

# 适合探测较轻粒子的一种多极平行板雪崩计数器\*

胡正国 毛瑞士 郭忠言 肖国青 詹文龙 徐瑚珊 王 猛  
孙志宇 陈志强 陈立新 白 洁 李 琛 张金霞 李存藩

中国科学院近代物理研究所, 730000 兰州

**摘要** 一种高性能多极双维位置灵敏平行板雪崩计数器(multi-plate parallel plate avalanche counter, MPPAC)在兰州中能重离子加速器放射性次级束流线(radioactive ion beam line in lanzhou, RIBLL)上被应用. 由二次雪崩带来的高增益使它很适合探测较高能量的较轻粒子. 它主要由1个中心阳极,  $x$ ,  $y$  位置栅极和2个阴极组成, 位置信号由  $x$ ,  $y$  位置栅极采用电荷分除法读出. 使用异丁烷工作气体, 气压 650 Pa, 阳极 +400 V, 阴极 -350 V 时, 对于  $\alpha$  粒子位置分辨为 0.55 mm (半高全宽度, fwhm), 位置线性色散远好于  $\pm 0.2$  mm, 探测效率大于 99.2%. 同时, 也研究了位置分辨与阳极、阴极电压的关系, 与放大器成形时间常数的依赖, 随工作气压变化等.

**关键词** 多级 PPAC 位置分辨 位置线性 探测效率

气体探测器是一种很早就被广泛应用在核物理实验中的探测设备. 它具有许多独特的优点, 如气体电离室(ionization counter, IC)能量分辨适中, 很低的探测阈. 多丝正比室(MWPC)和平行板雪崩室(PPAC)具有很好的位置分辨和时间分辨. 它们还有厚度均匀、可调, 有效面积和体积可按需要随意设计, 成本低廉. 因此, RIPS, A1200, FRS 等放射性束流装置上都安装了多套 PPAC<sup>[1,2]</sup>, 测量束流线各个焦点附近的 RIB 剖面.

兰州重离子加速器放射性次级束流线(RIBLL)是我国第一条开展中能重离子放射性束(RIB)物理研究的高性能设备<sup>[3]</sup>. 为了测量束流的剖面、走向和发散度, 我们分别在 RIBLL 散焦点  $C_1$ ,  $C_2$ , 聚焦点  $T_1$ ,  $T_2$  安装了多套 PPAC. 在 RIBLL 运行初期, 我们也设计研制了一种经典结构的双维位置灵敏 PPAC<sup>[4]</sup>. 使用发现, 对于较重中能粒子(如  $A$  在 10~50 之间), 这种结构的 PPAC 的位置分辨、探测效率、计数率能力等性能十分优秀. 但对较轻粒子, 如 H, He, Li 同位素, 探测效率下降, 位置分辨变差.

Freeman 等报道了多极结构的 PPAC<sup>[5]</sup>, 其灵敏

面积 51 mm  $\times$  51 mm, 室隙 3.2 mm, 工作气体异丁烷, 在 650 Pa 气压, 对于  $^{241}\text{Cm}$   $\alpha$  粒子, 位置分辨 0.9 mm (fwhm), 透射率 87.5%, 线性最大偏离 0.2 mm. Assamagan 等也报道了具有类似结构的 PPAC 测试结果<sup>[6]</sup>, 在 1.3 torr<sup>1)</sup> 异丁烷, 对于  $^{252}\text{Cf}$  裂变源, 得到 0.8 mm (fwhm) 位置分辨. 在 Chinmay 等的研究中, 利用 33 k $\Omega$  电阻串读出, 电子学成形时间常数 1  $\mu\text{s}$ , 位置分辨是 0.757 mm (fwhm)<sup>[7]</sup>.

考虑到多极结构 PPAC 的高增益优点, 我们在原有经典 PPAC 基础上附加 2 个阴极, 设计研制了一种多极双维位置灵敏平行板雪崩室(MPPAC). MPPAC 主要由入射窗、阴极、 $x$  栅极、阳极、 $y$  栅极、阴极、出射窗组成. 位置采用电荷分除法读出. 由电子二次雪崩带来的高增益使得它具有明显的高增益, 高信号噪声比, 低工作电压, 对探测较轻粒子十分有利.

