

低气压多丝正比室及其在放射性束流 实验中的应用*

李智焕 陈陶 叶沿林 江栋兴 华辉 李湘庆
王全进 葛愉成 庞丹阳 狄振宇

(北京大学物理学院技术物理系 北京 100871)

谭继廉 张金霞 凤盈 张保国 肖志刚
王宏伟 吴和宇 靳根明

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 介绍了为在放射性束流线上开展精确的散射和反应实验中,对入射束流的角度和有效数目等进行在线监测而设计制造的低气压多丝正比室.它透射性好,不干扰束流,并方便在真空环境中工作.测量表明,它的位置分辨率约 0.5mm.对 20—30MeV/u 的低 Z 的放射性束流有着大于 90% 的位置探测效率,适用于中能次级束实验靶前的束流定位及在线监测,也可用在靶后测量出射带电粒子的角度.

关键词 低气压多丝正比室 位置分辨 位置探测效率

1 引言

近 15 年来,随着加速器技术的发展,世界上各个实验室的放射性束流线相继投入使用.目前,放射性束流线可以提供许多靠近滴线的丰质子、丰中子束流,使得人们有可能对质子和中子的密度分布极不对称的奇异核的结构和反应进行研究.

目前用于产生中能放射性束流的方法主要是弹核碎裂(PF)方法,提供到实验终端的放射性次级束流相对于稳定核束流,一般流强较弱,束流斑点较大,而且束流的出射角度有一定的弥散.针对放射性束流的这些特点,在比较精细的实验中需要对束流进行在线监测,并对入射方向和位置进行准确测量.

用于放射性束流的监测和定位的探测器应满足如下的性能要求:对穿越的束流的能量和角度的影响可以忽略、能够在真空中工作并承受较高的束流流强(约 10^4 ions/s)、具有

2001-10-31 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)和 2000 年教育部优秀青年教师项目资助

较好的位置分辨(小于1mm)和时间分辨(约500ps);对于从He到更重的粒子在中能下(几十MeV/u)都有高的探测效率(大于90%)。

由于气体探测器对束流的透明度高,而且位置和时间分辨较好,因此在束流定位和监测方面得到了广泛的应用。目前使用比较多的是平行板雪崩计数器(PPAC)^[1],但实际测量^[2]表明,PPAC对中能的低Z粒子的探测效率很低,如对30MeV/u的⁴He的探测效率低于20%。其主要原因在于这些低Z的粒子在气体探测器上的能损很小,产生的原电离离子对数目少,而PPAC的气体放大倍数不足以将这样微弱信号放大到可以被测量的程度。因此PPAC不适宜于探测He, Li等较轻的次级束。

在真空中工作的低气压多丝正比室(LPMWPC)^[3],其气体放大倍数高于PPAC,较好地满足了上述要求。在使用 α 源进行的测试结果和⁶He弹性散射实验中的应用表明,LPMWPC具有对各种中能次级束探测效率高及位置分辨好的优点,可以用于放射性束流,特别是轻粒子束流的定位及监测。

2 探测器结构

我们研制的LPMWPC由两个阴极、一个公共阳极和两个窗及相应的读出电路组成(如图1)。阳极平面由71根直径 $10\mu\text{m}$,丝间距1mm的镀金钨丝平行排列组成。为补偿在边缘的电场畸变,在边缘使用 $20,40\mu\text{m}$ 的丝进行过渡。阴极平面由71根直径 $40\mu\text{m}$,相邻丝间距为1mm的镀金钨丝平行排列而成。两个阴极丝平面互相垂直,放置在阳极的两侧。阳极-阴极间距为4mm。入射窗和出射窗用 $6\mu\text{m}$ 的Mylar膜,探测器的有效探测面积为 $70\text{mm} \times 70\text{mm}$ 。所有阳极丝的端点连在一起,正高压通过 $1\text{M}\Omega$ 的电阻加到阳极丝平面上,产生的快信号经快时间放大器ORTEC FTA810放大引出时间信号,如图2所示。在阴极的一端,把相邻的每3根丝端点并在一起作为一个条引出,每个条都接到电阻串上,每个电阻值为 $2\text{k}\Omega$ 。每个阴极平面在电阻串的两端有两个信号,经ORTEC 142PC前放大,作为两路位置信号 $x_1(y_1)$, $x_2(y_2)$,如图3所示。

