

# 高性能 PIN-硅探测器的研制及其在高能放射性核束实验中的应用测试\*

陈翠红 李占奎 王秀华 李荣华 方芳 王柱生 李海霞†

(中国科学院近代物理研究所, 核探测器研究室, 兰州 730000)

(2023 年 2 月 15 日收到; 2023 年 4 月 18 日收到修改稿)

鉴于国内核物理实验对高性能硅探测器有大量需求, 而国外对中国进行技术封锁, 满足实验需求的高性能探测器不易获得. 中国科学院近代物理研究所在原有制备工艺基础上首次采用套刻技术, 有效减少了光刻及腐蚀过程造成的  $\text{SiO}_2$  沾污, 大幅提高了探测器性能和成品率. 本文对采用该工艺研制的  $300\ \mu\text{m}$  厚, 有效面积  $50\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$  硅探测器进行电学性能测试和在束探测性能测试. 探测器在  $-45\ \text{V}$  耗尽电压下, 其漏电流小于  $40\ \text{nA}$ , 对  $5\ \text{MeV}$  左右的  $\alpha$  粒子的能量分辨 ( $\sigma$ ) 约为  $45\ \text{keV}$ . 将该探测器作为能量沉积 ( $\Delta E$ ) 探测器, 利用  $250\ \text{MeV/u}$  的  $^{12}\text{C}$  放射性束流及其在次级碳靶上的反应产物对探测器进行了探测性能测试. 测试结果显示, 该探测器对于 C 元素的电荷数  $Z$  的分辨为  $0.17$ , 与文献中记录的国外生产的同类型探测器的实验数据 ( $Z$  分辨  $0.19$ ) 相当, 可以满足中高能放射性束实验对轻质量区粒子鉴别的要求.

**关键词:** 硅探测器, 套刻技术, 漏电流, 电荷数分辨**PACS:** 29.40.-n, 29.40.wk**DOI:** 10.7498/aps.72.20230213

## 1 引言

放射性核束物理是当前核物理研究前沿领域之一<sup>[1]</sup>. 放射性束流产生装置主要有飞行中放射性束分离装置 (in-flight separator)<sup>[2]</sup> 和在线同位素分离装置 (ISOL) 两种类型<sup>[3,4]</sup>. 国际上大部分实验室采用飞行中分离装置产生放射性束, 飞行中分离装置主要提供几十  $\text{MeV/u}$  到  $1\ \text{GeV/u}$  的中高能重离子放射性束流. 兰州重离子研究装置 (HIRFL) 上的放射性束装置 RIBLL1<sup>[5]</sup> 和 RIBLL2<sup>[6,7]</sup> 是国内仅有的两台飞行中分离装置, RIBLL1 可以提供几十  $\text{MeV/u}$  的中能放射性束流, RIBLL2 则可以提供大于  $200\ \text{MeV/u}$  的高能放射性束流. 中高能放射性束的粒子鉴别及其在次级靶上的反应产物的鉴别主要采用  $B\rho$ - $\Delta E$ -TOF(磁刚度-电离能损-

飞行时间) 方法<sup>[8]</sup>. 根据电离能损  $\Delta E$  与粒子电荷数  $Z$ 、速度  $v$  的关系式:  $\Delta E \propto Z^2/v^2$ , 利用  $\Delta E$  结合 TOF 测量可以用来鉴别粒子的电荷数  $Z$ . 由于高能放射性束在次级靶上的类弹反应产物速度展宽较小,  $v$  近似恒定值, 因此仅利用  $\Delta E$  信息 ( $\Delta E \propto Z^2$ ) 即可实现  $Z$  的鉴别.

由于飞行中分离装置产生的中高能放射性束具有较大的束斑 (直径  $> 1\ \text{cm}$ ), 中高能放射性束实验中用到的  $\Delta E$  探测器一般需要较大的灵敏面积. 中高能放射性束实验中目前最常用的  $\Delta E$  探测器是电离室探测器和硅探测器. 硅探测器具有良好的能量分辨, 但存在较严重的重离子辐射损伤, 使用寿命较短. 与硅探测器相比, 电离室探测器拥有良好能量分辨的同时, 不存在辐射损伤问题. 但电离室探测器外壳尺寸较大, 且需要配气系统, 因此在探测区域狭窄的实验中较难应用; 而具有相同灵敏

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11775283, 12005267, 12275330) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lihaxia@impcas.ac.cn

面积的硅探测器外壳尺寸较小,更适合在探测空间紧张的探测系统中使用.

目前中国科学院近代物理研究所<sup>[9]</sup>、北京大学<sup>[10]</sup>、中国原子能科学研究院<sup>[11]</sup>和中国科学院高能物理研究所<sup>[12]</sup>等均开展了硅基半导体探测器的研制工作.且近年来随着我国先进半导体工艺技术的发展,国产硅探测器的性能也得到了大幅改善,已有部分探测器应用于核物理实验中,但在对硅探测器性能要求较高的领域,硅探测器主要还是采用进口设备,其价格昂贵,订货周期长(半年以上),易损耗,导致供需矛盾突出.鉴于此,中国科学院近代物理研究所自主研制了中高能放射性束实验所需的高性能硅探测器,并成功应用于 RIBLL2 外靶实验中,实现了电荷数  $Z$  的鉴别.本文重点介绍了面积  $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ ,厚度  $300\text{ }\mu\text{m}$  方硅探测器的研制工艺,并通过束流实验测试了其对电荷数  $Z$  的分辨能力.