## 1 MPPAC 的结构

图 1 是 MPPAC 的内部结构示意图. 该双维位置灵敏 MPPAC 具体结构如下: 中心阳极是一片厚

2002-10-08 收稿, 2003-01-08 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 19975059, 19825115, 19735051)和国家重点基础研究发展规划(批准号: G2000077400, G2000077401, G2000077404)资助项目

E-mail: zhgxiaojuan@impcas.ac.cn

1) 1 torr = 0.13322 kPa

度  $1.5\ \mu\text{m}$  双面镀金 Mylar 膜.  $x, y$  位置栅极由  $\Phi\ 25\ \mu\text{m}$  镀金钨丝制成, 丝间距  $1\ \text{mm}$ , 丝预应张力  $100\ \text{g}$ .  $x$  和  $y$  平面丝方向相互垂直. 丝之间串接  $200\ \Omega$  高精密度电阻, 以便利用电荷分除法计算位置. 阴极为单面镀金的  $1.5\ \mu\text{m}$  Mylar 膜, 镀金面面向阳极. 窗是由单面镀金的  $6\ \mu\text{m}$  Mylar 膜制成, 镀金面朝外, 并被  $\Phi\ 0.1\ \text{mm}$  的不锈钢网支撑. 窗的有效面积为  $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ , 至少可以承受  $10^4\ \text{Pa}$  正压差. PPAC 阳极与  $x, y$  栅极, 栅极与阴极距离都是  $3\ \text{mm}$ . PPAC 的芯体被安装在一个尺寸为  $189\ \text{mm} \times 170\ \text{mm} \times 56\ \text{mm}$  的铝合金壳体内. 盒体和窗架之间通过橡胶 O 圈密封, 芯体和窗体拆卸方便, 破损时可以很方便地更换. 壳体一侧设置探测器工作气体的入口、出口, 阳极和阴极高压插座, 阳极和位置栅极信号 Lemo 插座.

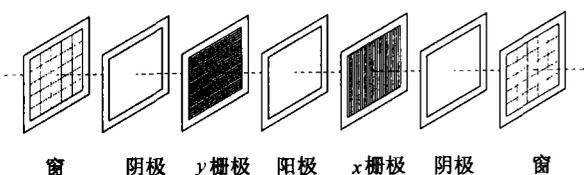


图1 MPPAC 的结构示意图

## 2 MPPAC 性能测试

测试时, MPPAC 被放置在一个较大的真空室内, MPPAC 的正前方  $30\ \text{cm}$  处放置一个 3 组分  $\alpha$  放射源 ( $^{239}\text{Pu}$ :  $5.155\ \text{MeV}\ \alpha$ ;  $^{241}\text{Am}$ :  $5.486\ \text{MeV}\ \alpha$ ;  $^{244}\text{Cm}$ :  $5.806\ \text{MeV}\ \alpha$ ). 在 MPPAC 的后面  $3\ \text{cm}$  处放置一个 Si 探测器, Si 探测器灵敏面积为  $48\ \text{mm} \times$

$48\ \text{mm}$ , 厚度  $300\ \mu\text{m}$ .

真空室通过 2 条不同口径的真空管道和不同孔径的阀门与真空泵连接, 以便在 MPPAC 与真空室连通状态下, 精密控制真空泵的抽速. 为了保证在获得真空和暴露大气过程中 MPPAC 的安全, MPPAC 与真空室之间设一个连通阀. 真空室设置一气压传感器和一全量程真空规, 分别监测  $10^2 \sim 10^5\ \text{Pa}$  范围的气压和  $10^2 \sim 10^{-7}\ \text{Pa}$  范围的真空度. MPPAC 采用流气式工作方式, 气体稳压系统的细节如文献 [4] 中描述. MPPAC 的入气口通过电磁阀、减压阀与工作气体存储罐连接. 出气口通过高精密度针阀与真空泵连接. 用气压传感器测量 MPPAC 的气压, 通过绝对气压计将测量结果反馈给电磁阀控制单元, 控制单元比较反馈气压与设置气压, 控制电磁阀气体流量, 实现动态稳定 MPPAC 的工作气压. 该系统气压稳定度在  $\pm 10\ \text{Pa}$  之内.

