

用于脉冲 γ 强度测量的 $\phi 60, 1000 \mu\text{m}$ PIN 探测器

欧阳晓平^{1,2)} 李真富²⁾ 霍裕昆³⁾ 宋献才⁴⁾

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)

4) 中国工程物理研究院电子学研究所, 绵阳 621900)

(2005 年 9 月 12 日收到, 2006 年 8 月 8 日收到修改稿)

采用电阻率为 10000—20000 $\Omega \cdot \text{cm}$ 的高阻单晶硅材料, 研制成功灵敏区尺寸为 $\phi 60 \text{ mm}$, 耗尽层厚度 $\sim 1000 \mu\text{m}$ 的大面积厚 PIN 半导体探测器. 设计了该类探测器厚度测量专用的反冲质子测量系统, 对探测器的时间响应、 γ 灵敏度、漏电流、 γ/n 分辨等物理参数进行了测量和分析. 结果表明, 这类探测器可满足低强度裂变 n/γ 混合场中脉冲 γ 强度测量的需要.

关键词: 大面积, 电流型, 半导体探测器

PACC: 2940P

1. 引 言

在高强度脉冲 γ 射线探测中, 通常采用真空康普顿或介质康普顿探测器测量 γ 射线强度^[1,2]. 这类探测器线性电流大, 性能优异, 但灵敏度通常低于 $10^{-19} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$, 不能用于低强度测量. 由闪烁体 + 光电倍增管组成的脉冲 γ 射线探测器, 能够获得 10^{-10} — $10^{-16} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ 的 γ 射线探测灵敏度, 但这类光电探测器的辐射灵敏度敏感地依赖于所加偏压, 且线性电流较小, 一般为 200—400 mA, 测量范围和灵敏度的稳定性不够理想. 在某些低强度 γ/n 混合辐射场脉冲 γ 射线、X 射线强度测量中, 迫切需要研制线性电流大于 5 A, 辐射灵敏度可达 $\sim 1 \times 10^{-14} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ 、具有 γ/n 分辨能力、灵敏度稳定的新型脉冲 γ 射线强度探测器. 电流型 Si-PIN 探测器是一种结构简单、灵敏度高、时间响应快、线性和测量动态范围大, 对低能中子直照不灵敏且灵敏度稳定的固态探测器^[3,4], 已广泛用于辐射探测, 适用于裂变 n/γ 混合场脉冲 γ 射线强度测量. 我们曾经研制了尺寸为 $\phi 8$ — $\phi 20 \text{ mm}$ 和最大直径为 $\phi 60 \text{ mm}$, 灵敏区厚度为 200—300 μm 的 PIN 探测器^[5]. 这类探测器灵敏体积较小, 在低强度脉冲 γ 射线强度测量中, 有时辐射灵敏度和测量统计性还不能满足要求. 本文采用电阻率为

10000—20000 $\Omega \cdot \text{cm}$ 高阻单晶硅, 在国内研制成功灵敏区面积为 $\phi 60 \text{ mm}$, 全耗尽层厚度达 $\sim 1000 \mu\text{m}$ 的大面积厚 Si-PIN 半导体探测器. 为准确确定该类探测器耗尽层厚度, 设计制作了 20° 专用反冲质子厚度测量靶室系统. 同时对该探测器的漏电流、 γ 灵敏度、时间响应、 γ/n 分辨能力等性能参数进行了测量和分析. 结果表明, 我们研制的大面积厚 PIN 探测器性能稳定, 在 700 V 偏压下, 漏电流小于 40 μA , 其线性电流输出大于 10 A, 可满足低强度脉冲 γ 射线强度测量的要求并已在相关领域获得成功应用. 目前在市场上尚未见相近的商用产品.

2. 探测器的制作

大面积厚 PIN 探测器采用电阻率为 10000—20000 $\Omega \cdot \text{cm}$ 的高阻单晶硅材料制成. 制作中用离子注入法在加工好的硅片两侧重掺磷施主杂质和硼受主杂质, 形成厚度约为 800—1500 \AA n^+ 区薄层和 p^+ 区薄层, 再经清洗、烘干和真空退火处理后进行封装. 最后在 p^+ 区和 n^+ 区的外表面蒸上约 300—800 \AA 的金层, 形成欧姆接触电极. 探测器灵敏区面积为 $\phi 60 \text{ mm}$, 全耗尽厚度约为 1000 μm . 外形结构如图 1 所示.



