

用于超灵敏小型迴旋加速器质谱计的微通道板粒子探测器*

张映箕 魏永钦 王秋玉 钱文国 张锡麟 陈茂柏

(中国科学院上海原子核研究所)

我们制造并测试了为超灵敏小型迴旋加速器质谱计研究设计的单粒子探测系统。探测器由 Al_2O_3 打拿板、微通道板电子倍增器和阳极三部分组成。入射离子沿 80° 角方向轰击打拿板,以0.8电子/keV的转换系数产生数目与离子能量成正比的次级电子,每个电子在不同的通道管内单独放大至饱和,阳极收集的电荷数与入射离子能量成正比。用选择甄别阈的方法可以有效地将离子计数与本底分开。从实测数据外推到40keV K 或 Ar 离子时可知:相应于90%计数效率的本底率为 $10^{-3}/\text{s}$ 。探测系统的能量分辨 $\Delta E=6.5\text{keV}$,可以用于测量极低能量的重离子谱。

关键词:微通道板 探测器 效率 本底

一、引言

七十年代迅速发展起来的加速器质谱计(AMS)已成为离子束分析的一门新技术^[1-3]。一种设备简单、灵敏度高的新型低能($\sim 40\text{keV}$)迴旋加速器质谱计正在贝克莱实验室^[4]和上海原子核研究所研制。AMS 要求与之相接的探测器具有足够高的灵敏度和最大限度地抑制本底的能力。如为了用 ^{14}C 测定三万年左右的样品的年代,要求样品计数率为 $10^{-2}/\text{s}$ 量级时,本底计数率必须低于 $10^{-3}/\text{s}$ 。和小型迴旋加速器 AMS 相配的探测器还必须能够探测极低能量($< 40\text{keV}$)的重离子,所以应该是无窗、无死层的高灵敏高效率低本底探测器。

贝克莱小组^[5]已经研制成了和他们的加速器相匹配的微通道板粒子探测器。对40keV的重离子,探测效率为90%时本底计数率小于 $10^{-3}/\text{s}$ 。本文介绍我们为正在研制的小型迴旋加速器质谱计制作的粒子探测系统。探测器由 Al_2O_3 打拿板、微通道板电子倍增器和阳极组成,对24keV的重离子,探测效率为80%时本底计数率为 $2 \times 10^{-3}/\text{s}$ 。

二、原理和结构

对于40keV的低能重离子,至今没有成熟的探测器可供使用。常用于鉴别带电粒子的是 dE/dx 望远镜方法,不论对固体还是气体探测器,40keV重离子的射程都小得不能穿过最薄的 ΔE 探测器;法拉第筒不能用来测量单个离子;具有分离式打拿板的电子倍增管的暗电流太大,在曝露大气后需要重新激活;面垒型半导体探测器的死层厚得足以阻止40keV的重离子;微通道板电子倍增器^[6-9]可用来直接探测重离子,它可以曝露大气而不要求再激活。然而简单的微通道板电子倍增器对即使很高能量的离子,产生的信号幅度和电子、光子乃至暗噪声比信号相近,要提高信号噪声比几乎不可能。

微通道板(MCP)探测器以两步放大模式工作。首先离子打在打拿板上产生数目与能量成

* 本工作由国家自然科学基金资助

正比的次级电子,然后微通道板把每个电子分别放大约 10^7 倍,形成饱和输出。阳极收集到的总电荷数与次级电子数成正比,因而也与入射离子的能量成正比。电子、光子和本底离子在打拿极上只产生很少几个电子,容易用能谱甄别方法把它们与离子谱分开。