测试 MPPAC 使用的电子学框图如图 2 所示. 测试时, MPPAC 阳极加正电压, 阴极加负电压, 位置栅极在电阻串两端通过  $2\ \text{k}\Omega$  电阻接地.  $x$  栅极在  $200\ \Omega$  电阻串两端各引出 1 个信号  $x1$  和  $x2$ .  $y$  栅极也同样引出  $y1$  和  $y2$  信号. 它们经电荷灵敏前置放大器, 能量放大器和延迟展宽器进入 CAMAC ADC. 同样地, Si 半导体探测器能量信号也进入 ADC. PPAC 的选通信号由阳极得到, Si 探测器选通信号从其电荷前放输出分路取得, 它们经过各自的甄别, 成形和延迟线路, 送到符合单元的输入端, 根据测量内容设置符合单元的符合模式. 符合单元输出延迟后作为 CAMAC ADC 的门信号.

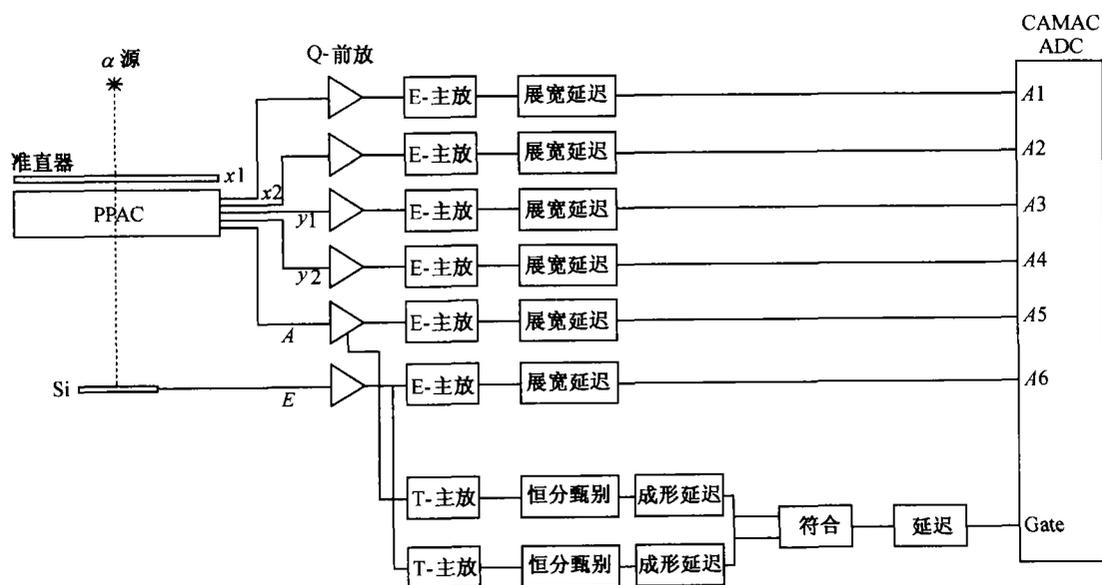


图2 MPPAC 性能测试电子学框图

## 2.1 阳极信号幅度-阳极电压和阴极电压变化曲线

首先, 测试 MPPAC 阳极信号输出幅度随阳极电压和阴极电压的变化, 从而选取合适的工作条件. 测试程序如下: 工作气压分别为 650, 400, 200 Pa. 在每一工作气压下, 先将阴极电压 ( $V_c$ ) 取一固定值, 改变阳极电压并测量阳极信号幅度-阳极电压变化曲线. 再将阳极电压固定一定值 ( $V_a$ ), 改变阴极电压, 测量阳极信号幅度-阴极电压变化曲

线. 图 3 给出气压在 650 和 400 Pa 的阳极信号幅度随阳极、阴极电压变化曲线. 从图中看到, 在 650 Pa,  $V_a = +400$  V,  $V_c = -350$  V 时, MPPAC 具有较高增益, 离连续放电电压还有较大距离, 可保证稳定工作. 在 400 Pa, 我们选定  $V_a = +300$  V,  $V_c = -300$  V. 在 200 Pa,  $V_a = +250$  V,  $V_c = -250$  V.