图 1 制作的大面积厚 PIN 探测器(直径 : $\phi 60$ mm,厚度 : ~ 1000 μm)

3. 探测器的物理性能

3.1. 探测器的漏电流

漏电流大小是衡量 Si-PIN 探测器质量、确定其应用范围的重要参数.我们研制的大面积厚 PIN 探测器漏电流典型值见表 1.它主要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.从表中可知,所列探测器在 700 V 偏压下漏电流小于 40 μA ,能够满足脉冲射线测量要求.

表 1 大面积 PIN 探测器漏电流 (μA) 灵敏区面积为 $\phi 60$)

探测器号	灵敏区厚度/ μm	探测器偏压/V	漏电流/ μA			
			400	500	600	700
3#	958		11	17	25	25
6#	975		18	23	27	38
10#	979		14	16	18	25

3.2. 探测器灵敏区(全耗尽层)厚度的测量

PIN 探测器全耗尽厚度直接影响探测器的辐射灵敏度和测量的统计性,是探测器的主要性能参数之一,必须进行精确的测量.本文采用反冲质子能量沉积谱和特征 X 射线荧光吸收两种方法对 1000 μm 的厚探测器灵敏区厚度进行了测量.

3.2.1. 反冲质子能量沉积谱测量方法

采用高能中子-反冲质子能量沉积谱的厚度测量方法,可精确确定探测器灵敏区厚度并探查灵敏区 Si 材料的内部结构缺陷.其原理是将中子在测量靶室中聚乙烯转换靶上产生的反冲质子在 Si-PIN 中能量沉积谱用多道记录并与理论计算能谱比较,来

确定耗尽层厚度.如果实测谱谱形发生畸变,就说明探测器灵敏区有缺陷.这种厚度测量方法的精度好于 ± 10 μm ,是目前测量 PIN 半导体探测器耗尽层厚度最准确的方法.

对于灵敏区厚为 1000 μm 的 PIN 探测器灵敏区的测量,要求反冲质子能量大于 12 MeV,反冲质子与入射中子的夹角 $\theta \leq 22^\circ$.显然,我们原有 30° , 45° , 60° 反冲质子厚度测量靶室系统均不能满足要求,为此,我们设计了探测器与靶中心质子反冲角为 20° 的专用厚度测量靶室,其原理如图 2 所示.用该靶室系统实测的典型反冲质子能量沉积谱见图 3 和图 4.图 3 是全耗尽情况下的反冲质子能量沉积谱,图 4 是同一探测器全耗尽和非耗尽状态下的反冲质子能量沉积谱.从图中可以看出,耗尽时反冲质子谱后沿没有台阶,在非耗尽状态下,反冲质子谱后沿存在明显台阶.

