$, $\phi 50$ mm PIN 探测器灵敏度大约为 $1.27 \times 10^{-15} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ 。

3 $\phi 50$ mm, $\phi 60$ mm PIN 探测器灵敏度能量响应计算数据

由于 γ 射线与物质相互作用截面随能量变化, γ 射线通过吸收物质或散射物质后能谱要发生变化; γ 总数测量是绝对测量, 测量结果的准确性很大程度上取决于能否准确地测量或计算出 γ 射线通过探测辐射通道中的吸收物质或散射物质后能谱的变化, 以及探测器对 γ 射线的灵敏度能量响应, 实验只能对几个能点的灵敏度能量响应进行测量, 得到一个能谱的灵敏度能量响应, 需要理论计算和实验测量相结合。

表 8 $\phi 50$ mm 与 $\phi 60$ mm PIN 探测器的灵敏度能量响应计算数据

能量/MeV	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	1.05	1.15
$\phi 60$ mm 灵敏度/ $(\text{C} \cdot \text{cm}^2) (\times 10^{-15})$	0.662	0.937	1.21	148	1.73	1.95	2.20	2.41	2.62	2.82
$\phi 50$ mm 灵敏度/ $(\text{C} \cdot \text{cm}^2) (\times 10^{-15})$	0.46	0.651	0.842	1.03	1.20	1.35	1.53	1.68	1.82	1.96
能量/MeV	1.25	1.35	1.55	1.85	2.25	2.75	3.25	4.25	6.0	7.75
$\phi 60$ mm 灵敏度/ $(\text{C} \cdot \text{cm}^2) (\times 10^{-15})$	3.01	3.19	3.53	4.03	4.65	5.38	6.08	7.49	9.92	12.5
$\phi 50$ mm 灵敏度/ $(\text{C} \cdot \text{cm}^2) (\times 10^{-15})$	2.09	2.21	2.45	2.79	3.23	3.74	4.22	5.18	6.89	8.67

由公式(1)和(2), 将裂变谱能量范围的能量分群, 分别计算各个能群 γ 入射到 PIN 探测器灵敏层内的沉积能量, 根据 PIN 探测器产生一个电子-空穴对所需平均能为 3.62 eV, 计算出沉积能量对应的电荷数, 转化成电流, 得出 PIN 探测器对各个能群 γ 的灵敏度。

将所有能群对应的灵敏度相加得出 PIN 探测器对整个裂变 γ 谱的灵敏度。

PIN 探测器的理论计算灵敏度的能量响应数据见表 8。

参 考 文 献:

- [1] STEVENS J Knowlen R B, John W. Investigation of Performance of PIN Silicon Detectors, EGG-1183—2183.
 [2] Kuchuck R W. Semiconductor Detectors for use in The Current Mode, UCRL-5011.
 [3] 刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术. 北京: 科学出版社. 1994,

4 结 论

结合本次探测器面积大、灵敏层厚的特点, 对 PIN 探测器灵敏度能量响应理论计算程序进行适当修改, 使其能适应大面积 PIN 型探测器灵敏度能量响应计算。我们采用 PIN 探测器灵敏度能量响应理论计算程序计算了 $\phi 50$ mm 与 $\phi 60$ mm PIN 探测器灵敏度数据, 也多次用平均能量与被测 γ 谱平均能量相当的辐射脉冲源实验标定验证, 并以此为基础所推荐的数据的合理性也为理论计算程序验证过。

173—184.

- [4] 郭洪生, 李恩平, 何锡钧等. 原子核物理评论, 2004, 21(3): 214.
 [5] 郭洪生, 何锡钧, 彭太平等. 原子核物理评论, 2005, 22(1): 58.

Measurements of Parameters on Large Area PIN Detectors*

GUO Hong-sheng, HE Xi-jun, PENG Tai-ping

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: $\phi 60$ mm silicon PIN detector is a large area and high sensitive one which has been developed in near years. Using the type CFC-67 γ accelerator, the parameters of PIN detectors such as time response, linear current and relative sensitivity are measured. The experiment results are compared with the theory calculation. The PIN detector can reach high γ efficiency of up to 10^{-14} — 10^{-16} C · cm², the rise time is about 10 ns and the FWHM of the time pulse is about 35 ns. The γ efficiency of the PIN detector may provide the sensitive range between 10^{-14} — 10^{-16} C · cm² that scintillator + photo tubes detecting system and scintillator + photomultiplier tubes detecting system is not developed.

Key words: PIN detector; time responsibility; linear current; relative sensitive

* Foundation item: Fund of Pre-study on China Academy of Engineering Physics(421030302)