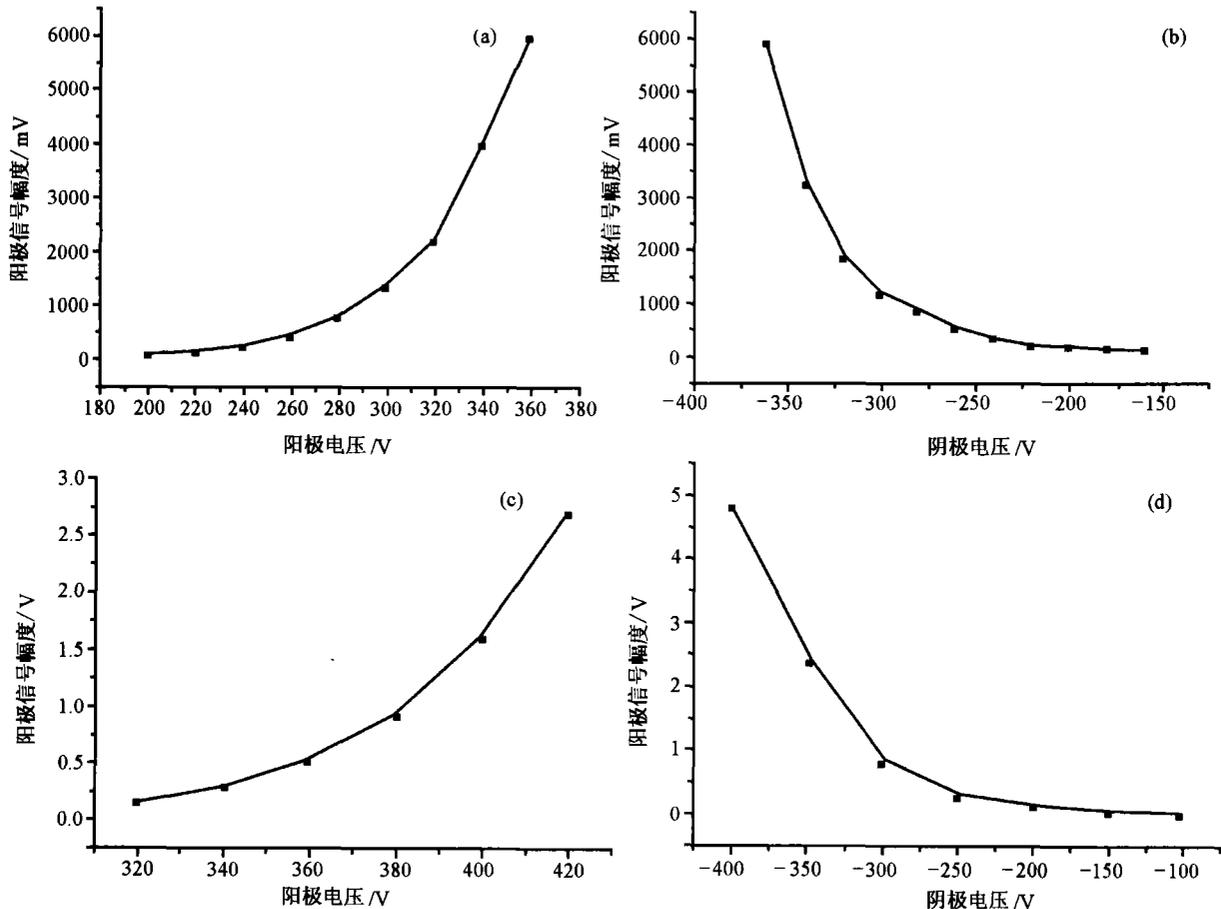


图 3 不同气压下, 改变阳极和阴极电压得到的坪曲线

(a) 气压 400 Pa,  $V_c = -300$  V; (b) 气压 400 Pa,  $V_a = +300$  V; (c) 气压 650 Pa,  $V_c = -350$  V; (d) 气压 650 Pa,  $V_a = +400$  V

