

电流型大面积 PIN 探测器

欧阳晓平^{1,2)} 李真富²⁾ 张国光²⁾ 霍裕昆¹⁾ 张前美²⁾ 张显鹏²⁾
宋献才³⁾ 贾焕义³⁾ 雷建华³⁾ 孙远程³⁾

¹⁾ 复旦大学现代物理研究所, 上海 200433)

²⁾ 西北核技术研究所, 西安 710024)

³⁾ 中国工程物理研究院电子学研究所, 绵阳 621900)

(2001 年 5 月 26 日收到, 2001 年 12 月 10 日收到修改稿)

研制了灵敏区面积为 $\phi 40$, $\phi 50$ 和 $\phi 60\text{mm}$ 耗尽层厚度为 200—300 μm 的电流型大面积薄型 PIN 半导体探测器, 并对其物理性能进行了测量. 测试和应用表明, 这些探测器性能稳定, 漏电流符合使用要求. 与市场上的大面积 PIN 半导体探测器相比, 这些探测器主要在几百伏偏压下工作在电流模式, 但也可用于计数模式, 而目前的商用产品仅适用于计数测量.

关键词: 半导体探测器, 大面积, 电流型

PACC: 2940P

1. 引 言

在核物理和基本粒子研究和应用的许多领域, 例如在低强度脉冲 X 射线、 γ 射线参数测量、弱放射性测量、核反应堆中子增值率测量及在中子、伽玛混合辐射场中测量中子或 γ 射线参数, 都需要高灵敏度的辐射探测器. 大面积硅 PIN 半导体探测器具有结构简单、灵敏度高、时间响应快、动态范围大等特点, 在脉冲辐射场的测量与诊断等核物理研究中很有实用价值, 为此, 本文研制了灵敏区面积为 $\phi 40$, $\phi 50$ 和 $\phi 60\text{mm}$, 全耗尽层厚度为 200—310 μm 的电流型大面积薄型 PIN 半导体探测器. 对其漏电流、死层、全耗尽层厚度、时间响应等进行了测量. 测试和应用表明, 这些探测器性能稳定, 在 600V 偏压下, 漏

电流小于 30 μA , 满足使用要求. 与市场上的大面积 PIN 半导体探测器相比, 本文研制的探测器主要在电流模式进行脉冲测量, 工作偏压为 100—600V, 但也能用于计数测量. 而目前的商用产品一般在几十伏偏压下作计数测量.

2. 大面积 PIN 探测器制作

PIN 探测器的制作在中国工程物理研究院电子工程研究所完成. 采用电阻率为 4000—5000 $\Omega\cdot\text{cm}$ 的高阻单晶硅棒, 经切片、磨片、腐蚀等加工工序, 用离子注入法在硅片两侧重掺磷施主杂质和硼受主杂质, 形成 N^+ 区薄层和 P^+ 区薄层, 再经清洗、烘干和真空退火处理封装而成. 重掺磷施主层和硼受主层

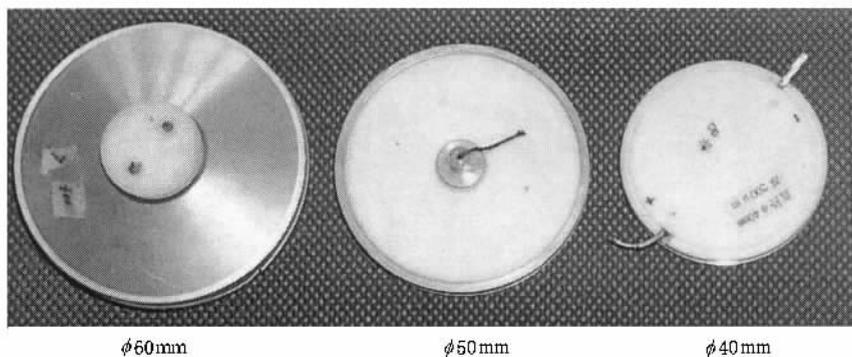


图 1 研制的三种大面积 PIN 半导体探测器外形

的厚度约为 80—150nm,这基本就是死层的厚度.同时,在 P⁺区和 N⁺区的外表面蒸上约 30—50nm 的金层,作为欧姆接触电极.探测器灵敏区面积为 $\phi 50$ 和 $\phi 60$ mm,灵敏区(全耗尽)厚度为 200—300 μ m.外形结构如图 1 所示.

