文章编号: 1007-4627(2014) 04-0522-06

## PPAC 在单粒子效应地面模拟实验中 对束流均匀度测量的应用

蒋冬舜<sup>1, 2</sup>, 孙友梅<sup>1</sup>, 马 朋<sup>1</sup>, 段敬来<sup>1</sup>, 刘 杰<sup>1</sup>, 耿 超<sup>1, 2</sup>, 侯明东<sup>1</sup>, 姚会军<sup>1</sup>, 罗 捷<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:单粒子效应 (SEE) 加速器地面模拟需要离子束具有较好的均匀度,针对回旋加速器单粒子效应模拟的束流特点,建立了一套以位置灵敏平行板雪崩探测器 (Parallel Plate Avalanche Counter, PPAC) 为基础的均匀度探测系统并完成了带束测试,对它的结构、工作原理、均匀度获得方法及带束测试结果进行描述。为验证 PPAC 测量结果准确性,在带束测试过程中,前方同时放置PET膜测量穿过 PPAC 探测器的粒子分布,与离子径迹测量结果对比,给出PPAC的均匀度的测量误差在5%之内。探测器具有50 mm×50 mm的灵敏面积和小于1 mm的位置分辨,符合单粒子效应实验对束流均匀度测量的要求。

关键词: PPAC; 单粒子效应; 地面模拟; 束流均匀度; 固体径迹探测器

中图分类号: TL811 文献标志码: A **DOI**: 10.11804/NuclPhysRev.31.04.522

### 1 引言

天然的空间辐照环境可以使半导体和集成电路的电性能发生瞬时或永久的改变,单个重离子或高能质子引起半导体器件逻辑状态改变,即单粒子效应(SEE)。SEE是威胁航天器安全的重要因素之一,随着航天器体积的增大,在空间工作时间的增长,SEE发生的几率也随之增大。目前对宇航元器件SEE的地面模拟方法包括:计算机数值模拟,辐射源模拟,激光模拟和加速器模拟等,其中加速器地面模拟具有研究周期短,可人为控制和选择实验条件,可以在同一条件下反复实验的特点。所以,利用高能重离子加速器的地面模拟实验是最有效的SEE研究方法[1]。开展SEE的加速器地面模拟实验研究对重离子束流均匀性要求很高,束流均匀度是一重要的物理参数,很大程度上会影响SEE评估的准确度,关系航天器的运行安全。在束流均匀度不理想的情况下研

究SEE,一方面,有粒子簇团出现引起器件的多位翻 转或闩锁, 无法与单个粒子引起的 SEE 区分开, 导 致结果出现误差;另一方面,在计算器件SEE截面 时,将带来较大的实验误差,进而使得SEE截面测量 结果不准确甚至错误。为了说明均匀度对 SEE 截面 的影响,利用Geant4程序<sup>[2]</sup>模拟了能量为385 MeV 的 <sup>209</sup>Bi 東流辐照 0.18 µm SRAM (Static Dynamic Random Access Memory) 器件单粒子翻转数目与粒 子注入个数的关系,如图1所示。在此条件下,粒子 注入数目在0至20之间,翻转截面约为3.25;当粒子 数目为80至100之间,翻转截面约为24.2。因此,需 要建立一套专门的均匀度测量装置,在实验过程中实 时进行束流均匀度监测,以减小由于束流不均匀造成 的实验误差。以往的均匀度测量通常采用径迹探测 器方法离线分析获得,该方法采用固体核径迹探测 器方法对在线辐照后的聚合物膜进行均匀度测量和 分析。常选用 PET 膜作为核径迹材料<sup>[3-4]</sup>, PET 薄

收稿日期: 2014-01-18; 修改日期: 2014-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11005134, 11275237)

作者简介: 蒋冬舜(1987-), 男, 山东单县人, 硕士, 从事材料工程研究; E-mail: dongshun390@163.com

通信作者: 孙友梅, E-mail: ymsun@impcas.ac.cn。

膜被重离子辐照后沿带电粒子入射路径产生结构损伤,这些损伤区域很容易被蚀刻形成为可见的纳米或者微米孔<sup>[5-6]</sup>,孔的分布即代表入射粒子在PET膜上的位置分布,通过显微镜采点分析PET膜上的孔的分布就可以给出辐照离子的均匀度。利用固体径迹探测器给出粒子的分布信息直观、准确,但是所需步骤繁琐,耗时较长,不能满足SEE实验对束流均匀度实时监测的要求,无法及时获得均匀度分布,影响实验进程。因此,需要建立更方便快捷的测量方法,满足SEE实验中对束流均匀度进行实时测量需求,我们选择PPAC位置灵敏探测器,它具有较好的位置分辨,宽的离子种类适用范围,较宽的注量率和探测面积适用范围等特点,已经被广泛用于核物理实验<sup>[7-11]</sup>中的束流分布测量。