## 2.2 位置分辨

MPPAC 位置采用电荷分除法读出. 对于入射粒子的  $x$  位置和  $y$  位置, 分别从  $x$ ,  $y$  栅极电阻串两端输出信号  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ , 根据电荷分除公式

$$x = \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2}$$

$$y = \frac{y_1 - y_2}{y_1 + y_2}$$

推出. 但是, 使用公式的前提条件,  $x_1$  和  $x_2$ ,  $y_1$  和  $y_2$  的电子学及 ADC 的变换斜率和零点道必须相同. 这在实际实验中是很难达到的. 一个替代的办法是通过精密脉冲器校正各路电子学放大倍数相对关系, 调整电子学输出直流电位使得零点道为零. 这样就可以在各路放大倍数不一致的情况下, 通过归一化处理, 计算入射粒子的  $x$ ,  $y$  位置.

测量位置分辨时, 在 MPPAC 前加一块厚 8 mm

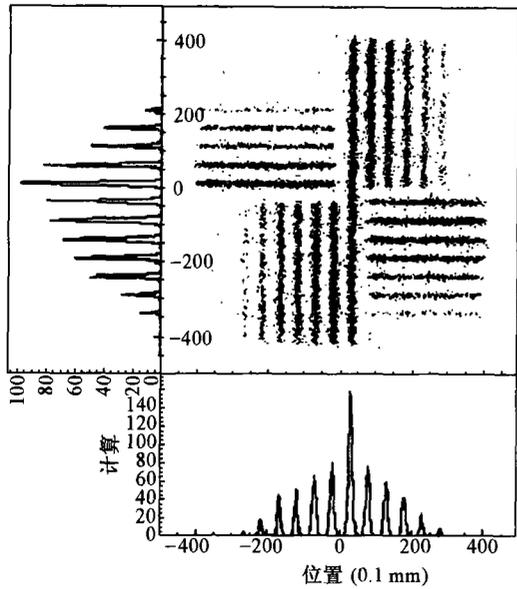


图4 3组分 $\alpha$ 源通过准直器, 在MPPAC上测量的位置图谱

特别设计的不锈钢准直器, 准直器狭缝按坐标轴分4象限, 第1, 3象限准直器按 $y$ 方向分布, 第2, 4象限按 $x$ 方向分布. 狭缝宽1 mm, 中心间隔5 mm.

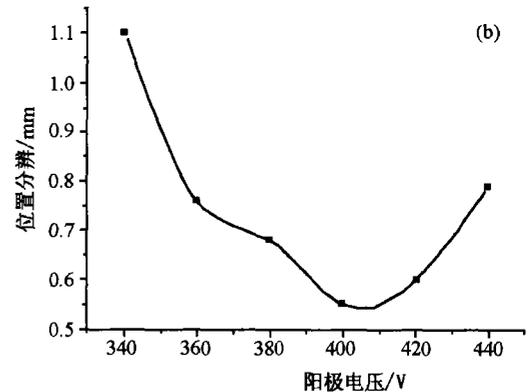
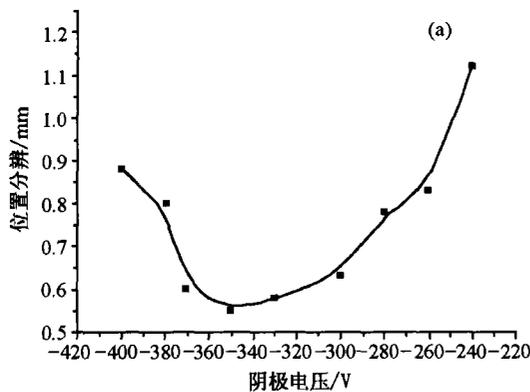