3. PIN 探测器的性能

3.1. 探测器的漏电流

PIN 探测器的漏电流由势垒区内部产生的体电流、少数载流子扩散电流和表面漏电流组成.典型的漏电流测量结果见表 1.从表 1 可以看出,在 600V 偏压下探测器漏电流小于 50 μ A,满足使用要求.

表 1 大面积 PIN 探测器漏电流(μ A) (灵敏区面积为 $\phi 50$ mm,耗尽层厚度为 $200 \pm 20\mu$ m)

探测器偏压/V	200	400	600
3 [#] PIN 探测器漏电流/ μ A	4	12	20
4 [#] PIN 探测器漏电流/ μ A	4	8	14
6 [#] PIN 探测器漏电流/ μ A	10	20	30

3.2. 探测器灵敏区(全耗尽层)厚度的测量

PIN 探测器耗尽区厚度与采用的硅材料的电阻率 ρ 及所加偏压关系为^[2,3]

$$D = k(\rho V)^2, \quad (1)$$

式中 D 为耗尽层厚度(μ m), V 为所加的偏压(V), k 为比例常数.结区电容与耗尽区厚度关系为^[2]

$$C_d = \epsilon \epsilon_0 A/D, \quad (2)$$

式中 C_d 为探测器结电容(F), ϵ 为相对介电常量, ϵ_0 为真空中的介电常量,其值为 8.85×10^{-12} F/m, A 为探测器面积(m^2), D 为探测器耗尽层厚度(m).由(2)式知,耗尽层电容与耗尽层厚度有关.在全耗尽情况下,测出探测器结电容 C_d ,便可得到探测器灵敏层厚度.实际上,探测器总电容 C 由耗尽区电容 C_d 和杂散电容 C_s 构成.

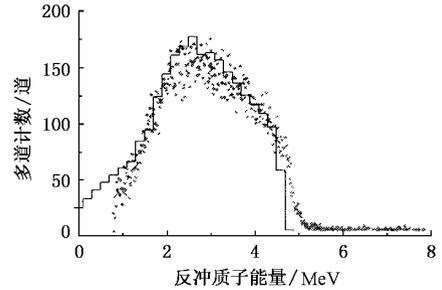
$$C = C_d + C_s. \quad (3)$$

杂散电容实际上很难精确测量,因而用电容法测得的 PIN 探测器灵敏区厚度值与用反冲质子谱方法测得的值有较大差别,这种差别有时达 $\pm 15\%$ 以上.

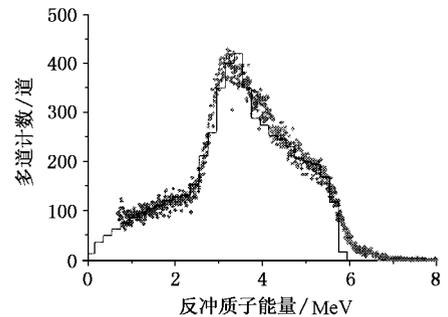
为精确确定探测器灵敏区厚度,我们采用高能中子-反冲质子能谱的厚度测量方法.根据中子在转换靶上产生的高速反冲质子在 PIN 探测器耗尽区能量损失与耗尽区厚度的关系,记录反冲质子谱并与

理论计算结果进行比较,进而确定耗尽层的厚度.这种方法在探测器厚度变化 2μ m 可以看到计算的反冲质子谱形的明显变化,同一探测器用不同角度(如 20° , 30° , 45° 和 60°)的反冲质子靶室测量,其灵敏区厚度在 $\pm 5\mu$ m 内一致,因此,有理由认为反冲质子谱方法的测量精度好于 $\pm 10\mu$ m.反冲质子谱方法测量耗尽层厚度是基于灵敏区的质子阻止本领或射程,不受其他因素影响,而质子在硅中的阻止本领和射程,目前可以较精确地得到,因此,我们认为用反冲质子谱方法测量 PIN 半导体探测器耗尽层厚度比较准确.