## 2 硅探测器的研制

### 2.1 结构及工作原理

硅基探测器及其相关半导体探测器都是以 p-n 结为基础制成的,根据 p-n 结结构形式的不同,一般可分为:  $p^+-n-n^+$ ;  $p^+-p-n^+$ ;  $n^+-n-p^+$ ;  $n^+-p-p^+$  等 4 种形式,硅探测器制备中较多采用  $p^+-n-n^+$  结构.本文研制的探测器即采用此结构,该结构探测器由高掺杂的  $p^+$  层和  $n^+$  层以及 n 型本征区 (i 区) 组成,所以称为 PIN-硅探测器.如图 1(a) 所示  $p^+$  掺杂的结面和  $n^+$  掺杂的欧姆面构成了 p-n 结的基本结构,探测器四周有宽  $200\text{ }\mu\text{m}$ ,间距  $100\text{ }\mu\text{m}$  的三道保护环,起屏蔽保护作用,可有效降低探测器噪声<sup>[12]</sup>.掺杂区中间的高阻 n 型硅基就是探测器的灵敏区,加足够大反向偏压时,耗尽层可扩展至整个 n 型硅片,此时探测器处于全耗尽状态,同时在电阻率很高的耗尽层形成很强的电场.当带电粒子穿过硅探测器灵敏区时损失能量,产生电子-空穴对.在强电场的作用下,电子向  $n^+$  面漂移,空穴向加负偏压的  $p^+$  面漂移,由于电子和空穴的迁移率很高,于是很快就可以在探测器的  $p^+$  面收集到该运动产生的电荷信号,该信号经过前放、主放大后进入数据获取系统,再对数据进行进一步分析处理,就可得到入射粒子的能损信息<sup>[13]</sup>.

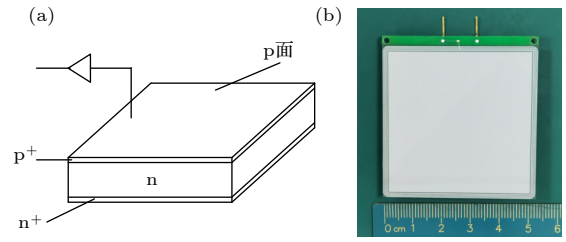


图 1 (a) 探测器  $p^+-n-n^+$  结构示意图; (b) 封装好的探测器实物图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of  $p^+-n-n^+$  structure of detector; (b) picture of silicon detector assembled in a readout board.

### 2.2 制备工艺

研制探测器选用的材料是从中国电子科技集团公司第四十六研究所购置的国产双抛  $4\text{ in}$  ( $1\text{ in} = 2.54\text{ cm}$ ) 标准优质高阻 n 型硅片,厚  $300\text{ }\mu\text{m}$ ,电阻率  $8000\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ . 研制工艺主要采用了钝化保护离子注入平面工艺,  $\text{SiO}_2$  层既作为注入掩模又构成了对结周围的钝化保护,且制备的探测器漏电流小,死层薄<sup>[14]</sup>.

主要工艺流程为: 1) 表面氧化 ( $\text{SiO}_2$  层厚度约  $700\text{ nm}$ ); 2) 光刻探测器结面扩散区窗口; 3) 在窗口进行 B<sup>+</sup> 离子注入 (能量  $40\text{ keV}$ , 剂量  $4\times 10^{14}\text{ ions/cm}^2$ ), 形成  $p^+$  区, 并退火; 4) 背面磷离子注入 (能量  $60\text{ keV}$ , 剂量  $1\times 10^{15}\text{ ions/cm}^2$ ), 形成  $n^+$  区, 并退火; 5)  $p^+$ ,  $n^+$  面磁控溅射制备金属电极 ( $p^+$  面为  $80\text{ nm}$  厚的铝电极,  $n^+$  面依次溅射  $100\text{ nm}$  厚的钛镍银作为背电极); 6) 封装. 通过超声波自动绑线机从铝电极焊接硅铝丝到印制电路 (PCB) 板, 用于引出信号. 封装好的探测器实物如图 1(b) 所示.

工艺改进: 光刻过程中, 光刻胶的残留会导致腐蚀不彻底, 使芯片有效区域内出现沾污, 图 2(a) 红色区域就是显微镜下看到的未完全腐蚀的  $\text{SiO}_2$ , 这些  $\text{SiO}_2$  沾污会阻碍后续的离子注入, 从而导致探测器芯片电学性能变差甚至失效. 本文探测器制备过程采用了套刻技术, 具体如图 2(b) 所示, 设计了两套补刻版, 左侧图形为补刻版 1, 右侧图形为补刻版 2. 光刻注硼区工艺完成后进行镜检, 如有  $\text{SiO}_2$  残留, 则使用补刻版 1 进行补刻, 补刻版 1 相比注硼版内缩  $5\text{ }\mu\text{m}$ . 补刻完成后再次镜检, 无残留则进行下一步工艺, 有残留则使用补刻版 2 再次补刻, 补刻版 2 相比注硼版内缩  $10\text{ }\mu\text{m}$ . 实验证明两次套刻后可以有效减少光刻胶残留, 大幅提高探测器的性能及成品率.

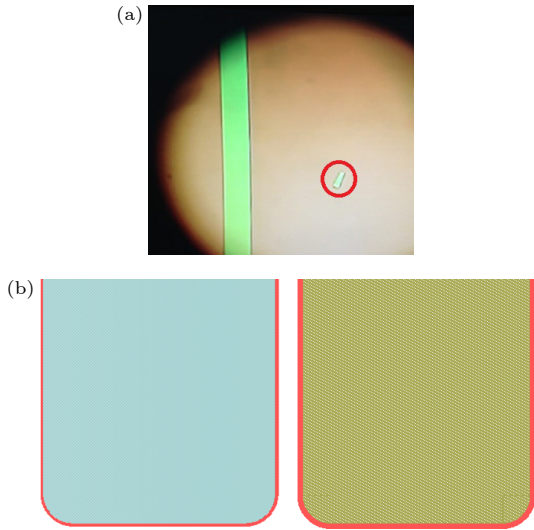


图 2 (a) 显微镜下  $\text{SiO}_2$  沾污照片; (b) 补刻版示意图  
 Fig. 2. (a) Photos of  $\text{SiO}_2$  contamination under microscope; (b) schematic diagram of supplementary photomask.

### 2.3 漏电流和结电容

探测器的漏电流是探测器噪声的主要来源, 它直接影响到对射线测量时能量分辨的好坏和灵敏度的高低. 所以其是一个快速的、有效的鉴定工艺、判断成品质量的方法, 也是探测器的重要指标之一. 探测器的结电容越小, 输出信号的幅度就越大, 信噪比就越高, 因此探测器 p-n 结的结电容也是探测器重要参数之一 [14].

本文使用吉时利 S530 半导体参数测试仪, 在恒温恒湿 (温度  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , 湿度 50%) 的洁净间, 对新研制的硅探测器 (IMPSD25-300) 的电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 和结电容 ( $C$ - $V$ ) 特性进行测试, 并与从英国 Micron Semiconductor 公司购买的一块同类型硅探测器 (MSX25-300) 的测试结果进行对比.