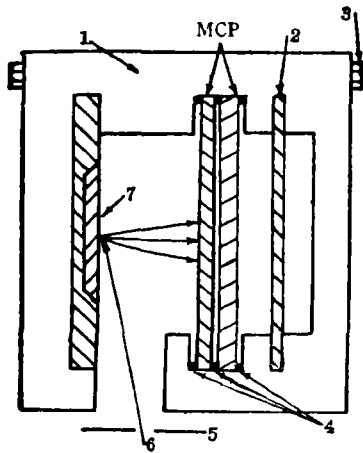


图1 探测器的结构示意图

1. 聚四氟乙烯支架 2. 阳极 3. 固定螺母
4. 电接触环 5. 准直器 6. 束流 7. 打拿极

Fig. 1 Schematic drawing of the detector

1. PTFE holder 2. Anode 3. Screw 4. Connection rings 5. Slit 6. Beam 7. Dynode

略有不同。实验表明^[5],对本工作所述能区的最佳范围是 $78^\circ - 82^\circ$,本装置选取 $\sim 80^\circ$ 为入射角。

MCP是单通道电子倍增器的阵列,用铅玻璃制成。每个通道独立地放大射到管壁上的电子,放大倍数为 $10^4 - 10^5$ 。我们选用中国科学院电子研究所生产的36mm直径的P88-型MCP,两块MCP串联使用以得到更高的增益。为了防止电子返回,两块MCP的通道布置成 Λ 形。

阳极是一块铜板,信号线从边缘引出。打拿极和MCP的输入面之间的距离为15mm,MCP的输出面和阳极相距5mm,用聚四氟乙烯支架固定。

三、性能测验

探测器的打拿极、MCP的输入和输出面及阳极处于四个不同的电位,总电位差约2.6kV。为了便于和加速器匹配,MCP输入端的零电位不直接接地。图2是探测器的电压分配和电子学方框图。阳极信号经1000pF的隔直电容送到线性放大器,放大器输出进入多道分析器作能谱分析。加在MCP两端的电压高得使其处于脉冲计数的工作状态,单个电子的输出脉冲约0.2V,可以不用前置放大器。

探测器在 1.3×10^{-4} Pa的真空室内工作。我们测量了下述各项性能。

1. 单电子脉冲高度分布

用高压汞灯产生的波长为365nm的紫外光(NV)通过一个1mm直径的窗照射打拿极,产生能量为几个eV的光电子,光强度使电子产额为每秒几百个。单电子谱示于图3。 $V_m = 2$ kV时,谱的FWHM对平均值是 $(74 \pm 6)\%$,对峰值是 $(87 \pm 7)\%$,均好于贝克莱的值(分别为85%和106%)。

探测器由打拿极、微通道板和阳极三部分组成,结构如图1所示。打拿极的功能是使每个入射离子打来后产生尽可能多的次级电子。它用2mm厚的纯铝(99.9%)制成,抛光呈镜面,在电解槽内通微电流缓慢氧化数日,或在空气中自然氧化半年以上,形成很薄的 Al_2O_3 灵敏层。灵敏面积为 15×20 mm²镶嵌在 $\phi 36$ mm的铝板中心,共同构成电极。这种打拿极能探测正、负离子,中性原子和分子。因为存在附加电子,负离子的电子产额更高^[10]。次级电子的动能仅几个eV,在金属中的逸出厚度约1nm。如果离子在打拿极中的射程的正切值大于1nm,则一部分次级电子不能逸出而损失总产额。换言之次级电子的产额与离子的入射角有关^[11]。对不同能量的不同离子,入射角和电子产额的关系