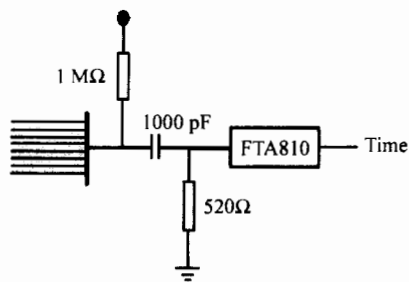


图2 阳极结构

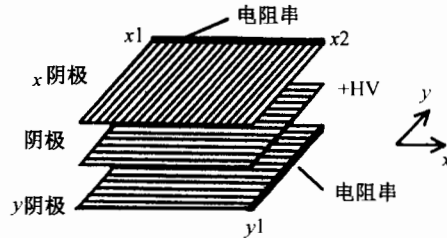


图1 LPMWPC 结构图

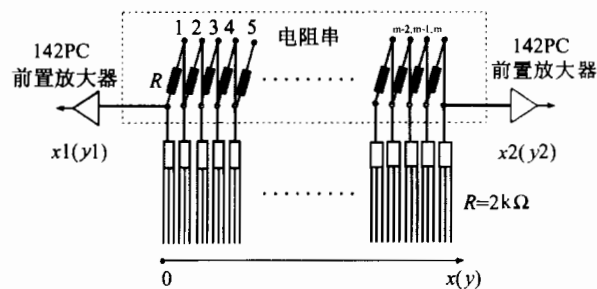


图3 阴极结构

3 工作原理

3.1 气体放大效应

LPMWPC 的阳极阴极之间产生均匀的平行电场, 而工作气压很低, 一般为几百 Pa, 这样极板间有着极高的约化场强 ($E/P \approx$ 几 V/cm/Pa). 在平行电场区, 漂向阳极的电子在一个自由程内获得的能量就足以使其发生碰撞的气体分子发生电离释放出一个次级电子, 同样产生的次级电子又进一步贡献于气体放大过程, 于是形成电子的雪崩增殖, 在整个漂移路径上产生雪崩放大, 这个过程与 PPAC 的气体倍增过程相似.

在均匀电场区产生次级电子个数与漂移的路程 d 有指数关系

$$N(d) = N(0)\exp[\alpha \cdot d], \quad (1)$$

$N(d)$ 是漂移距离为 d 时产生的次级电子个数. α 为汤森系数, 是约化场强 (E/p) 的函数

$$\alpha = PA\exp[-B/(E/P)], \quad (2)$$

其中 A 和 B 是气体特征常数. 在靠近阳极丝附近产生的次级电子总数为

$$N(r) = N(d)\exp\left[\int \alpha dx\right], \quad (3)$$

当这些电子漂移到离阳极丝很近的距离时, 电场按 $1/r$ 规律变化. 阳极丝的半径越小, 可以达到的电场强度越大. 这样电子在阳极丝附近再次产生雪崩增殖, 出现第二次气体的雪崩放大.

这样 LPMWPC 有着很高的气体倍增系数, 有利于少量原始电离粒子的探测, 使得 LPMWPC 对于低 Z 的入射粒子的探测效率比起 PPAC 有着明显的优势. 平行场区电子产生的信号快成分使得探测器有类似于 PPAC 的很高的时间分辨率. 并且因为阳极和阴极平面的间距很短, 可以对正离子进行快速收集, 使得探测器可以承受较高的计数率.