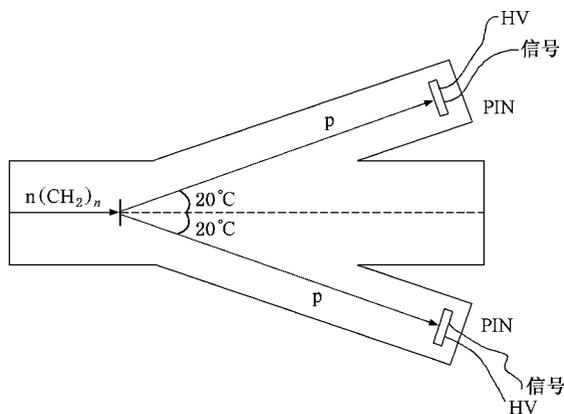


图 2 20°反冲质子厚度测量靶室示意图

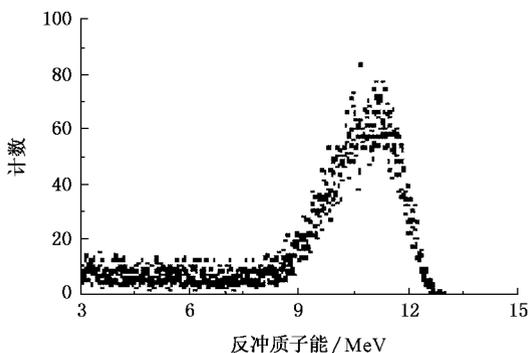


图 3 ~ 1000 μm 探测器耗尽时反冲质子能谱

3.2.2. 特征 X 荧光吸收法

从制作过程知道, PIN 探测器灵敏区厚度与单晶硅片的差别在于离子注入层和电极上的镀金层,

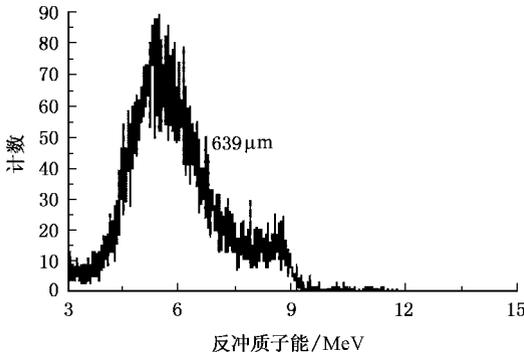


图4 不同耗尽厚度(对应不同偏压)探测器反冲质子沉积能量谱特征:未全耗尽时谱的后沿有明显台阶,随着耗尽厚度的增加,台阶不断提高,全耗尽时,台阶消失

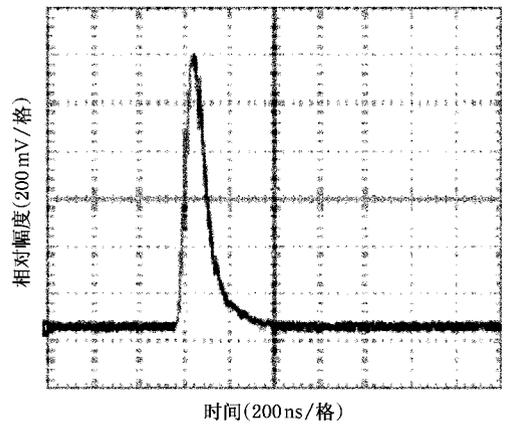


图5 大面积厚 PIN 探测器对脉冲 X 射线的响应波形

其数值一般小于 $1 \mu\text{m}$,因此我们可以用特征 X 射线吸收方法来测量探测器的厚度.但这种测量方法给出的是单晶硅片的物理厚度,不能提供探测器耗尽层内部结构缺陷信息.在探测器硅片无缺陷、制作无缺陷的情况下与反冲质子能谱测量方法能够给出基本相同的结果.表 2 是我们利用特征 X 射线测出的 4 个探测器厚度及其与反冲质子能量沉积谱方法给出的结果的比较,不难看出,它们在不确定度范围内一致.特征 X 射线荧光吸收厚度测量方法的特点是快速、低成本.

表 2 部分探测器灵敏区厚度测量结果比较(探测器灵敏区面积为 $\phi 60 \text{ mm}$)

探测器	A	B	C	D
灵敏区 反冲质子谱方法	990 ± 10	965 ± 10	975 ± 10	970 ± 10
厚度/ μm 特征 X 射线法	991 ± 20	968 ± 20	971 ± 20	967 ± 20

3.3. 探测器的时间响应

探测器的时间响应直接确定其无明显畸变地探测待测脉冲波形的宽度. Si-PIN 探测器对脉冲的时间响应与探测器的耗尽层宽度、电场分布和电场强度、探测器电容、辐射类型和入射方向及环境温度等因素有关,文献^[3,6]给出了理论计算方法.为了获得大面积厚 PIN 探测器对脉冲响应的定量认识,我们在半宽度为 50 ns 的脉冲 X 射线源上对探测器的时间响应进行了测量,测量获得的原始波形见图 5,经数据处理,得到其时间响应半高宽 FWHM $\sim 80 \text{ ns}$,满足 100 ns 的设计要求.根据线性系统对脉冲响应的一般规律,采用这种探测器探测半高宽为其时间响应半高宽 3 倍以上,即半高宽在 240 ns 以上的脉冲 γ 波形,波形形状不会发生明显的畸变.

3.4. 探测器的 γ 灵敏度及 γ/n 分辨能力

探测器的 γ/n 分辨能力及其随中子能量的变化,决定其是否适合在 n/γ 混合场中测量 γ 射线强度,是探测器主要的特性参数之一.