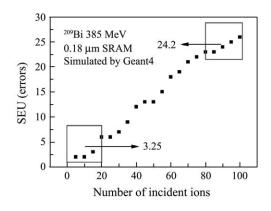


图 1 Geant 4 模拟 385 MeV 的 <sup>209</sup> Bi 单粒子翻转数目与注 入粒子数的关系

#### 2 PPAC的结构与工作原理

以平行板雪崩探测器 (Parallel Plate Avalanche Counter, PPAC) 为基础的均匀度探测系统硬件包括 PPAC 探测器、气路控制系统、电子学插件及计算机获取单元。软件用于对硬件提供的数据进行获取和分析处理,并最终给出反映重离子束流均匀度的直观图形,包括数据读取程序、数据分析处理程序和用户操作界面。

PPAC是一种工作在雪崩区的多丝气体探测器,用于SEE 均匀度测量的 PPAC 探测器的灵敏区面积设计为 50 mm×50 mm,涵盖 22 mm×22 mm 的辐照束斑面积。结构如图 2 所示,中心阳极采用膜电极,由厚度为 2 μm 的 Mylar 膜双面镀金制成,阳极与阴极间距 3 mm。 *X* 方向和 *Y* 方向阴极用直径 20 μm 的

镀金钨丝间隔 1 mm 平均布丝,两方向相互正交,每 1 mm 引出一个信号接入延迟线路中进入位置读出电极,X 和 Y 相对中心电极完全对称,因此,PPAC 在两维位置上具有相同的位置分辨。采用以上读出方式,在 X 方向与 Y 方向均可以达到 1 mm 的位置分辨。

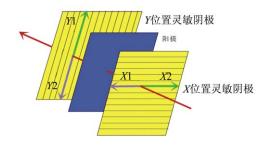


图 2 (在线彩图) PPAC 结构与工作原理示意图

PPAC采用流气式系统供气(如图3所示),选用的工作气体是异丁烷,因为离子穿过异丁烷时相比其他的气体,产生的能损较小,同时又能保证有足够强的信号被探测到<sup>[11-12]</sup>,探测器工作时气压稳定在 600 Pa,极板间加 500 V 均匀强电场。工作气体贮存瓶通过电磁阀与探测器气体进气口相连,探测器的出气口经针阀与真空泵相连。绝对气压计和气压传感器实时地测量 PPAC 内部的工作气压并将测量结果传送给控制单元,并将测量结果与预先设置的气压值比较,通过控制电磁阀的孔径,实现流量动态控制,在自动稳压系统控制下实现动态稳压,保证 PPAC 内部气压稳定。

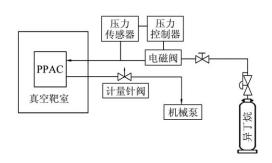


图 3 PPAC 的供气与稳压系统框图

在多丝结构中,当雪崩放大过程在阴极丝上产生正脉冲时,这个阴极丝相邻的其他丝将感应产生负信号,这将补偿丝之间电容耦合的正信号,这些平行丝的工作可看做是相互独立的<sup>[13]</sup>,这是多丝结构探测器对粒子位置测量的基础。单粒子实验中最大离子注量率要求为10<sup>4</sup> ions/(cm<sup>2</sup>·s),探测器灵敏面积为50

 $mm \times 50 \ mm$ ,这样探测器每秒接受到的最大入射粒子数为  $2.5 \times 10^5$ 。为满足这一要求,PPAC 采用延迟线读出方式 $^{[14]}$ ,X 和 Y 位置灵敏阴极面中,每根丝与线性延迟块的 1 个管脚相连,每个管脚的延迟时间为 4 ns,每个延迟块有 10 个管脚,匹配电阻为 50  $\Omega$ ,最大延迟时间为 200 ns。

