

文章编号: 1007-4627(2012)04-0425-05

# 平行玻璃板对 105 keV Ar<sup>7+</sup> 离子的导向效应

刘俊亮<sup>1,2</sup>, 薛迎利<sup>1</sup>, 于得洋<sup>1</sup>, 武晔虹<sup>1,2</sup>, 陈婧<sup>1,2</sup>, 杜凡<sup>1,2</sup>, 张明武<sup>1</sup>,  
阮芳芳<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 李锦钰<sup>1</sup>, 王平志<sup>1</sup>, 康龙<sup>1</sup>, 蔡晓红<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 研究了平行玻璃板对高流强(约 80 nA)105 keV Ar<sup>7+</sup> 离子的导向效应, 利用一维位置灵敏探测器测量了不同倾斜角下出射离子的强度及角分布。实验结果表明, 平行玻璃板对 Ar<sup>7+</sup> 离子有导向作用。与离子在微孔膜中的导向效应不同, 从平行玻璃板出射的 Ar 离子角分布的 FWHM 随着倾斜角的改变而改变, 并且出射离子角分布最大值处对应的观察角不等于倾斜角。

**关键词:** 高电荷态离子; 导向效应; 平行玻璃板

**中图分类号:** O562.5 **文献标志码:** A

## 1 引言

近年来, 高电荷态离子与绝缘毛细管的相互作用一直受到人们的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。2002 年, Stolterfoht 等<sup>[6]</sup>研究了 3 keV Ne<sup>7+</sup> 离子与纳米尺寸毛细管(PET 微孔膜)的相互作用, 观察到了明显的导向效应: 即当改变微孔膜的倾斜角时, 出射离子角分布的中心位置也随之移动, 并且出射离子角分布中心位置处的角度恰好等于微孔膜的倾斜角, 出射离子沿毛细管管轴方向出射。实验还发现, 穿过微孔膜的离子绝大部分保持了初始电荷态和能量。他们用毛细管的管内壁自组织充电效应很好地解释了这一实验现象。离子入射到绝缘毛细管内会在管壁内表面沉积正电荷, 形成有规律分布的电场, 从而阻止了后面入射的离子与管壁直接碰撞并把它们导出管外, 形成“导向效应”。这一现象很快引起了人们的广泛关注, 一系列与之相关的理论与实验工作也随即开展<sup>[7-11]</sup>, 这些实验中用到的毛细管有 PET, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> 和宏观玻璃毛细管等。目前, 微孔膜对低能高电荷态离子的导向效应研究开展较多, 其理论模型已经趋于成熟。宏观毛细管的尺寸比微孔膜中的纳米毛细管大得多, 电荷在其内表面的充放电过程将更为复杂。而且高质量宏观玻璃管的制作对

技术要求较高。目前对高电荷态离子与宏观毛细管的相互作用研究相对较少<sup>[12-13]</sup>, 其理论模型尚不完善。

本工作选用平行玻璃板与高电荷态离子相互作用体系来研究导向效应, 这样可以简化物理模型。由于离子入射圆柱形毛细管时, 在管内壁沉积的电荷将会沿整个毛细管内壁表面和管体扩散, 并且管内电场的边界条件不容易给出, 其物理模型比较复杂。而对于平行玻璃板, 由于两个板是分离的, 在其中一个板上沉积的电荷不会扩散到另一个板上, 电荷只会在该板的内表面和板体扩散。而且, 平行玻璃板的几何构型简单, 板间电场的边界条件易于给出, 这种情况的物理模型相对来说比较简单, 可以帮助人们更好的理解导向效应产生的物理机制。

## 2 实验装置和测量方法

本实验是在中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子综合研究平台 4 号终端完成的。实验装置示意图如图 1 所示。从平台引出的 Ar<sup>7+</sup> 离子束经过束线上的偏转和准直装置进入靶室, 然后经过一组光栏准直后入射玻璃板, 出射离子由距

收稿日期: 2012-03-09; 修改日期: 2012-03-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2010CB832901)