图5 MPPAC在650 Pa异丁烷, 位置分辨与阳极电压 $V_a$ 和阴极电压 $V_c$ 的关系

(a)  $V_a = +400$  V, 位置分辨- $V_c$ 曲线, (b)  $V_c = -350$  V, 位置分辨- $V_a$ 曲线

使用异丁烷, 在650 Pa,  $V_a = +400$  V,  $V_c = -350$  V, 电子学成形时间常数 $0.5 \mu\text{s}$ 时, 3组分 $\alpha$ 源通过准直器, 在MPPAC上测量的位置散布图如图4所示.  $y$ 方向和 $x$ 方向一维位置谱分别被示于图的左部和下部. 从测量数据推算出位置分辨 $\sim 0.55$  mm(fwhm).

**2.2.1 位置分辨随阳极和阴极电压的变化** 选择异丁烷为工作气体, 在650 Pa气压下, 我们测试了MPPAC位置分辨随电压变化的关系(图5). 阳极电压固定+400 V, 改变阴极电压测得的位置分辨随阴极电压变化的曲线如图5(a)所示. 固定阴极电压-350 V, 改变阳极电压测得的位置分辨随阳极电压变化的曲线如图5(b)所示. 我们发现, 当阴极电压为-350 V, 阳极电压为+400 V时, 位置分辨达到最佳, 为0.55 mm(fwhm). 显然, 从2.1节阳极信号幅度随阳极和阴极电压变化曲线可以得到解释:  $V_a$ 低于+400 V时, MPPAC增益较小; 高于+400 V时, 增益过高并有放电现象. 同理,  $V_c$ 低于-350 V, 增益过高伴随打火现象; 高于-350 V, 增益较小, 信噪比变差.  $V_a = +400$  V,  $V_c = -350$  V附近, 位置分辨最好.

**2.2.2 工作气压对位置分辨的影响** 对于MPPAC, 我们也研究了它的位置分辨随工作气压的变化. 在400 Pa气体下, 阳极电压+300 V, 阴极电压-300 V下, 位置分辨为0.64 mm(fwhm). 在200 Pa, 阳极电压+300 V, 阴极电压-250 V, 得到了位置分辨为1.13 mm(fwhm). 比较3种工作气压, 相对来说400和650 Pa都是比较好的工作气压, 当气压过低时, 由于信噪比值变小, 从而分辨变差.

**2.2.3 时间常数对位置分辨的影响** 测试MPPAC性能过程中发现, 位置路电子学成形时间常数对位置分辨也有一定影响. 在650 Pa气压和最佳工作电压下, 改变主放大器的成形时间常数, 得到的位置分辨如表1所示. 从表中可以看出, 在 $0.5 \mu\text{s}$ 成形时间, 位置分辨最好, 达到0.55 mm(fwhm). 随着成形时间的增大, 位置分辨有变差的趋势.

### 2.3 MPPAC 的探测效率

表1 位置分辨与时间常数的关系

时间常数/ $\mu\text{s}$	0.5	1.0	2.0	3.0	6.0
位置分辨(fwhm)/mm	0.55	0.58	0.63	0.64	1.04

表2 工作气压对探测效率的影响

工作气压/Pa	200	400	650	950	1500
探测效率/%	99.2	99.3	99.2	99.4	99.3

如图2所示,当用Si半导体探测器单举作为CAMAC ADC数据获取的选通信号时,就可以测试MPPAC的探测效率.具体测量是这样进行的,在Si半导体探测器能谱上设定范围,积累MPPAC阳极谱.MPPAC探测到的有效事件数为 $N_{\text{MPPAC}}$ ,Si半导体探测器能谱设定范围内计数 $N_{\text{Si}}$ .MPPAC的探测效率 $\eta = \frac{N_{\text{MPPAC}}}{N_{\text{Si}}}$ .对于3组分 $\alpha$ 源,在不同气压的最佳工作电压下,测试的探测效率结果如表2所示.从表中看出,当气压在200~1500 Pa之间变化时,探测效率基本上不变,均大于99.2%.