PPAC 前端电子学及数据获取系统如图4所示,待测带电粒子进入PPAC 气体室内,在均匀强电场的作用下,气体产生电离、雪崩。阳极输出进入ORTEC 快时间前放VT120B放大后进入ORTEC 8路恒分甄别器 CF8000 甄别,给出一个起始时间信号T, X, Y 各引出两路位置信号送入ORTEC 8路快时间放大器FTA810A放大后,进入CF8000 中甄别,甄别后的信号被送到PXI 机箱,通过高性能时间数字转换器 HPTDC (High performance time to digital converter) 采集阳极起始信号和位置信号的时间差,给出X, Y方向的4个位置值(X1, X2, Y1, Y2)(如图2所示),从而确定雪崩的位置,该入射粒子的位置信息为[15]:

$$X = \frac{X1 - X2}{X1 + X2} \times \frac{L_X}{2} ,$$
 
$$Y = \frac{Y1 - Y2}{Y1 + Y2} \times \frac{L_Y}{2} ,$$

 $L_X$  和  $L_Y$  为探测器的灵敏区的长宽。

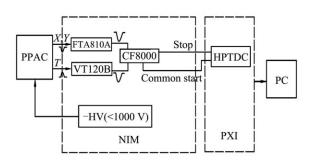


图 4 前端电子学及数据获取框图

利用 PAW(Physics Analysis Workstation) 分析软件,对采集的 X, Y 值进行数据分析,记录下每个粒子的位置信息,进而得到粒子的分布情况和束流的均匀度信息。

## 3 PPAC 的带束测量验证结果及均匀 度分析

量的准确性, PPAC置于SEE 实验终端束流线上, PPAC前用闪烁探测器监测离子的注量率和总注 量,并放置PET 膜进行同时辐照测量,PET 膜置 于PPAC之前,用作对照实验,测量几何如图5所 示。实验使用的束流为能量  $19.5 \,\mathrm{MeV/u}$  的  $^{129}\mathrm{Xe}^{27+}$ , 使用了4种不同总注量,同时使用PPAC和PET膜 测量束流的均匀度。图6为PET 膜蚀刻后的束斑形 状和PPAC得到的一维、二维谱图。图 6(a) 给出了辐 照 PET 膜利用 9 mol/L NaOH 溶液, 80 ℃蚀刻 10 min 后,观察到的束斑的形状和面积;而图 6(b) 给出 了 PAW 软件分析给出的束流二维谱,反映出束斑形 状和面积,可测得X和Y方向均为22 mm 与图6(a)中PET 膜束斑形状和大小相符合,并且可以直观看 出粒子的分布。图6(c)为束流的一维谱,采集信息 时1 mm 内有10道,则X与Y方向上均有220道, 图中所示事例数分别为430764和429890,则每道接 收的脉冲个数分别为1958和1954,即X和Y方向上 平均每0.1 mm 内粒子数目分别为1958个和1954个。 如图中所示, 粒子数在平均值附近涨落, 围绕平均值 的离散程度反映了束流的均匀度。同时,一维谱中半 高宽表征了束斑 X 和 Y 方向上的宽度。图 6(d) 给出 了束流的二维谱, 为等粒子密度线示意图, 束斑周围 等粒子密度线密集,从边缘向内粒子密度逐渐增加, 说明边缘的均匀度不好, 粒子数梯次递增; 中间区域 的等粒子密度线比较稀疏,粒子密度变化不大,说明 该区域的束流均匀度较好。

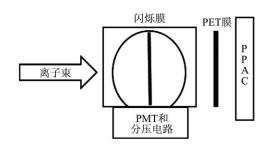


图 5 PPAC 带束测量几何示意图

引入均匀度公式:  $H = (1-S/M) \times 100\%$ (其中S指区域事例数的标准偏差,M为事例数的平均值) $^{[16]}$ ,将均匀度量化。如图6(d),利用PAW软件将束斑按照笛卡尔坐标系的参照系分为4个部分,在每个象限里选取4个不同区域,读出区域内的事例数,带入公式计算该象限内的均匀度。同时,将所有区域的事例数带入上面公式计算总均匀度。作为对照,

对 PET 膜做同样的分析,将辐照过的 PET 膜,对束 斑分为 4 个象限,在光学显微镜下每个象限选取 4 个 区域,统计每个区域内的粒子数,进而计算 4 个象限 的均匀度和总均匀度,统计结果如表 1 所示。束流局

部和总体的均匀度基本达到85%以上,利用PPAC与固体核径迹探测器测得的束流均匀度误差在5%以内,考虑到采样误差等因素,可以说明PPAC给出的均匀度结果能够反映实际的束流分布情况。

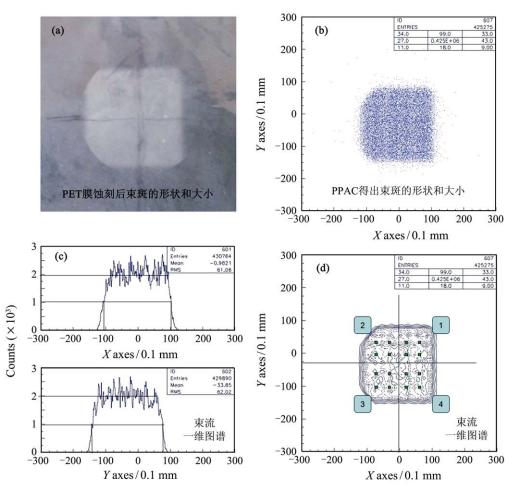


图 6 (在线彩图) PET 膜和 PAW 软件分析束流一维、二维图谱

表 1 PET 膜与 PPAC 4 个象限与总体均匀度

(单位:%)