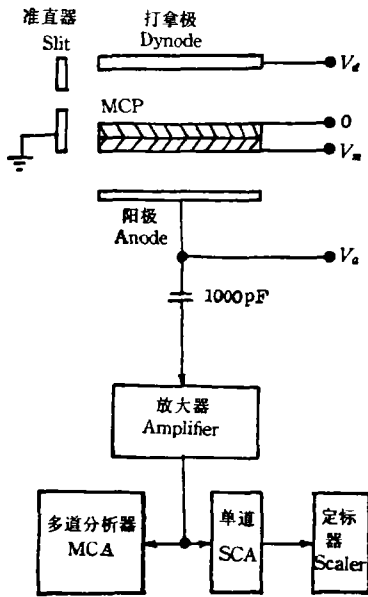


图2 探测系统和电子学方框图

Fig. 2 Schematic diagram of the equipments showing typical operating voltages

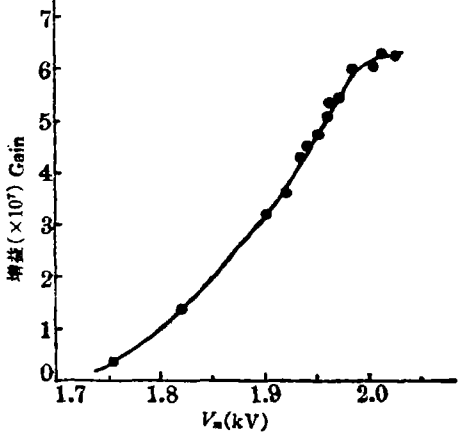


图4 增益—Vm 关系曲线

Fig. 4 Gain vs microchannel-plate voltage

2. MCP 的增益特性

电子倍增器的绝对增益对 V_m 的关系曲线对于用次级电子数刻度离子的脉冲高度分布是必不可少的，也可用来计算不同增益下的最大允许计数率。

$V_m = 2\text{kV}$ 时阳极收集 NV 产生的电子的输出电荷分布的平均值是 $(6.4 \pm 0.4) \times 10^{-12}$ C, 由此得出 MCP 的增益为 4.0×10^7 。增益与 V_m 的关系曲线示于图 4。 $V_m > 1980\text{V}$ 时，增益趋于饱和。

3. 暗噪声分布

暗噪声是探测器本底的下限。MCP 的暗噪声主要来自微通道板的暗电流、直接射到 MCP 上的 X 射线和 γ 射线、宇宙射线及高压放电等。与 MCP 的输出信号相比，放大器的噪声可

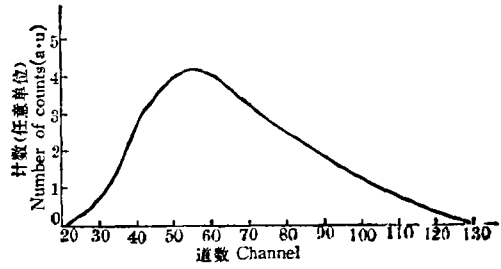


图3 单电子的脉冲高度分布

$$V_m = 2\text{kV}$$

Fig. 3 Pulse-height distribution in response to single electrons from the dynode

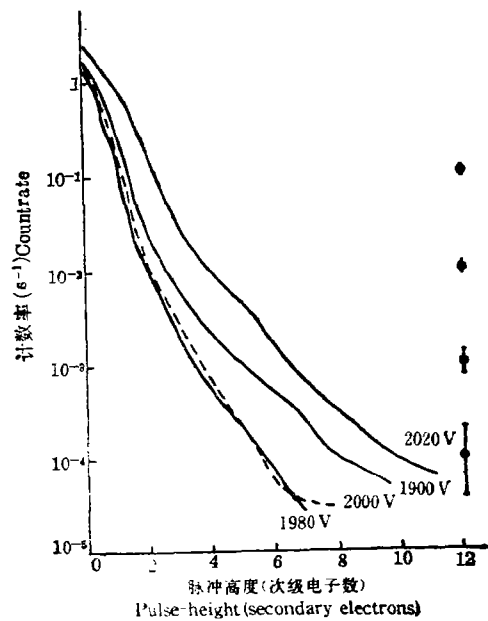


图5 不同的 Vm 下的暗噪声分布

Fig. 5 Pulse-height distributions of dark noise at various V_m values

以忽略。图5给出了不同 V_m 下的暗噪声分布，横坐标是由脉冲幅度和单电子谱相比得出的次级电子数。尽管不能完全排除统计误差的影响，仍能看出当 V_m 从 1900V 增加到 1980V 时暗噪声计数率明显降低，当 V_m 从 2000V 变到 2020V 时计数反而增加。1980—2000V 是最佳工作范围。这可能是由于 V_m 低时单电子分布的饱和程度不够而 V_m 太高时存在更多由电场引起的电子发射。以下的测量除专门注明者外都在 $V_m = 1980V$ 下进行。