采用这一方法,对所研制的部分探测器厚度进行了测量.厚度确定方法见图 2,部分测量结果列于表 2.



(a)灵敏区面积为 $\phi 40$ mm,厚度为 234μ m



(b)灵敏区面积为 $\phi 60$ mm,厚度为 305μ m

图 2 采用理论计算反冲质子谱和实验测量反冲质子谱确定的 PIN 探测器灵敏区厚度.实线为理论计算获得的灵敏区内沉积的反冲质子谱,点状分布谱为实验测量中探测器记录的反冲质子谱

表 2 部分探测器灵敏区厚度测量结果(灵敏区面积为 $\phi 40$ mm)

探测器	2 [#]	3 [#]	6 [#]	8 [#]
结电容法	200 ± 30	250 ± 30	200 ± 30	300 ± 30
灵敏区厚度/ μ m				
反冲质子谱方法	214 ± 10	266 ± 10	214 ± 10	306 ± 10
特征 X 射线法	216 ± 20	270 ± 20	230 ± 20	307 ± 20

图 2 中实线为某一给定灵敏区厚度的理论计算曲线,点状分布谱为实验测出的反冲质子谱.通过反复计算和比较,可以得到待测探测器的耗尽层厚度.表 2 列出一些探测器厚度的实测结果,并列出了相应的电容法的测试和我们刚刚建立的特征 X 射线法的测量结果.可以看出,特征 X 射线测量得到的是整个硅片的物理厚度,因而要略大一些,其中包含了非耗尽部分.

3.3. 探测器死层测量

探测器死层实际上就是前后离子注入区重掺磷施主层和硼受主层的厚度.在带电粒子探测,尤其是重带电粒子(如裂变碎片)探测中,死层中损失的能量对输出信号没有贡献.对这部分能量进行校正,需要测出其厚度.

死层的测量原理如图 3 所示.采用 Pu-238 两种不同能量粒子的 α 以不同的入射角从探测器表面进入探测器,通过记录不同的能量损失而得到,部分探测器死层厚度如表 3.

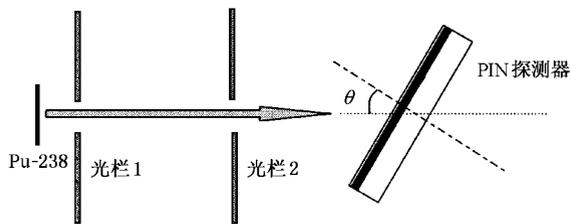


图 3 死层测量中源与探测器的几何布局

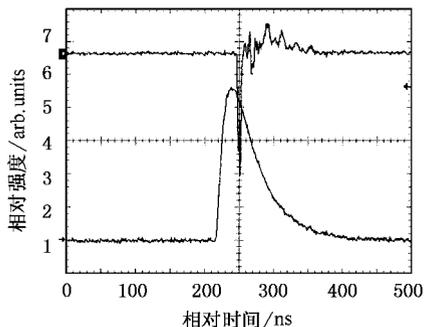
表 3 部分探测器死层厚度测量结果 (灵敏区面积为 $\phi 40\text{mm}$, 厚度为 $200\text{--}300\mu\text{m}$)