根据有效掺杂浓度与全耗尽电压的理论计算公式 [15], 新研制的探测器的全耗尽电压为  $-45\text{ V}$ . 从图 3(a) 所示  $C$ - $V$  曲线可以看出, IMPSD25-300 在  $-45\text{ V}$  以后趋于平稳, 此时耗尽层厚度几乎为探测器厚度, 表明探测器已经全部耗尽, 耗尽电压与理论计算一致; MSX25-300 的全耗尽电压在  $-25\text{ V}$  左右, 这是因为  $d \propto (\rho V)^{1/2}$  ( $d$  为耗尽层厚度,  $\rho$  为硅材料电阻率,  $V$  为全耗尽电压), 在耗尽层厚度相同的情况下, 硅材料电阻率越大, 全耗尽电压就越低, 国外研制硅探测器使用的硅材料的电阻率一般比国产硅材料的高. 另外,  $C$ - $V$  测试数据同时也给出了 IMPSD25-300 在全耗尽电压下的结电

容约为  $840\text{ pF}$ , 和理论公式 [16] 计算结果 ( $833\text{ pF}$ ) 基本一致; MSX25-300 在全耗尽电压下的结电容约  $890\text{ pF}$ , 这由硅材料的电阻率和工作时的反向偏压大小决定.

图 3(b) 给出了两个探测器的  $I$ - $V$  特性曲线. 数据显示, MSX25-300 在  $-25\text{ V}$  全耗尽电压下的漏电流约  $38\text{ nA}$ , IMPSD25-300 在  $-45\text{ V}$  全耗尽电压下的漏电流约  $37\text{ nA}$ . 测试结果说明, 新研制的硅探测器与国外购买的同类型硅探测器在全耗尽电压下工作时的漏电流参数相当, 可以满足核物理实验对漏电流参数的基本要求.

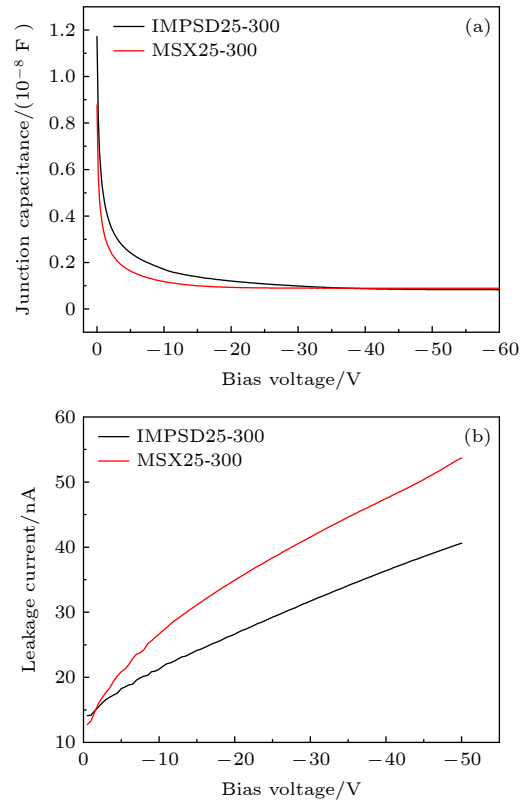


图 3 探测器的  $C$ - $V$  特性曲线 (a) 和  $I$ - $V$  特性曲线 (b)  
 Fig. 3. (a)  $C$ - $V$  characteristic curves and (b)  $I$ - $V$  characteristic curves of detector.

### 3 实验测试方案

实验选用 3 套新研制的硅探测器 (标记为 Si1, Si2, Si3), 其灵敏面积均为  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ , 厚度约为  $300\text{ }\mu\text{m}$ , 耗尽电压下的漏电流均小于  $40\text{ nA}$ . 为了检验新研制的硅探测器的探测性能, 分别利用三组分  $\alpha$  放射源 ( $^{239}\text{Pu}$ -5.155 MeV,  $^{241}\text{Am}$ -5.486 MeV,  $^{244}\text{Cm}$ -5.805 MeV) 和  $250\text{ MeV/u}$  的  $^{12}\text{C}$  放射性束流对这 3 套新研制的硅探测器进行性能测试.

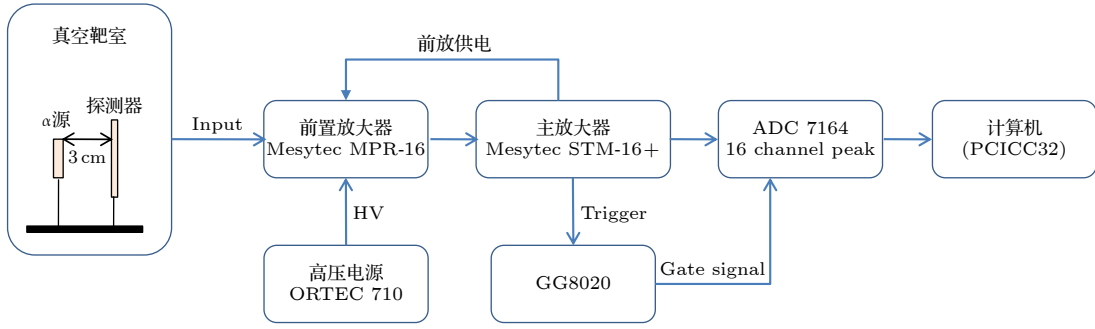


图 4  $\alpha$  源测试原理框图

Fig. 4. Test principle structure diagram with  $\alpha$  source.

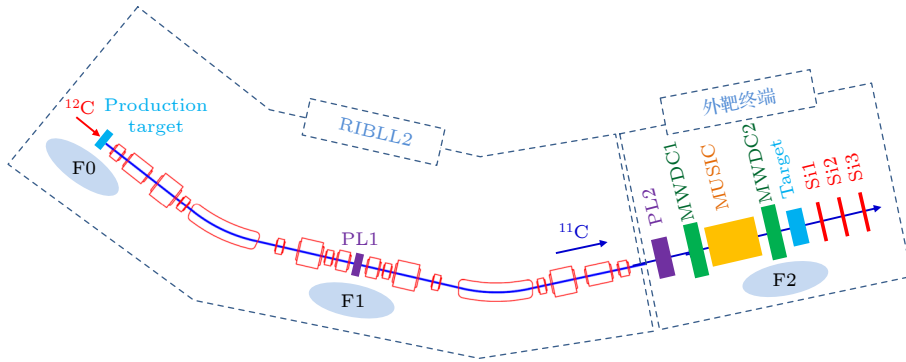


图 5 在束测试实验探测器布局图

Fig. 5. Layout of the detector setup in the beam test experiment.