3.2 阴极位置读出方法

通过电荷重心法分别读出阴极 x, y 平面的感应电荷中心位置可以确定入射粒子的位置. 电荷重心的逐条读出方法是在每个条上都接上前置放大器, 逐条读出信号幅度, 再进行位置重建. 这种读出方法位置定位精度高, 但对电子学的数量及精度有很高的要求. 我们参考文献[4]及实验精度的要求, 采用了简便的电阻串读出法^[5]. 阴极丝上感应的正电荷沿电阻串向两侧传输, 每一侧得到的电荷量与感应丝两侧的电阻值有关. 假设感应电荷在第 k 条上的感应电荷量为 Q_k , 则 x_1, x_2 两边得到的电荷量为 $Q_k^{x_1} = Q_k \cdot (m - k)/m$, $Q_k^{x_2} = Q_k \cdot k/m$, 其中 k 为一侧的电阻数目, m 为总的电阻数目, 而 $Q_k = Q_k^{x_1} + Q_k^{x_2}$.

感应电荷的重心为

$$x = L \cdot \sum_k Q_k^{x_2} / \left(\sum_k Q_k^{x_1} + \sum_k Q_k^{x_2} \right) = L \cdot Q^{x_2} / (Q^{x_1} + Q^{x_2}), \quad (4)$$

即当测到电阻串两端前放输出的电压信号幅度大小时可计算出入射粒子的位置.

4 用 α 源测试

使用²⁴¹Am 的 5.638MeV α 源对每 3 根阴极丝并成一条的低气压多丝正比室进行了测

试. 在多丝正比室的入射窗前盖上厚 2mm 的铜板, 铜板上均匀分布 9×9 个直径为 0.5mm 的小孔, 相邻小孔间距为 5mm, 在测试中挡住了其中的两个孔. α 源的源面的直径为 1cm, 源距离气体探测器 25cm, 因此基本上为均匀辐照.

测试中, 工作气体为气压 450Pa 的正庚烷, 阳极加 670V 的正高压. 使用阳极的时间信号作为获取系统的触发, 用 ADC 记录了 x 和 y 方向的 4 个位置信号, 按公式(1)对位置进行了重建. 图 4(a)是测量的二维位置谱, 可以清楚地看到两个被挡住的孔的位置, 与挡板中孔的分布吻合. 图 4(b)给出 x 方向的位置分辨图, y 方向与 x 方向类似. x, y 位置均按两个相邻峰间距 5mm 进行刻度, 可以看到位置与道数有着很好的线性, 得到的位置分辨在边缘约为 0.7mm, 在中心约为 0.5mm. 而因为铜板的厚度较薄, α 粒子穿过后有一定的发散使测量的位置分辨变差. 综合考虑这些因素, 低气压多丝正比室对这个能量的 α 粒子本征位置分辨应为约 0.5mm. 按同样的方法对每 2 根阴极丝并成一条的探测器进行了测量, 得到的位置分辨与上述的结果相近. 从探测器的信号取出模式, 可以预期对较高能量的其他粒子, 只要在正常的信号产生范围内, 位置分辨率应当与上述结果相似.