百分县	PET膜				PPAC					
芯往里	1象限	2象限	3象限	4象限	总均匀度	1象限	2象限	3象限	4象限	总均匀度
528821	85.747	87.803	88.175	84.608	86.375	90.924	87.019	91.897	90.174	90.453
1043097	86.823	89.399	91.504	93.031	90.180	86.823	89.399	91.504	93.031	88.345
2670824	92.749	94.510	94.639	89.124	92.016	94.570	95.554	86.594	87.271	87.948
5401906	91.614	96.954	92.075	90.401	92.411	91.598	92.079	81.623	91.883	91.034
	1 043 097 2 670 824	1象限       528 821     85.747       1 043 097     86.823       2 670 824     92.749	1象限     2象限       528 821     85.747     87.803       1 043 097     86.823     89.399       2 670 824     92.749     94.510	总注量     1象限     2象限     3象限       528 821     85.747     87.803     88.175       1 043 097     86.823     89.399     91.504       2 670 824     92.749     94.510     94.639	总注量     1象限     2象限     3象限     4象限       528 821     85.747     87.803     88.175     84.608       1 043 097     86.823     89.399     91.504     93.031       2 670 824     92.749     94.510     94.639     89.124	总注量     1象限     2象限     3象限     4象限     总均匀度       528 821     85.747     87.803     88.175     84.608     86.375       1 043 097     86.823     89.399     91.504     93.031     90.180       2 670 824     92.749     94.510     94.639     89.124     92.016	总注量     1象限     2象限     3象限     4象限     总均匀度     1象限       528 821     85.747     87.803     88.175     84.608     86.375     90.924       1 043 097     86.823     89.399     91.504     93.031     90.180     86.823       2 670 824     92.749     94.510     94.639     89.124     92.016     94.570	总注量     1象限     2象限     3象限     4象限     总均匀度     1象限     2象限       528 821     85.747     87.803     88.175     84.608     86.375     90.924     87.019       1 043 097     86.823     89.399     91.504     93.031     90.180     86.823     89.399       2 670 824     92.749     94.510     94.639     89.124     92.016     94.570     95.554	总注量     1象限     2象限     3象限     4象限     总均匀度     1象限     2象限     3象限       528 821     85.747     87.803     88.175     84.608     86.375     90.924     87.019     91.897       1 043 097     86.823     89.399     91.504     93.031     90.180     86.823     89.399     91.504       2 670 824     92.749     94.510     94.639     89.124     92.016     94.570     95.554     86.594	总注量     1象限     2象限     3象限     4象限     总均匀度     1象限     2象限     3象限     4象限       528 821     85.747     87.803     88.175     84.608     86.375     90.924     87.019     91.897     90.174       1 043 097     86.823     89.399     91.504     93.031     90.180     86.823     89.399     91.504     93.031       2 670 824     92.749     94.510     94.639     89.124     92.016     94.570     95.554     86.594     87.271

#### 4 结论

PPAC探测器制作工艺简单,可以根据实验需要制作各种形状和不同的灵敏面积。由于其探测效率高,位置分辨好于1 mm,能够用来测量SEE实验中的束流均匀度。PPAC气体探测器测量相对简便、易

用,与之匹配的PAW分析软件指令简单,可快速准确地得出一维和二维谱,直观有效地显示出束流均匀度。利用公式 $H=(1-S/M)\times 100\%$ 将PPAC测量谱图量化,能够更直观地描述束流的均匀度情况,并给出了PPAC与固体径迹探测器测量的束流均匀度的数值比较,误差在5%以内。用PPAC进行均匀度测量,

http://www.npr.ac.cn

338.)