利用  $\alpha$  源对硅探测器测试的原理图如图 4 所示. 分别将每套硅探测器放置于真空度小于  $1 \times 10^{-2}$  mbar ( $1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$ ) 的真空靶室内, 放射源距探测器约 3 cm, ORTEC 710 通过前置放大器 mesytec MPR-16 给硅探测器 p 型读出面施加  $-45 \text{ V}$  偏压 (全耗尽状态下工作), 探测器欧姆面接地. 探测器产生的信号脉冲经前置放大器先行放大后, 再经过 mesytec STM-16+ 主放大器放大成形, 成形时间  $2 \mu\text{s}$ , 输出信号通过 Phillips Scientific 7164 ADC 进行模数转换. Mesytec STM-16+ 主放大器输出的 trigger 信号经 ORTEC GG8020 延迟展宽后作为门信号接入 ADC. CAMAC 数据获取系统采用 PCICC32 控制卡, 通过光纤接入计算机.

在束测量是在兰州重离子研究装置上开展的. 首先利用同步加速器 CSRm 将  $^{12}\text{C}$  初级束流加速至  $290 \text{ MeV/u}$ , 束流引出后在 RIBLL2 入口轰击  $15 \text{ mm}$  厚  $^9\text{Be}$  初级靶, 产生包含  $^{11}\text{C}$  在内的能量为  $250 \text{ MeV/u}$  的 cocktail 放射性束, 通过 RIBLL2 将次级束流分离纯化后送至 CSR 外靶实验终端开展测试实验. 在束测试实验相关探测器布局如图 5 所示. 为了对 cocktail 放射性束流进行粒子鉴别,

在 RIBLL2 束线 F1 处和外靶终端处各放置一套塑料闪烁体探测器 (PL1 和 PL2), 用于测量粒子在 RIBLL2 中的飞行时间. 此外, PL2 还用于提供获取系统的触发信号. PL2 后面放置一套多次取样电离室 (MUSIC)<sup>[17]</sup>, 用于结合 RIBLL2 中的飞行时间鉴别次级束流  $^{11}\text{C}$ . MUSIC 下游放置两套灵敏面积均为  $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  多丝漂移室 (MWDC1 和 MWDC2), 用于测量束流径迹, 在离线分析中限制束斑大小. 多丝漂移室的下游是次级反应靶的位置. 实验分别进行了有靶和空靶测量进行对比. 反应靶为直径  $5 \text{ cm}$ 、厚度  $900 \text{ mg/cm}^2$  的碳材料. 探测区域的最下游同时放置了待测的 Si1, Si2, Si3 三套方硅探测器, 每相邻两套硅探测器的间隔距离为  $10 \text{ mm}$ .

## 4 测试结果及分析

Si1—Si3 探测器的  $\alpha$  源测试结果如图 6 所示. 3 套探测器的分辨能力相似, 可以将放射源的 3 个峰进行清晰的鉴别. 3 套探测器对能量为  $5.155 \text{ MeV}$  的  $\alpha$  粒子的分辨 ( $\sigma$ ) 分别为  $45 \text{ keV}$  (0.87%),  $45 \text{ keV}$  (0.87%),  $41 \text{ keV}$  (0.80%).

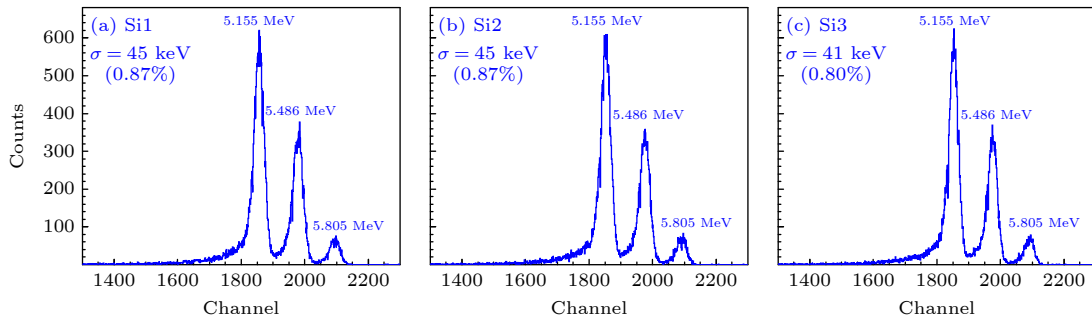


图 6 Si1—Si3 探测器的三组分  $\alpha$  源测试能谱

Fig. 6. Energy spectra for Si1—Si3 detectors measuring three component  $\alpha$  source.

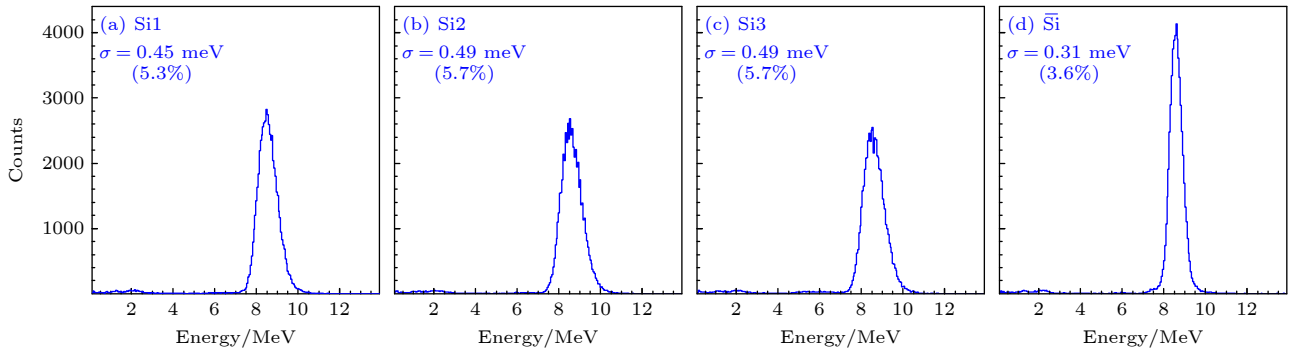


图 7 (a)—(c) 分别为 250 MeV/u 的  $^{11}\text{C}$  打靶后在 Si1—Si3 探测器上的沉积能量分布; (d) 为 Si1—Si3 沉积能量加和求平均后的分布 (所有能谱已标定)

Fig. 7. (a)—(c) Spectra for the energy deposition on Si1—Si3 detectors for 250 MeV/u  $^{11}\text{C}$  reaction products after the target; (d) spectrum for the average energy deposition on Si1—Si3 detectors for 250 MeV/u  $^{11}\text{C}$  reaction products after the target (the above spectra are already calibrated).