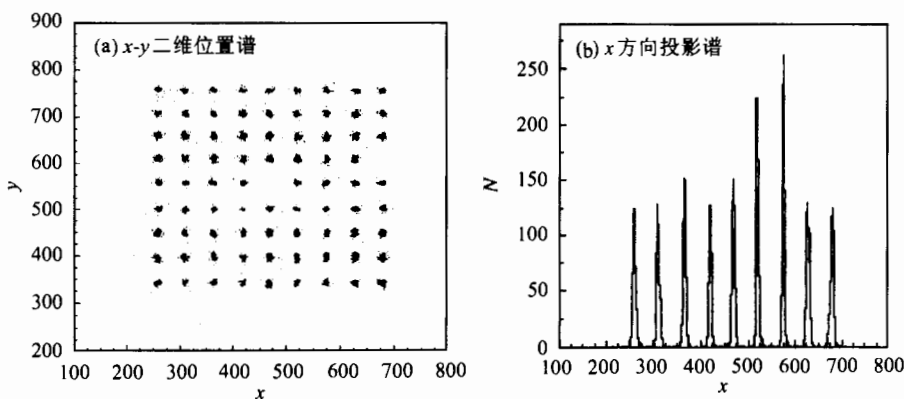


图 4 α 源测试结果

5 用放射性束流在束测试

在兰州近代物理研究所的重离子加速器(HIRFL)上进行了 ${}^6\text{He}$ 的弹性散射实验. 由HIRFL加速到50MeV/u的 ${}^{13}\text{C}$ 初级束打到厚度3000 μm 的Be靶上, 碎裂产物再经放射性束流线(RIBLL)分离纯化得到25MeV/u的 ${}^6\text{He}$ 束流, 入射到Li或Be靶上. 实验中将两个低气压多丝正比室置于靶前对入射束流的情况进行监测, 并给出入射粒子在靶上的位置和角度, 靶后的位置灵敏的望远镜系统测量反应产物的位置, 并给出粒子鉴别. 探测器布局如图5所示.

实验中两个气体探测器工作气体为正庚烷, 工作气压为900Pa, 阳极高压为780V. 实验中将LPMWPC2的两路位置信号(x_1, x_2)的符合信号作为气体探测器探测到束流的参照计数.

在实验中对一个入射粒子, 只有前端两个气体探测器同时给出了位置信号才能确定

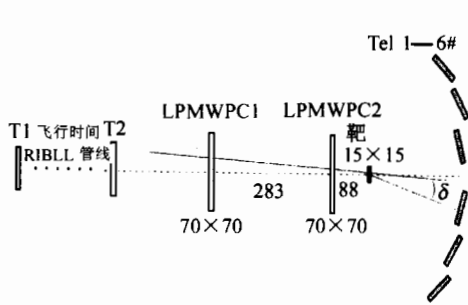


图 5 探测器布局图

(标注的尺寸单位为 mm)

入射角,因此气体探测器对各种入射粒子的位置探测效率是一个很重要的参数. 由于 LPMWPC 灵敏区的物质质量很小,不足以阻止中能入射粒子(即便打在丝上),因此探测效率主要取决于粒子穿越时是否产生正常的定位信号. 在确定效率时,需要用别的探测器选出穿越 LPMWPC 的粒子样本,然后看其中多大比例能被 LPMWPC 给出正确位置. 以靶后的望远镜与 T1 和 T2 的符合触发来选取粒子样本,原因是按照我们机械设计,这样的粒子必然穿

越 LPMWPC 和靶框. 此时, LPMWPC 对种类为 p 的入射粒子的位置探测效率 ϵ_p 定义为

$$\epsilon_p(E) = \frac{N_{\text{LPMWPC}}^p(E)}{N_{\text{Tel}}^p(E)}, \quad (5)$$

其中 $N_{\text{Tel}}^p(E)$ 为入射束流种类为 p 时,置于 LPMWPC 之后的望远镜探测到的出射粒子总数; $N_{\text{LPMWPC}}^p(E)$ 为气体探测器同时测到 x, y 位置的种类为 p 的粒子总数. 束流种类 p 的鉴别通过入射粒子在 RIBLL 的 T1—T2 飞行时间(TOF)和在 T2 塑闪的能损(ΔE)给出. 提供到实验终端的束流除了 25MeV/u 的 ${}^6\text{He}$ 外还有一定比例的 30MeV/u 的 ${}^9\text{Be}$, 35MeV/u ${}^4\text{He}$ 等成分,按上述方法测得的位置探测效率分别为 $98.3 \pm 1.5\%$, $\geq 99\%$, $92.3 \pm 3.5\%$.

可见 LPMWPC 对于 20—30MeV/u 的 He 粒子的位置探测效率高于 90%,而对 Be 以上粒子有着接近 100% 的效率,适用于中低能的各种带电粒子的定位和在线监测.

6 有效入射粒子数目的监测

在散射或反应实验中除了入射角之外,为了得到绝对截面还必须给出打在靶上的入射粒子总数. 在束流斑点较大的情况下,打到靶上的粒子总数 N_T 与靶前的探测器(如 RIBLL 的 T2 塑闪薄膜或 LPMWPC)探测到的入射粒子计数 N 并不相等,有时还可以相差很远. 它们之间有一个比例系数 $\epsilon \equiv N_T/N$. 可以考虑的方案是用狭缝限制束流斑点的大小,但这会造成较大的束流损失,并且束流在狭缝边缘材料上将会产生散射和复杂的反应,严重干扰靶材料产生的效应.