V_d 为负高压时，打拿极上产生的次级电子的贡献使本底水平明显升高，此即实际的探测器本底。

4. 离子信号的脉冲高度分布和甄别特性

我们测量了 24keV 的 ^{39}K 和 ^{40}Ar 及 15keV 的 ^{39}K 正离子的脉冲高度分布。离子束由上海原子核研究所的同位素分离器提供，流强为 $10^{-2}nA$ 。显然，MCP 不能承受这样大的流强，为此在打拿极前束流线上置一个 1mm 直径的限流孔，使射向打拿极的流强小于 1000 离子/s。在准直器后面放一块 3mm 厚的铅板，屏蔽在准直器上产生的 X 射线。

在选定的最佳条件下测得的能谱示于图 6。24keV 的 K 和 Ar 的谱形差别甚小，相比之下 ^{39}K 的分辨率略好，本底略低。这可能和同位素分离器的运行状况有关。两个谱的峰都位于 19 个次级电子的位置，表明打拿极的电子转换效率高达 $\gamma \sim 0.8$ 电子/keV。K 离子谱的 FWHM 为 27%。在本底和能谱间有很宽的平谷，有利于用甄别法扣除本底。与贝克莱^[5]的结果相比，我们的离子谱的高电子数端较陡，而另一端较缓，这可能是前面提及的 X 射线本底的迭加。用于 AMS 时，流强小 (10^{-2} Ion/s)，且全是待测同位素离子，产生的 X 射线本底很少，不可能迭加到较高幅度。15keV 的 ^{39}K 的峰位明显左移，显示出正确的能量关系。