利用 250 MeV/u 的  $^{11}\text{C}$  束流轰击碳靶后在 Si1—Si3 探测器上沉积能量单谱如图 7(a)—(c) 所示. 基于 LISE++ 计算可知, 每套硅探测器上沉积能量约为 8.6 MeV. 可以看出, 3 套硅探测器测到的能谱均呈现较好的高斯形分布. Si1—Si3 探测器的能量分辨 ( $\sigma$ ) 分别为 0.45 MeV (5.3%), 0.49 MeV (5.7%), 0.49 MeV (5.7%). 每个束流粒子在 Si1—Si3 探测器上沉积能量加和求平均后的能谱如图 7(d) 所示, 其能量分辨为 0.31 MeV (3.6%), 该值高于任何一套硅探测器单独的能量分辨. 这一结果是由束流穿过探测器沉积能量的涨落特性导致的.  $^{11}\text{C}$  束流穿过越薄的探测器沉积能量的相对涨落率就越大. Si1—Si3 探测器沉积能量的加和平均相当于将 3 套探测器组合成一个约 900  $\mu\text{m}$  厚度的探测器, 因此其沉积能量涨落率会小于 3 个独立探测器中的任何一个的涨落率.

在束测试中, 还对比了有靶和空靶情况下 Si1—Si3 探测器的响应, 如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 在空靶的情况下束流在硅探测器上的沉积能量比

有靶情况下约减小 0.3 MeV. 这是由于束流的速度越大, 能损越小. 在有靶的情况下, 束流粒子穿过靶后速度有所减小, 因此在硅探测器上的能损比空靶时稍大.

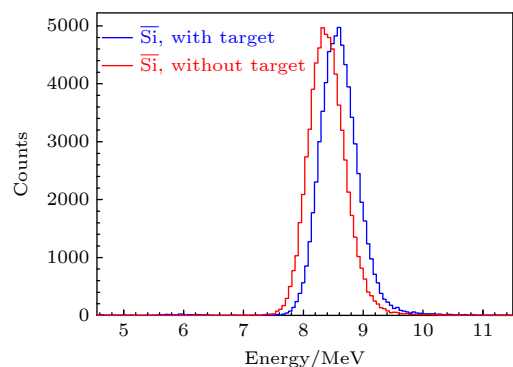


图 8 有靶 (蓝色) 和空靶 (红色) 情况下 250 MeV/u 的  $^{11}\text{C}$  在 Si1—Si3 探测器上沉积能量加和平均后的分布

Fig. 8. Spectrum for the average energy deposition on Si1—Si3 detectors for 250 MeV/u  $^{11}\text{C}$  with target (blue) and without target (red).

进一步分析了  $^{11}\text{C}$  束流测试中任意两套硅探测器上沉积能量的二维关联谱, 结果如图 9 所示.

从图 9 可以看出, 大部分数据点分布在  $y = x$  直线附近, 说明束流粒子在 3 套硅探测器上的响应一致. 此外, 沟道效应在二维谱上得到了很好的呈现. 硅探测器由单晶硅制成, 其晶格原子呈现规则的几何排列. 当束流粒子沿着探测器的晶轴或晶面方向入射时, 与硅原子碰撞的截面变小, 使得束流粒子在探测器中沉积的能量明显变小, 带电粒子与探测器中硅原子相互作用时呈现的这种方向效应称为沟道效应<sup>[18]</sup>. 同 Si1 和 Si2 探测器相比, Si3 探测器的沟道效应更加明显, 如图 9(b) 和图 9(c) 中的红圈包含部分所示. 通过改变硅探测器摆放位置, 使束流粒子入射方向晶轴或晶面的夹角尽可能大于临界角, 可以避免或减小沟道效应带来的影响. 此外, 通过不同硅探测器之间的二维关联谱可以很好地鉴别受到沟道效应影响的事件并去除, 以降低能谱的本底、提高能谱的分辨率<sup>[19]</sup>.

根据  $\Delta E \propto Z^2/v^2$  关系, 并基于速度  $v$  为近似恒定值, 可以将沉积能量转换为粒子的电荷数  $Z$ , 从而实现粒子的  $Z$  鉴别. 图 10 展示了 Si1—Si3 探

器的  $Z$  鉴别谱. Si1—Si3 对于  $Z = 6$  的分辨 ( $\sigma$ ) 分别为 0.16(2.7%), 0.17(2.8%), 0.17(2.8%). 文献 [20] 在外靶终端类似的条件下测试了一片 300  $\mu\text{m}$  的滨松公司生产的方硅探测器, 其对  $Z = 6$  的分辨为 0.19, 与本工作研制的硅探测器的分辨相近.

通过 Si1—Si3 探测器平均沉积能量刻度后得到的  $Z$  的分辨为 0.11(1.8%). 由于受沟道效应影响, Si1—Si3 中任何一个探测器都很难清楚地将硼同位素产物 ( $Z = 5$ ) 同未发生反应的  $^{11}\text{C}$  ( $Z = 6$ ) 区分开, 如图 10(a)—(c) 所示. 而通过不同硅探测器间的二维关联谱扣除沟道效应事件后, 并利用 3 套硅探测器的平均能量刻度后的  $Z$  鉴别谱就可以清楚地鉴别出  $Z = 5$  的 B 同位素产物, 如图 10(d) 所示.