3.4.1. Si-PIN 探测器对中子的直照灵敏度

Si-PIN 探测器对中子的直照响应主要来源于中子与 Si 原子核的弹性散射以及 $^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$, $^{28}\text{Si}(n,\alpha)^{25}\text{Mg}$ 带电粒子反应,这两种反应的阈值分别为 3.86 MeV 和 2.66 MeV ,在中子能量小于 5 MeV 时, Si 原子核反冲占优势.这一作用机理,导致了 Si-PIN 探测器对低能中子的不敏感,可用于裂变中子本底下脉冲 γ 强度的测量.裂变中子能谱与 Watt 谱相近,图 6 是 Watt 谱的分布波形,中子主要分布在 $0-4 \text{ MeV}$,中子能量峰值在 1 MeV 左右,平均能量为 2 MeV .在 $0-4 \text{ MeV}$ 能区,计算得到尺寸为 $\phi 60, 1000 \mu\text{m}$ 的 Si-PIN 探测器的中子的直照灵敏度列于表 3.

表 3 $\phi 60, 1000 \mu\text{m}$ 的 Si-PIN 探测器对中子的直照灵敏度^[3]

中子能量/MeV	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
直照灵敏度/ $\times 10^{-16} \text{ C}\cdot\text{cm}^2$	3.1	4.8	5.7	6.5	7.1	7.6	8.5	11

3.4.2. Si-PIN 探测器的 γ/n 分辨

在电子平衡时,尺寸为 $\phi 60, 1000 \mu\text{m}$ 的 Si-PIN 探测器对 γ 射线的直照灵敏度为 $S_\gamma \cong 7.1 \times 10^{-15} \text{ C}\cdot\text{cm}^2/\text{MeV}$ ^[3].从 PIN 探测器对中子、 γ 射线的直照灵敏度可以了解其在裂变中子能区测量 γ 射线强度时的 γ/n 比,将 PIN 探测器的中子和 γ 直照灵敏度用单位 $\text{C}\cdot\text{cm}^2$,并视辐射场中子平均能量为 2 MeV , γ 射线的平均能量为 1.5 MeV ,则 Si-PIN 探测器在该能区的 γ/n 比值约为 16,其 γ/n 分辨能力可以满足

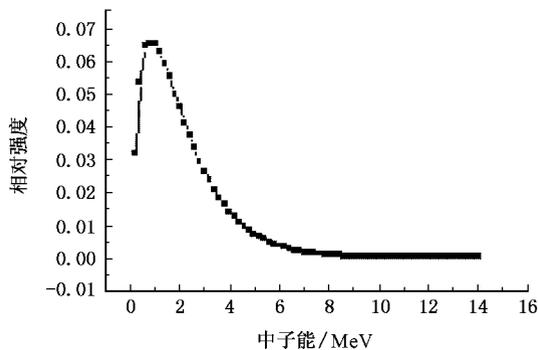


图6 Watt 谱分布

一般裂变 n/γ 混合场脉冲 γ 强度测量的要求。

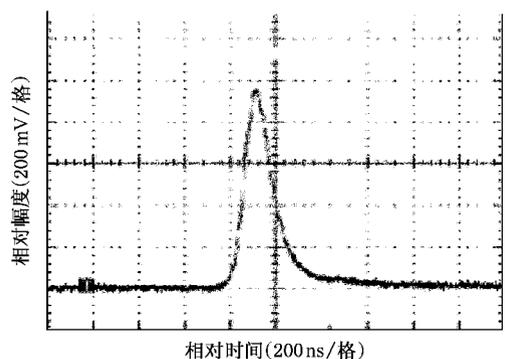
3.5. 探测器物理性能与应用分析

PIN 探测器在脉冲测量时,需要提供反向偏压才能正常工作.探测器的线性电流输出与所加偏压有关.根据文献[3],探测器输出的最大线性电流输出小于所加偏压除以回路负载电阻.因此,要获得大的线性电流输出,应尽量给探测器施加更高的偏压.然而,偏压愈高,探测器的漏电流愈大.由于 Si-PIN 探测器是高阻硅,大的漏电流会使探测器发热,甚至烧毁.Si-PIN 探测器的漏电流通常应小于 $100 \mu\text{A}$ ^[3],且漏电流愈小,探测器性能愈佳.本文研制的大面积 PIN 探测器在 700 V 偏压下,漏电流小于 $40 \mu\text{A}$,外接负载阻抗为 50Ω 时,其最大线性电流 $I_{\text{max}} \leq 14 \text{ A}$,完全满足设计要求.探测器对脉冲的时间响应,实验测量约 80 ns 左右.大面积厚 PIN 探测器主要用于低强度裂变中子、伽马辐射场脉冲伽马信号的探测,这类脉冲辐射场时间宽度通常在微秒量级,采用时间响应小于 100 ns 的 PIN 探测器是较为理想的,不会对波形产生明显的畸变.同时,根据脉冲信号通过线性系统波形面积归一的原理,对于脉冲波形面积测量,其结果不受探测器时间响应的影响.Si-PIN 探测器用于中子、伽马混合辐射场伽马测量时,其 γ/n 分辨取决于混合场中的中子能谱.如果是裂变中子场,其平均能量约 2 MeV,其 γ/n 分辨可达 16,满足