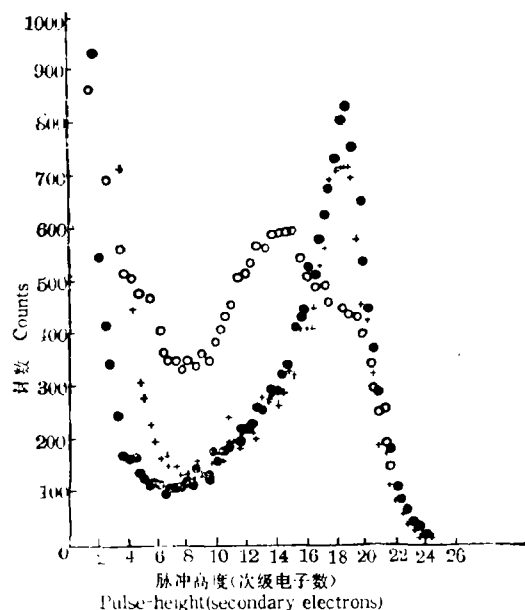


图6 ^{39}K 和 ^{40}Ar 离子的脉冲高度分布

$V_d = -300V$, $V_m = 1980V$, $V_a = 2280V$

○ 15keV ^{39}K ● 24keV ^{39}K + 24keV ^{40}Ar

Fig. 6 Pulse-height distributions for ^{39}K and ^{40}Ar ions

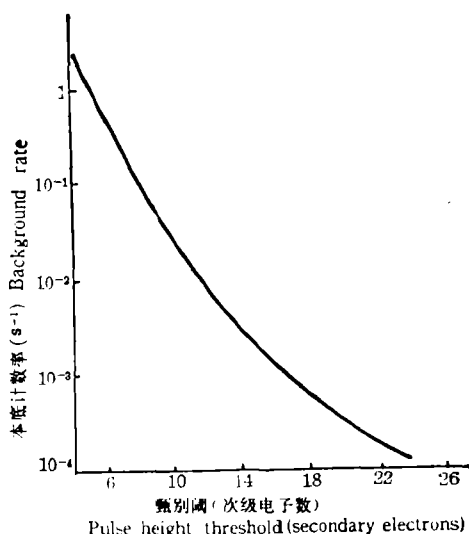


图7 本底分布

测量时间: 8000s, 条件同图6

Fig. 7 Background distribution with a measurement time of 8000s

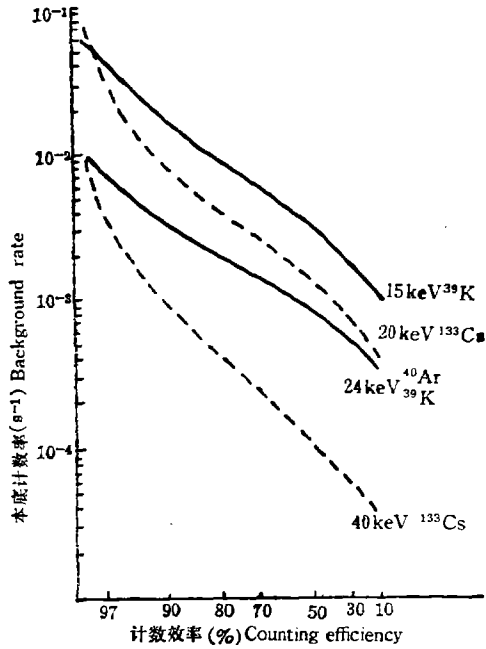


图8 本底—效率关系曲线(实线为本工作, 虚线为贝克莱的结果^[5])

Fig. 8 Background VS counting efficiency
—This work, ----Ref. [5]

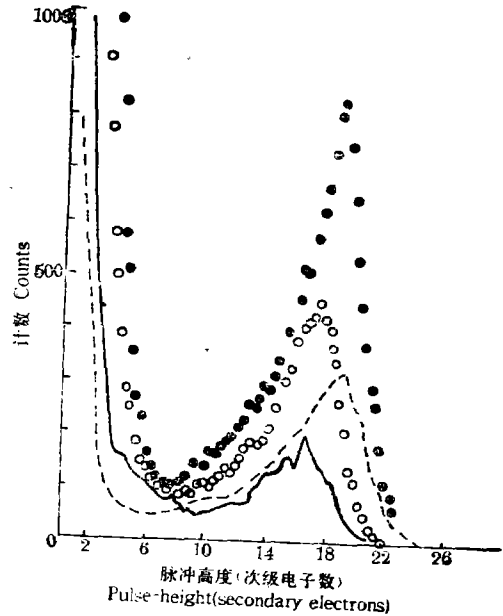


图9 不同打拿极电压下 24keV 的 ³⁹K 离子的脉冲高度分布

	V_a (V)	分辨率(%) Resolution	峰谷比 Peak to valley ratio
—	800	31	2.8
○	500	27	5.8
●	300	27	8.3
...	250	30	8.3

Fig. 9 Pulse-height distribution of 24keV ³⁹K ions at different V_a

图 7 是在与图 6 相同的条件下测量的本底分布。选取一系列甄别阈, 从图 7 求出每个阈以上的积分计数, 从图 6 求出相应的阈上积分值并得到计数效率, 所得的本底—效率曲线示于图 8。对 24keV 的 ³⁹K 和 ⁴⁰Ar 曲线基本重叠, 效率为 99% 时本底率为 $10^{-2}/s$, 效率为 80% 时本底为 $2 \times 10^{-3}/s$, 60% 时降到 $10^{-3}/s$ 。图 8 同时给出了贝克莱^[5]的 20keV 和 40keV 的 ¹³³Cs 的效率—本底曲线。我们的 24keV 的曲线介于贝克莱的两条曲线之间, 15keV 的则在其 20keV 的曲线上面, 表明我们的系统本底水平与贝克莱的一致, 不过我们的系统在高效率端 ($>80%$) 本底比贝克莱的低, 而当效率 $<60%$ 时, 贝克莱的本底较低。这意味着我们的探测器自身的噪声较低, 而如电源波动或系统放电等因素产生的大幅度的本底计数率较高。