在有靶和空靶情况下出射粒子  $Z$  的分布对比如图 11 所示. 从图 11 可以看出, 在空靶情况下大部分计数分布在  $Z = 6$  附近, 即  $Z < 6$  的区域计数分布较少,  $Z < 6$  的事件主要是束流在探测器等材料上发生反应产生的本底. 在有靶情况下  $Z = 5$  处

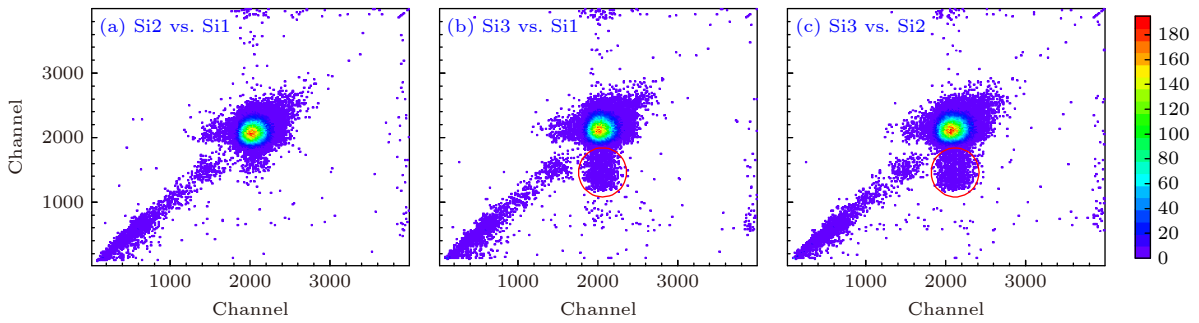


图 9 250 MeV/u 的  $^{11}\text{C}$  打靶后在 Si1—Si3 探测器沉积能量的二维关联图

Fig. 9. Two-dimensional correlation spectrum for the energy deposition on Si1—Si3 detectors for 250 MeV/u  $^{11}\text{C}$  with target.

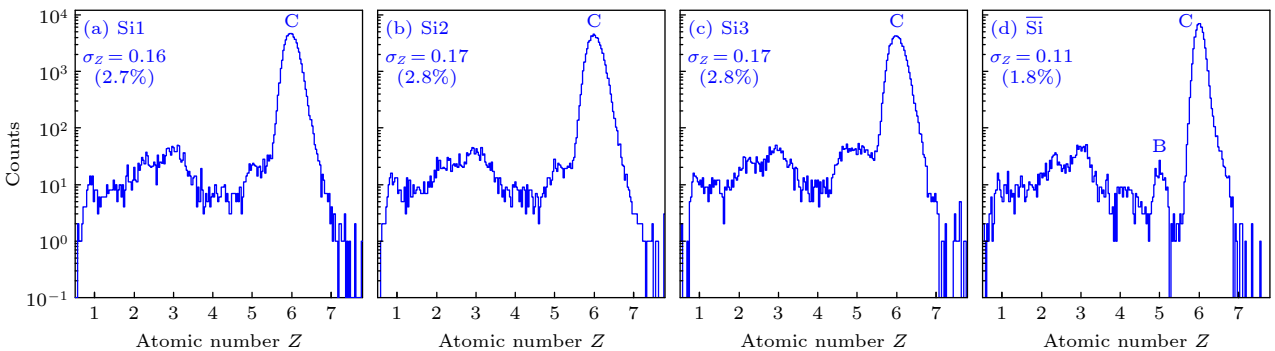


图 10 (a)—(c) 基于 250 MeV/u 的  $^{11}\text{C}$  打靶后在 Si1—Si3 探测器沉积的能量得到的粒子电荷数  $Z$  的分布; (d) Si1—Si3 探测器沉积能量加和平均后得到的粒子电荷数  $Z$  的分布图 (已刻度)

Fig. 10. (a)—(c) Distribution of atomic number  $Z$  deduced from the energy deposition on Si1—Si3 detectors for 250 MeV/u  $^{11}\text{C}$  reaction products after target; (d) distribution of atomic number  $Z$  deduced from the average value of the energy deposition on Si1—Si3 detectors (calibrated).

有明显的峰, 在  $Z \leq 4$  的区域分布较为连续.  $^{11}\text{C}$  在靶上发生反应产生的 B 元素粒子属于擦边碰撞, 仅有一个质子和若干中子从  $^{11}\text{C}$  核中去除, 因此在硅探测器除了有 B 粒子的沉积能量外, 仅有一个质子 (来自弹核碎裂产物) 会在 Si 探测器上沉积能量. 根据  $\Delta E \propto Z^2/v^2$ , 质子 ( $Z = 1$ ) 在硅探测器上的沉积能量远小于 B 粒子 ( $Z = 5$ ) 在 Si 探测器上的沉积能量, 且质子的出射角会比较分散, 大散射角的质子不会进入硅探测器探测范围. 因此, B 反应产物的  $\Delta E$  信息受到的干扰较小,  $\Delta E$  信息可以准确用来鉴别 B 同位素. 对于  $^{11}\text{C}$  反应产生  $Z \leq 4$  核素的情况, 随着碰撞参数逐渐变小, 碰撞碎片数量就越多, 较多的弹核及靶核碎裂产物会进入到硅探测器上, 因此粒子鉴别谱上  $Z \leq 4$  的区域呈现复杂的连续谱结构.

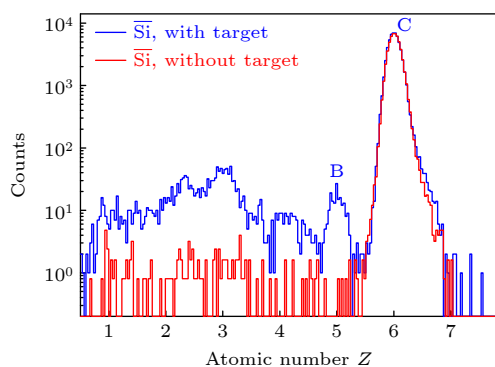


图 11 有靶 (蓝色) 和空靶 (红色) 情况下 250 MeV/u 的  $^{11}\text{C}$  在 Si1—Si3 探测器上的 Z 鉴别图

Fig. 11. Distribution of atomic number  $Z$  for 250 MeV/u  $^{11}\text{C}$  on Si1—Si3 detectors with target (blue) and empty target (red).