探测器	2 [#]	4 [#]	6 [#]	8 [#]
死层/nm	107.5	143.9	126.1	88.6

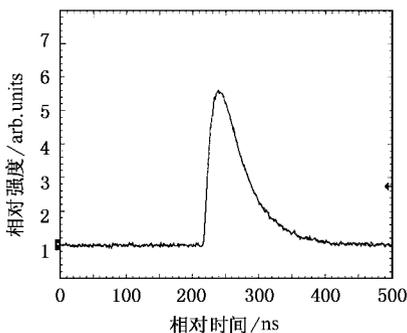
3.4. 探测器的时间响应

在半宽度为 1ns 左右的脉冲 X 射线源上测量了大面积薄型 PIN 探测器的时间响应.实测波形如图 4 所示.测量结果显示,灵敏区面积为 $\phi 50\text{mm}$,厚度为 $220\mu\text{m}$ 的 PIN 探测器,在偏压为 300V 时,其脉冲

响应波形的半宽度为 $56 \pm 5\text{ns}$ 左右,可用于脉宽大于 150ns 脉冲辐射的参数测量.



(a) 99006[#] 探测器



(b) 99002[#] 探测器

图 4 99006[#] 和 99002[#] PIN 探测器时间响应实测波形.探测器灵敏区面积为 $\phi 50\text{mm}$,偏压为 300V .图 (a) 上方负脉冲为源输出波形

4. 结 论

与传统的 PIN 探测器相比,大面积薄型 PIN 探测器研制对工艺和材料有更高的要求.在中子、伽玛混合辐射场中采用裂变碎片法测量脉冲中子信号,为减少伽玛本底和漏电流影响,满足一定的线性输出,要求 $\phi 60\text{mm}$ 的探测器灵敏区厚度在 $200 \pm 20\mu\text{m}$, 600V 偏压下漏电流小于 $30\mu\text{A}$,因而要求材料有很高的电阻率,同时,对加工工艺要求更加严格.这类探测器的研制,为今后研制 $\phi 80\text{mm}$ 以上的探测器提供了经验和基础.

- [1] Kuckuck R W 1971 Semiconductor Detectors for Use in the Current Mode (UCRL - 51011)
 Press [in Chinese] 复旦大学、清华大学、北京大学合编 1985 原子核物理实验方法(上册)[北京:原子能出版社]
- [2] Fudan University , Tsinghua University and Peking University 1985 *Experimental Methods in Nuclear Physics I* (Beijing : Atomic Energy Press)
 [3] Huang B 1981 *Experiment and Research* 1—2 30 (in Chinese) 黄豹 1981 实验与研究 1—2 30]

Development of large area silicon semiconductor detectors for use in the current mode

Ouyang Xiao-Ping^{1 2)} Li Zhen-Fu²⁾ Zhang Guo-Guang²⁾ Huo Yu-Kun¹⁾ Zhang Qian-Mei²⁾
 Zhang Xian-Peng²⁾ Song Xian-Cai³⁾ Jia Huan-Yi³⁾ Lei Jian-Hua³⁾ Sun Yuan-Cheng³⁾

¹⁾ *Institute of Modern Physics , Fudan University , Shanghai 200433 , China*

²⁾ *Northwestern Institute of Nuclear Technology , Xi ' an 710024 , China*

³⁾ *Institute of Electronic Engineering , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China*

(Received 26 May 2001 ; revised manuscript received 10 December 2001)

Abstract

Large area silicon semiconductor detectors for use in the current mode , with their dimensions of $\phi 40$, $\phi 50$ and $\phi 60$ mm , their depletion thickness of 200—300 μm , have been developed . Their performance measurements have been made , which indicate that the developed detectors can satisfactorily meet the needs in expectation . Compared with the detectors commercially available on the market , our large PIN detectors can serve both as reliable and efficient high-resolution devices for nuclear counting experiments , as well as monitors of high-intensity radiation fields in the current mode under a bias of 100—1000 V , while the detectors commercially available are only for the counting use .

Keywords : semiconductor detector , large area , current mode

PACC : 2940P