5. 打拿极电压的选择

厂家生产 MCP 时选择材料的一个重要参数是二次电子发射系数。P88-型 MCP 的二次电子发射系数在入射电子能量为 300eV 时有最大值 $\sigma = 3.69$ ^[9]。在 $V_m = 1980V$, $V_a = 2280V$ 下观测了 24keV 的 ³⁹K 离子的脉冲高度分布随 V_a 的变化, 结果示于图 9。 V_a 从 820V 降到 300V 时, 本底单调降低, 能谱的峰位增大, 而 $V_a = 250V$ 时分辨率变差。 $V_a = 300V$ 的谱分辨率最好, 峰谷比最大, 为最佳值, 与文献[9]的结果一致。

MCP 的输出端和阳极之间的电压差在 300—500V 之间不影响能谱形状和本底分布。

四、讨论和结论

实验测试证明我们的探测系统能够探测15—24keV能量的重离子。对24keV的³⁹K和⁴⁰Ar,效率为80%时本底计数率为 $2 \times 10^{-3}/s$ 。这个系统的本底水平与贝克莱实验室的相同,但能量分辨更好。将我们的结果和贝克莱的联合外推得出结论:对40keV的重离子,当计数效率为90%时,本文所述系统的本底计数率可达到 $1 \times 10^{-3}/s$,能够满足超灵敏小型迴旋加速器质谱计的使用要求。系统的能量分辨本领为6.5keV,可以用于极低能量(10—几百keV)的重离子的能谱测量。

探测器曝露大气之后不需任何处理可以重新使用,性能没有变化。但必须在高真空下放置数小时后才可加高压。系统有长时间工作的稳定性,8h内观察不到明显的能谱变化,但必须保证高压电源的长时间工作的稳定性好于0.1%。

探测器对加速器产生的X射线和环境中的 γ 射线本底灵敏,可以在不降低探测效率的前提下适当选择甄别阈予以消除。采取适当的屏蔽措施,可以防止本底叠加成大幅度的信号。如果将探测器放置在加速器的屏蔽壳内,磁场将影响探测器的性能。6mm厚的铁屏蔽体足以把磁场减少到远小于不灵敏的上限 $0.01T^{[5]}$ 。

感谢高文照和邹志宜同志给予的协助。

参 考 文 献

- [1] R. A. Muller, *Science*, **196** (1977), 489.
- [2] A. E. Litherland, *Nucl. Instr. Meth.*, **B5** (1984), 100.
- [3] T. S. Mast and R. A. Muller, *Nucl. Sci. Appl.*, **1** (1980), 7.
- [4] J. J. Welch, et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **B18** (1987), 202.
- [5] G. Peter Friedman et al., *Rev. Sci. Instr.*, **59** (1988), 98.
- [6] N. R. Daly, *Rev. Sci. Instr.*, **31** (1960) 264.
- [7] B. W. Ridley, *Nucl. Instr. Meth.*, **14** (1961), 231.
- [8] J. Adams and B. W. Manley, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, **NS 33** (1966) 88.
- [9] 张多明等, *电子学通讯*, **4**(1982),60.
- [10] L. A. Dietz and L. R. Hanrahan, *Rev. Sci. Instr.*, **49** (1978), 1250.
- [11] L. A. Dietz and J. C. Sheffield, *Rev. Sci. Instr.*, **44** (1973), 183.

A microchannel-plate detector for high-sensitivity small cyclotron mass spectrometry

Zhang Yingji Wei Yongqin Wang Qiuyu Qian Wenguo
Zhang Xilin Chen Maobo

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica)

Abstract

A particle detector designed for the high-sensitivity small cyclotron mass spectrometry was made and tested. The detector consists of an Al_2O_3 conversion dynode, a microchannel-plate electron multiplier and an anode. Each ion that strikes the dynode at 80° angle ejects a few tens of secondary electrons, which enter separate channels of the microchannel-plate and are then independently multiplied to a saturated pulse height. The charge collected by

the anode is proportional to the ion energy. This permits a pulse-height discrimination against background. Data taken in an isotope separator are extrapolated and the background rate is found to be lower than $10^{-3}/s$ at 90% efficiency for 40keV K or Ar ions. The energy resolution of the detector is 6.5keV, suitable for the spectrum measurement of very low energy ions.

Keywords: Microchannel plate Detector Efficiency Background

(1990年1月8日收到)