测量精度要求.如果是聚变中子场,其 γ/n 分辨约为 0.5,无法实现 γ/n 分辨.不过,对于聚变中子辐射场,其脉冲宽度一般小于 20 ns,伽马射线和聚变中子束通常可以通过飞行时间进行分离,伽马射线先期到达,因而不会受到聚变中子的干扰.直径 $\phi 60 \text{ mm}$ 灵敏区厚度 $\sim 1000 \mu\text{m}$ 的大面积厚 PIN 探测器灵敏体积是原有直径为 $\phi 20 \text{ mm}$,灵敏区厚度 $\sim 250 \mu\text{m}$ 的 PIN 探测器灵敏体积的 36 倍,因而其探测灵敏度和测量统计性都得到明显提高,适合于低强度微秒级脉冲伽马波形面积的测量.

4. 结 论

研制的灵敏区厚度为 $1000 \mu\text{m}$ 的 PIN 探测器,比传统的薄型 PIN 探测器对工艺和材料有更高的要求.根据灵敏区厚度及其他性能参数测量结果,我们研制成功直径为 $\phi 60 \text{ mm}$,灵敏区厚度约为 $1000 \mu\text{m}$ 的大面积厚 Si-PIN 探测器,并建立了反冲质子厚度测量系统,对其灵敏区厚度、漏电流、 γ/n 分辨等性能进行了测量和分析.该探测器已用于裂变 n/γ 混合场中测量脉冲 γ 强度信号,测得的典型波形如图 7 所示.该类探测器不仅明显提高了探测效率和测量的统计性,而且灵敏度稳定,测量动态范围宽,在低强度脉冲 γ 射线测量中显示出特有的优越性.

图7 典型的脉冲 γ 实测波形

- [1] Fewell T R 1972 Compton Diodes: Theory and Development for Radiation Detectors (SC-DR-72 0118)
- [2] Ebert P, Lauzon A F 1967 Rev. Sci. Instr **38** 1747
- [3] Kuckuck. R W 1971 Semiconductor Detectors for use in the current Mode (UCRL-51011)
- [4] Ouyang X P, Li Z F, Wang Q S et al 2005 Acta. Phys. Sin. **54** 179 (in Chinese)[欧阳晓平、李真富、王群书等 2005 物理学

报 **54** 179]

- [5] 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]
- [6] Huang B 1981 Experiment and Research 1-2, 30 (in Chinese)[黄豹 1981 实验与研究 1-2, 30]

$\phi 60, 1000 \mu\text{m}$ Si-PIN Detectors for pulsed γ flux measurement

Ouyang Xiao-Ping¹⁾²⁾ Li Zhen-Fu²⁾ Ho Yu-Kun³⁾ Song Xiang-Cai⁴⁾

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*)

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

(Received 12 September 2005 ; revised manuscript received 8 August 2006)

Abstract

Using high-resistivity (10000—20000 $\Omega \cdot \text{cm}$) n-type Si wafers ,we have developed $\phi 60$ PIN semiconductor detector with depletion thickness ~ 1000 microns for low-intensity pulsed γ -ray flux measurement. For determination of thickness of the depletion depths , a recoil proton chamber with 20° scattering angle has been constructed. The detector 's performance have been measured and analyzed ,which indicates that the developed detector satisfactorily meets the expected specifications. Compared with the existing detectors with depletion depths of 200—300 microns ,the detector has much greater γ detecting sensitivity and suited for measuring pulsed γ -ray flux in low-intensity mixed γ/n fields.

Keywords : large area PIN detector , current mode , semiconductor detector

PACC : 2940P