## 5 结 论

本文对采用新工艺研制的  $300\ \mu\text{m}$  厚、有效面积  $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$  的硅探测器进行了电学性能 (耗尽偏压、结电容、反向漏电流) 和探测性能 (能量分辨、电荷数  $Z$  分辨) 测试. 该探测器在全耗尽偏压下的漏电流小于  $40\ \text{nA}$ , 对从结面入射的能量约为  $5\ \text{MeV}$  的  $\alpha$  粒子的能量分辨 ( $\sigma$ ) 为  $45\ \text{keV}$  ( $0.87\%$ ). 本文还对新研制的 3 套硅探测器组成的阵列开展了基于  $250\ \text{MeV/u}$  能量的  $^{11}\text{C}$  放射性束的在束测试实验. 实验结果显示, 通过 3 个探测器之间的二维关联谱扣除沟道效应事件后, 探测器对 C 元素的电荷数分辨可达  $0.11$ , 可以清楚地对

反应产物 B 元素进行粒子鉴别. 束流实验结束后对使用过的这 3 套硅探测器进行多次漏电流测试, 数据未发生明显变化. 综上所述, 中国科学院近代物理研究所自主研制的硅探测器漏电流小, 能量分辨高, 且电学性能稳定, 可以满足中高能放射性束实验对  $\Delta E$  探测器性能参数的要求, 缓解了国内对高性能硅探测器的供需矛盾. 目前中国科学院近代物理研究所已经为所内外各大核物理实验研究组研制了许多不同规格的硅探测器, 性能也得到一致认可. 但受工艺条件等的限制, 研制的探测器一般为常规厚度 ( $100\text{—}1000\ \mu\text{m}$ ). 关于超薄注入型硅探测器的研制, 北京大学<sup>[21]</sup> 和中国原子能科学研究院<sup>[22]</sup> 都曾发表过相关专利, 但国产大面积超薄 PIN 探测器成品一直未见研制成功并应用于核物理实验中. 近年来, 随着大面积 PIN 型超薄硅探测器在核物理领域及核天体、核医学等领域正得到越来越广泛的应用, 厚度在  $100\ \mu\text{m}$  以下, 甚至  $40\ \mu\text{m}$  以下的大面积超薄硅探测器也成为国内硅探测器研究的重点.

## 参考文献

- [1] Tanihata I 2016 *Eur. Phys. J. Plus* **131** 90
- [2] Nakamura T, Sakurai H, Watanabe H 2017 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **97** 53
- [3] Cui B Q, Tang B, Ma Y J, Ma R G, Chen L H, Huang Q H, Ma X 2019 *Atom. Ener. Sci. Tech.* **53** 1572 (in Chinese) [崔保群, 唐兵, 马鹰俊, 马瑞刚, 陈立华, 黄青华, 马燮 2019 *原子能科学技术* **53** 1572]
- [4] Zeng S, Liu W P, Ye Y L, Bei Jing ISOL team 2019 *Atom. Ener. Sci. Tech.* **53** 2321 (in Chinese) [曾晟, 柳卫平, 叶沿林, 北京ISOL团队 2019 *原子能科学技术* **53** 2321]
- [5] Sun Z, Zhan W L, Guo Z Y, Xiao G, Li J X 2003 *Nucl. Instrum. Meth. A* **503** 496
- [6] Zhan W L, Xu H S, Xiao G Q, Xia J W, Yuan Y J, HIRFL-CSR Group 2010 *Nucl. Phys. A* **834** 694c
- [7] Fang F, Tang S W, Wang S T, Zhang X H, Sun Z Y, Yu Y H, Yan D, Jin S Y, Zhao Y X, Ma S B, Zhang Y J 2022 *Nucl. Phys. Rev.* **39** 65 (in Chinese) [方芳, 唐述文, 王世陶, 章学恒, 孙志宇, 余玉洪, 阎铎, 金树亚, 赵亦轩, 马少波, 张永杰 2022 *原子核物理评论* **39** 65]
- [8] Ahn D S, Amano J, Baba H, Fukuda N, Geissel H, Inabe N, Ishikawa S, Iwasa N, Komatsubara T, Kubo T, Kusaka K, Morrissey D J, Nakamura T, Ohtake M, Otsu H, Sakakibara T, Sato H, Sherrill B M, Shimizu Y, Sumikama T, Suzuki H, Takeda H, Tarasov O B, Ueno H, Yanagisawa Y, Yoshida K 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 212502
- [9] Li R, Wang X, Li H, Chen C, Zu K, Hu R, Zhao C, Li Z 2019 *JINST* **14** C05020
- [10] Zou H, Chen H F, Zou J Q, Ning B J, Shi W H, Tian D Y, Zhang L 2007 *Nucl. Elec. and Det. Tech.* **27** 170 (in Chinese) [邹鸿, 陈鸿飞, 邹积清, 宁宝俊, 施伟红, 田天宇, 张录 2007 *核电子学与探测技术* **27** 170]