避免了辐照后蚀刻、显微镜观测等繁琐的步骤,节省了时间。因此,PPAC均匀度探测器可以实现SEE地面模拟实验中对束流均匀度快速、准确的测量。

#### 参考文献:

- HOU Mingdong, LIU Jie, MA Feng, et al. Atomic Energy Science and Technology, 1997, 31(3): 284. (in Chinese)
   (侯明东, 刘杰, 马峰, 等. 原子能科学技术, 1997, 31(3): 284.)
- [2] GENG Chao, LIU Jie, XI Kai, et al. Chin Phys B, 2013, 22(5): 109501.
- [3] APEL P. Radiation Measurements, 2001, 34: 559.
- [4] LI Qiang, XIE Hongmei, LI Wenjian, et al. Nuclear Physics Review, 2003, **20**(1): 48. (in Chinese) (李强, 颉红梅, 李文建, 等. 原子核物理评论, 2003, **20**(1): 48.)
- [5] KALSI P C, PRAMILLA D. SAWANT A. et al. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2007, 273: 473.
- [6] SZYDLOWSKI A,BANASZAK A, FIJALM I, et al. Czechoslovak Journal of Physics, 2004, 54: 384.
- [7] HUA Hui, JIANG Dongxing, LI Xiangqing, et al. Nucl Instr and Meth A, 200, 481: 16.
- [8] MA Peng, LU Chengui, WANG Jiansong, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(3): 356. (in Chinese).
  (马朋, 鲁辰桂, 王建松, 等. 原子能科学技术, 2011, 45(3): 356.)
- [9] WANG Meng, GUO Zhongyan, ZHAN Wenlong, et al. Nuclear Techniques, 2003, 26(3): 245. (in Chinese).

- (王猛, 郭忠言, 詹文龙, 等. 核技术, 2003, 26(3): 245.)
- [10] CHEN Yu, LI Guangwu, ZHANG Gang, et al. Atomic Energy Science and Technology. 2011, 45(4): 491. (in Chinese).
  - (陈宇, 黎光武, 张刚, 等. 原子能科学技术, 2011, 45(4): 491.)
- [11] WANG Meng, GUO Zhongyan, ZHAN Wenlong, et al. HEP&NP, 2002, 26(12): 1285. (in Chinese)(王猛, 郭忠言, 詹文龙, 等. 高能物理与核物理, 2002, 26(12): 1285.)
- [12] WANG Quanjin, ZHENG Tao, YE Yanlin, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2006, 40(3): 338. (in Chinese) (王全进, 郑涛, 叶沿林, 等. 原子能科学技术, 2006, 40(3):
- [13] HU Jun. Investigation of the <sup>14</sup>O (α, p) <sup>17</sup>F stellar reaction via resonant elastic scattering of <sup>17</sup>F+p[D]. Lanzhou: IMP of CAS, 2011: 32. (in Chinese).
  (胡钧. <sup>17</sup>F+p共振弹性散射实验对天体核反应<sup>14</sup>O(α, p)<sup>17</sup>F的研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2011: 32.)
- [14] CHARPAK G, BOUCLIER R, BRESSANI T, et al. Nucl Instr and Meth A, 1968, 62(3): 262.
- [15] GUO Zhongyan, ZHAN Wenlong, XIAO Guoqing, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(2): 169. (in Chinese)(郭忠言, 詹文龙, 肖国青, 等. 原子能科学技术, 2004, 38(2): 169.)
- [16] XIE Hongmei, WEI Zengquan, LI Wenjian, et al. Nuclear Techniques, 1997, 20(4): 230. (in Chinese)(颉红梅, 卫增泉, 李文建, 等. 核技术, 1997, 20(4): 230.)

# Application of PPAC for Homogeneity Analysis on the SEE Ground-test

JIANG Dongshun<sup>1, 2</sup>, SUN Youmei<sup>1</sup>, MA Peng<sup>1</sup>, DUAN Jinglai<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, GENG Chao<sup>1, 2</sup>, HOU Mingdong<sup>1</sup>, YAO Huijun<sup>1</sup>, LUO Jie<sup>1, 2</sup>

Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The homogeneity of beam is an important physical parameter in the ground-test accelerator of single event effects (SEEs), it can affect the SEEs evaluation accuracy. Nuclear track detector cannot get the beam profile promptly. A uniformity measurement system based on the Position sensitive parallel plate avalanche detector (PPAC) was built to fulfil the homogeneity analysis in real time during the SEE test. Here its construction and principle, the method of analysis and the result of beam test are described. To validate the result of PPAC, a PET film was synchronously irradiated before the PPAC. In comparison with the obtained results of PET films observation, the uniformity value from the PPAC has an estimated maximum error of 5%. The PPAC has about 1 mm position resolution and 50 mm × 50 mm sensitive area. Which can satisfy the requirement of uniformity analysis on SEEs test by accelerator irradiation.

Key words: PPAC; single event effect; ground-test; homogeneity of beam; nuclear track detection

Received date: 18 Jan. 2014; Revised date: 13 Mar. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11005134, 11275237)

Corresponding author: SUN Youmei, E-mail; ymsun@impcas.ac.cn.