通过两个 LPMWPC 进行束流定位监测,可以在基本不干扰束流的前提下,刻度得到比例系数 ϵ . 我们在实验中对不同触发方式记录的每个文件用定标器记录了 LPMWPC2 两个阴极位置的符合信号的计数(它不受触发方式的影响),作为穿过 LPMWPC2 的入射粒子总数的标记,记为 N^i , i 为文件编号. 实验期间,定期用 LPMWPC2 的信号作获取系统触发进行测量,刻度两个 LPMWPC 重建出的对应于实验靶区域的入射粒子计数 N_T 与 LPMWPC2 的监测计数 N 之比 ϵ . 然后按照物理测量的需要改变触发方式,在束流稳定的时间间隔内就可以利用 ϵ 的值和连续的检测计数 N 获得有效的入射粒子总数. 这样就得到了打在靶上的束流总数 $N_T = \sum_i N^i \times \epsilon_i$, ϵ_i 表示第 i 号文件的比例系数. 实验中对 ${}^6\text{He}$

束流 ϵ_i 的平均值为 11% .

7 结论

我们设计制造了低气压的多丝正比室,方便在真空环境中工作.它结合了 PPAC 和 MWPC 的特点,有着两级的气体放大过程,对原始电离弱的入射粒子的探测很有利.它的位置分辨率约 0.5mm.对 25MeV/u ^6He 等束流的监测表明,LPMWPC 对 20—30MeV/u 的低 Z 的放射性束流有着很高的位置探测效率,适用于中能次级束靶前的定位及在线监测,当然也可用在靶后测量出射带电粒子的角度.

参考文献 (References)

- 1 TAN Ji-Lian, ZHANG Jin-Xia, WU Bo-Bing et al. Nuclear Electronics and Detection Technology, 1996, **16**:1 (in Chinese)
(谭继廉,张金霞,吴伯冰等.核电子学与探测技术,1996, **16**:1)
- 2 HUA Hui, JIANG Dong-Xing, LI Xiang-Qing et al. Nucl. Instr. and Meth., Efficiency of Positron Sensitive PPAC for the Different Ions, to be published
- 3 Ottini-Hustache S, Mazur S, Auger C et al. Nucl. Instr. and Meth., 1999, **A431**:476
- 4 Assamagan K, Barker K, Bayatyan G et al. Nucl. Instr. and Meth., 1999, **A426**:405
- 5 Becker H, Kalbitzer H, Rieck D et al. Nucl. Instr. and Meth., 1971, **95**:525

Low Pressure Multiwire Proportional Chamber and Its Application to Radioactive Ion Beam Experiment *

LI Zhi-Huan CHEN Tao YE Yan-Lin JIANG Dong-Xing HUA Hui LI Xiang-Qing
WANG Quan-Jin GE Yu-Cheng PANG Dan-Yang DI Zhen-Yu

(Department of Technical Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

TAN Ji-Lian ZHANG Jin-Xia FENG Ying ZHANG Bao-Guo XIAO Zhi-Gang
WANG Hong-Wei WU He-Yu JIN Gen-Ming

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Radioactive ion beam is generally characterized by small beam intensity and big beam size. In order to carry on precise scattering and reaction experiments it is necessary to monitoring the incident angle and absolute number of the beam hitting the target. We therefore have designed and made up low pressure multiwire proportional chambers (LPMWPC) which have good beam transparency and are also adequate to be used in vacuum. Experiment test indicates that the position resolution of the chambers is about 0.5mm and the position determination efficiency is larger than 90 % for the low Z particles at intermediate energies. This kind of chamber can then be used to detect the direction of the incident particle and to record the absolute number of the particles which really hit the target, or to detect the emitting angle of the outgoing particles.

Key words LPMWPC, position resolution, position determination efficiency

Received 31 October 2001

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077400) and Foundation of Chinese Ministry of Education