### 2.4 位置线性

原则上,从使用位置分辨测量时使用的准直器测量的位置双维谱上,可以提取位置线性信息.为

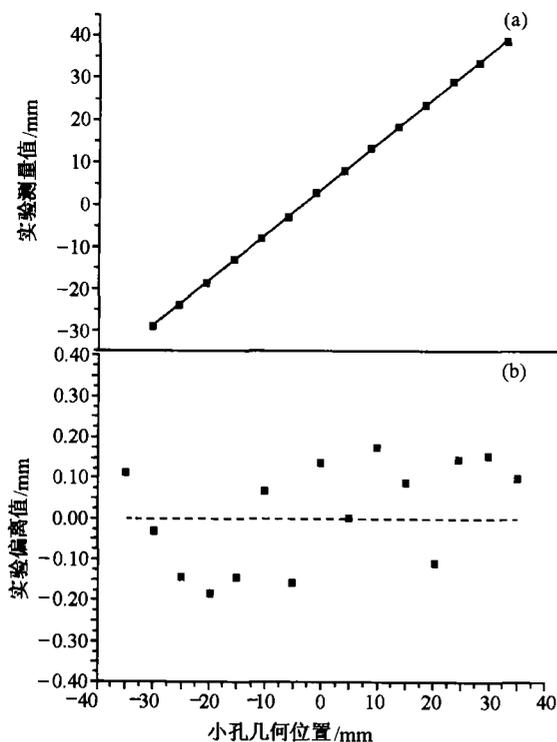


图6 MPPAC 位置线性及线性偏离

了测量MPPAC整个灵敏面积上的位置线性,我们使用一个 $19 \times 19$ 矩阵分布光阑替代准直器.光阑孔为 $\Phi 1 \text{ mm}$ ,中心距离 $5 \text{ mm}$ .在测量的 $x, y$ 位置分布散点图上,分别在每一行设窗,得到19个 $y$ 值一定, $x$ 峰位-孔中心几何位置曲线,由此得到延 $x$ 方向线性及其线性偏离.类似地,分别在每一列上设窗,就得到19个 $x$ 值一定, $y$ 峰位-孔中心几何位置曲线,从而得到沿 $y$ 方向位置线性及其线性偏离.图6给出了其中一条位置谱峰位-孔几何中心线性图6(a)与线性偏离图6(b).在 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 灵敏面积内,经测试得到线性偏移在 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 之内,这样的离散基本上与矩阵分布孔的加工精度相当(矩阵分布光阑孔是人工划线,工人细心在钻床上钻制而成).因此,MPPAC的位置线性远好于 $\pm 0.2 \text{ mm}$ .

### 2.5 MPPAC 的等效厚度和能损

测量MPPAC等效厚度按3个步骤进行.首先,用Si探测器直接测量3组分 $\alpha$ 粒子能谱.然后,将MPPAC放置在3组分 $\alpha$ 源与Si探测器之间,MPPAC内部处于真空状态,Si探测器测量通过MPPAC的3组分 $\alpha$ 粒子能谱.最后,将MPPAC充异丁烷到650 Pa,测量3组分 $\alpha$ 粒子能谱.对于 $^{239}\text{Pu}$ 的 $5.155 \text{ MeV}$   $\alpha$ 粒子,穿过未充气的MPPAC探测器后能量为 $2.215 \text{ MeV}$ ,能量损失为 $2.940 \text{ MeV}$ ;穿过650 Pa的异丁烷气体,在MPPAC探测器内气体中的能量损失为 $132 \text{ KeV}$ .从而得到MPPAC和内部650 Pa异丁烷的等效厚度分别为 $14.9 \mu\text{m}(\text{Al})$ 和 $0.5 \mu\text{m}(\text{Al})$ .