- [11] Bao P F, Lin C J, Yang F, Guo Z Q, Guo T S, Yang L, Sun L J, Jia H M, Xu X X, Ma N R, Zhang H Q, Liu Z H 2014 *Chin. Phys. C* **38** 126001
- [12] Meng X C 2003 *Nucl. Elec. and Det. Tech.* **23** 4 (in Chinese) [孟祥承 2003 *核电子学与探测技术* **23** 4]
- [13] Xie Y G, Chen C, Wang M, Lv J G, Meng X C, Wang F, Gu S D, Guo Y N 2003 *Particle Detector and Data Acquisition* (Beijing: Science Press) p230 (in Chinese) [谢一冈, 陈昌, 王曼, 吕军光, 孟祥承, 王锋, 顾树棣, 过雅南 2003 *粒子探测器与数据获取* (北京: 科学出版社) 第230页]
- [14] Ding H L 2010 *Nuclear Radiation Detector* (Harbin: Harbin Engineering University Press) p168 (in Chinese) [丁洪林 2010 *核辐射探测器* (哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社) 第168页]
- [15] Casse G, Affolder A, Allport P P, Brown H, Mcleod I, Wormald M 2011 *Nucl. Instrum. Meth. A* **636** S56
- [16] Lu X T, Jiang D X, Ye Y L 2000 *Nuclear Physics* (Beijing: Atomic Energy Press) p82 (in Chinese) [卢希庭, 江栋兴, 叶沿林 2000 *原子核物理* (北京: 原子能出版社) 第82页]
- [17] Zhang X H, Tang S W, Ma P, Lu C G, Yang H R, Wang S T, Yu Y H, Yue K, Fang F, Yan D, Zhou Y, Wang Z M, Sun Y, Sun Z Y, Duan L M, Sun B H 2015 *Nucl. Instrum. Meth. A* **795** 389
- [18] Li P J, Li Z H, Chen Z Q, Wu H Y, Tian Z Y, Jiang W, Li J, Feng J, Zang H L, Liu Q, Niu C Y, Yang B, Tao L C, Zhang Y, Sun X H, Wang X, Liu Y, Li Q T, Lou J L, Li X Q, Hua H, Jiang D X, Ye Y L 2017 *Nucl. Phys. Rev.* **34** 177 (in Chinese) [李朋杰, 李智煥, 陈志强, 吴鸿毅, 田正阳, 蒋伟, 李晶, 冯骏, 臧宏亮, 刘强, 牛晨阳, 杨彪, 陶龙春, 张允, 孙晓慧, 王翔, 刘洋, 李奇特, 楼建玲, 李湘庆, 华辉, 江栋兴, 叶沿林 2017 *原子核物理评论* **34** 177]
- [19] Yamaguchi T, Fukuda M, Fukuda S, Fan G W, Hachiuma I, Kanazawa M, Kitagawa A, Kuboki T, Lantz M, Mihara M, Nagashima M, Namihira K, Nishimura D, Okuma Y, Ohtsubo T, Sato S, Suzuki T, Takechi M, Xu W 2010 *Phys. Rev. C* **82** 014609
- [20] Zhao J W, Sun B H, He L C, Li G S, Lin W J, Liu C Y, Liu Z, Lu C G, Shen D P, Sun Y Z, Sun Z Y, Tanihata I, Terashima S, Tran D T, Wang F, Wang J, Wang S T, Wei X L, Xu X D, Zhu L H, Zhang J C, Zhang X H, Zhang Y, Zhou Z T 2019 *Nucl. Instrum. Meth. A* **930** 95
- [21] Yu M, Dong X S, Tian D Y, Jin Y F 2012 *Chinese Patent CN201110452444.5* (in Chinese) [于民, 董显山, 田大字, 金玉丰 2012 *中国专利 CN201110452444.5*]
- [22] Yang F D, Hao X Y, Zhao J B, Zhang X Y, He G K 2019 *Chinese Patent CN201811621988.8* (in Chinese) [杨昉东, 郝晓勇, 赵江滨, 张向阳, 何高魁 2019 *中国专利 CN201811621988.8*]

# Development of high performance PIN-silicon detector and its application in radioactive beam physical experiment<sup>\*</sup>

Chen Cui-Hong   Li Zhan-Kui   Wang Xiu-Hua   Li Rong-Hua  
Fang Fang   Wang Zhu-Sheng   Li Hai-Xia<sup>†</sup>

(*Nuclear Detector Group, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

( Received 15 February 2023; revised manuscript received 18 April 2023 )

## Abstract

In view of the great demand for large-area silicon detectors in domestic nuclear physics experiments, a type of 300- $\mu\text{m}$ -thick high-performance square silicon detector with a large active area of 50 mm $\times$ 50 mm by using overprinting technology is developed in the Institute of Modern Physics of the Chinese Academy of Sciences. Based on this technology, SiO<sub>2</sub> contamination caused by the photolithography and corrosion processes is effectively reduced. The detector has an excellent performance with a yield of up to 80%. Under  $-45$  V (depletion voltage) bias, the leakage current of the detector is less than 40 nA. The detector is tested with a three-component  $\alpha$  radioactive source. The energy resolution ( $\sigma$ ) is about 45 keV for 5-MeV  $\alpha$  particles. Used as an energy deposition( $\Delta E$ ) detector, the detector performance is also tested for measuring reaction products of 250 MeV/u <sup>12</sup>C radioactive beams impinging on a carbon target. The results show that the charge number resolution of a single silicon detector is 0.17 for the carbon isotope, which is similar to that measured with the same type of detectors available from the market. With the average deposition energy of three silicon detectors used, the charge number resolution for carbon isotope reaches a better value of 0.11. With this resolution, C and B isotopes are clearly distinguished, meeting the requirements for particle identification in intermediate- and high-energy radioactive beam experiments.

**Keywords:** silicon detector, overprinting technology, leakage current, charge number resolution

**PACS:** 29.40.-n, 29.40.wk

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230213

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11775283, 12005267, 12275330).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lihaixia@impcas.ac.cn](mailto:lihaixia@impcas.ac.cn)



## 高性能PIN-硅探测器的研制及其在高能放射性核束实验中的应用测试

陈翠红 李占奎 王秀华 李荣华 方芳 王柱生 李海霞

### Development of high performance PIN-silicon detector and its application in radioactive beam physical experiment

Chen Cui-Hong Li Zhan-Kui Wang Xiu-Hua Li Rong-Hua Fang Fang Wang Zhu-Sheng Li Hai-Xia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 122902 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230213

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230213>

当期内容 View table of contents: <https://wulixb.iphy.ac.cn>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

氧空位缺陷对PbTiO<sub>3</sub>铁电薄膜漏电流的调控

Effect of oxygen vacancy defect on leakage current of PbTiO<sub>3</sub> ferroelectric thin film

物理学报. 2018, 67(18): 187701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181130>

复合漏电模型建立及阶梯场板Ga<sub>N</sub>肖特基势垒二极管设计

Establishment of composite leakage model and design of Ga<sub>N</sub> Schottky barrier diode with stepped field plate

物理学报. 2022, 71(5): 057301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211917>

硅漂移探测器数字脉冲处理技术

Research on digital pulse processing techniques for silicon drift detector

物理学报. 2022, 71(1): 012903 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211062>

InGaZnO薄膜晶体管泄漏电流模型

Leakage current model of InGaZnO thin film transistor

物理学报. 2019, 68(5): 057302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182088>

基于太赫兹脉冲加速及扫描电子束的高时间分辨探测器

High time-resolution detector based on THz pulse accelerating and scanning electron beam

物理学报. 2022, 71(2): 028501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210871>

适用400 Gbit/s接收系统的钢磷基低暗电流高带宽倏逝波耦合光电探测器阵列

Low dark current and high bandwidth evanescent wave coupled PIN photodetector array for 400 Gbit/s receiving system

物理学报. 2021, 70(20): 208501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210781>