## 3 结果和讨论

综上所述,为RIBLL新设计研制的MPPAC经测试,位置分辨达到 $0.55 \text{ mm}$  (fwhm),在整个 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 灵敏面积上,线性色散远好于 $\pm 0.2 \text{ mm}$ ,探测效率 $>99.2\%$ .

先前我们报道了传统3电极结构PPAC,在700 Pa异丁烷和 $\text{C}_3\text{F}_8$ 工作条件下,位置分辨分别为 $0.76$ 和 $0.64 \text{ mm}$ .由此可见,MPPAC的位置分辨明显好于传统PPAC.

总之,我们研制的MPPAC的位置分辨、线性、探测效率等性能指标相当好,是一种具有高性能的多极平行板雪崩探测器.优越的性能主要来源于二次雪崩带来的高增益.因此,它很适合探测较高能量较轻粒子.探测较重粒子时,应将工作气压和工

作电压降低. MPPAC 的另一个明显优点是工作电压较低, 工作安全稳定.

但需要指出, 这种结构的 PPAC, 由于它的高增益, 它的计数率能力较传统 PPAC 低. 此外, MPPAC 较传统 PPAC 增加 2 个电极, 增加了粒子能量损失, 提高了探测阈, 对探测低能重离子不利.

### 参 考 文 献

- 1 Sawan D, et al. A simple two-dimensional PPAC. Nucl Instr Meth, 1994, A348: 314
- 2 Kumagai H, et al. Delay-line PPAC for high-energy light ions. Nucl Instr Meth, 2001, A470: 562
- 3 Zhan W L, et al. Radioactive ion beam line in Lanzhou. Science in China, Ser A, 1999, 42(5): 529
- 4 王 猛, 等. 不同工作气体对 PPAC 性能的影响. 高能物理与核物理, 2002, 26(12): 1285
- 5 Freeman C G, et al. New focal plane detector system for the rochester recoil mass spectrometer. Nucl Instr Meth, 1995, A357: 450
- 6 Assamagan K, et al. Time-zero fission-fragment detector based on low-pressure multiwire proportional chambers. Nucl Instr Meth, 1999, A 426: 405
- 7 Chinmay Basu, et al. Performance of a position sensitive low-pressure wire chamber(LPWC) having position readout from a separate sense wire plane: A critical analysis. Nucl Instr Meth, 2002, A 484: 407

## 我国介孔材料合成研究领域取得重要进展

复旦大学化学系分子催化与先进材料实验室赵东元教授领导的研究组在介孔材料合成研究领域取得重要进展. 最新一期的《Nature Materials》(2003, 2: 159)刊登了由此研究组完成的, 题为《Self-adjusted synthesis of ordered stable mesoporous minerals by acid-base pairs》的研究论文. 该刊物封面也采用了本研究论文中的一幅彩图.

该工作针对介孔材料合成领域中非氧化硅介孔材料稳定性差、难以合成、无法调变组成等重要问题, 首次提出了以酸-碱反应配对的无机前驱物出发, 在非水体系中“自我调节”来合成介孔分子筛材料的新理论. 该理论考虑了“无机-无机”物种之间的相互作用, 将简单的“酸碱对”理论引入非水条件下的无机物种的反应, 开拓了新的“溶胶-凝胶”化学反应. 在该理论指导下, 赵东元教授等成功地合成了一大批高度有序排列的、多种结构的金属氧化物介孔材料, 这些新材料具有单一分布超大孔径的、极高的表面酸性和导电性能, 在催化、分离等重要的化工领域, 甚至在半导体、传感器、药物输运、光电微器件等高新技术领域具有广泛的应用前景. 该“酸碱对”理论有广泛的适应性, 不仅可以应用到介孔材料的合成, 调变其组成和结构, 合成出一大批高质量的单一氧化物、混合氧化物、磷酸盐、硼酸盐组成的介孔材料等, 而且可以大大扩展“溶胶-凝胶”化学过程, 预示着该理论在膜材料、纤维材料等方面有广阔的应用前景. 这些结果表明, 我国介孔材料的合成研究已处于这一领域的前列.

(供稿: 杨俊林)