作者简介: 刘俊亮(1987-), 男, 山东济宁人, 在读硕士研究生, 从事原子与分子物理学研究, E-mail: liujunliang@impcas.ac.cn

通信作者: 蔡晓红, E-mail: caixh@impcas.ac.cn

靶架 240 mm 处的位置灵敏探测器(PSD)探测。该探测器为自行研制的 64 路位置灵敏法拉第筒<sup>[14]</sup>，其位置分辨率为 0.3 mm，相应的角度分辨为 0.07°。实验时，束线和靶室真空度维持在  $10^{-6}$  Pa，经过准直后的束斑直径为 2 mm，束流发散角小于  $\pm 0.2^\circ$ 。倾斜角  $\psi$  和观测角  $\varphi$  的定义如图 1 所示。

玻璃板被固定在转靶系统下方的靶架上，位置可以上下调节，同时还可以通过步进电机旋转靶架，以改变玻璃板的倾斜角，达到离子以不同角度入射。为了防止电荷在平行玻璃板正对束流的截面上沉积，影响后面的离子入射，在紧贴玻璃板入口的前方固定一个宽度为 0.8 mm 的金属狭缝。实验时，将转靶系统步进电机步长设为  $0.1^\circ$ ，因步进电机每次反向转动时都会产生回程差，严重影响实验结果，所以采用仅向一个方向转角度的方法测量。具体操作方法如下，先向左侧转角度直到信号消失，然后向右转角度逐个角度测量，测量直到右侧信号消失为止。定义探测到的信号最大值处对应的倾斜角为  $0^\circ$  角，即该处束流与玻璃板轴向方向呈  $0^\circ$  角。同时，在靶架上安装直径为 4 mm 的通孔，直接测量入射离子通过通孔在探测器上位置，与上述方法确定的  $0^\circ$  角束流在探测器上的位置比较，相互借鉴，以减少实验误差。结果表明，上述两种方法确定的  $0^\circ$  角对应探测器上的同一道(误差小于  $0.07^\circ$ )。

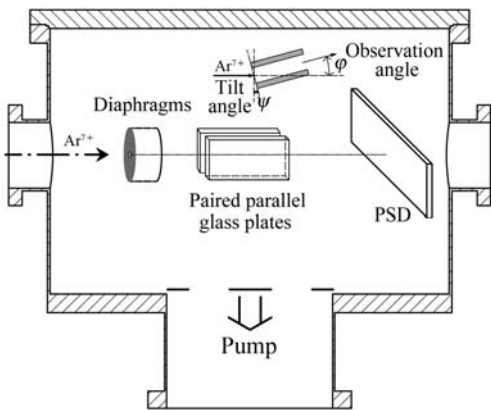


图 1 实验装置示意图

$Ar^{7+}$  离子束经过一组光栏准直后入射平行玻璃板，出射离子由位置灵敏探测器探测。

本实验采用能量为 105 keV 的  $Ar^{7+}$  离子束，从 0.8 mm 狭缝入射玻璃板的平均入射流强约为 80 nA。玻璃板材料为普通玻璃，长约 21 mm，厚度

3.8 mm，两板间距 1 mm。

### 3 实验结果与讨论

图 2 给出了  $Ar^{7+}$  离子入射平行玻璃板的传输效率随倾斜角的变化关系，图中数据误差主要来源于探测器系统的输出误差<sup>[15]</sup>。根据平行玻璃板的尺寸和间距可以算出其几何开角为  $\pm 2.45^\circ$ ，即倾斜角在  $\pm 2.45^\circ$  范围内都会有离子不与玻璃板内壁发生相互作用，直接沿入射方向出射；倾斜角大于  $2.45^\circ$  时，入射离子完全被玻璃板挡住。而实验中在  $\pm 3^\circ$  的范围内都探测到了信号，这说明平行玻璃板对离子有导向作用。定义传输效率  $\eta = I_{out}/I_{in}$ ，式中  $I_{in}$  为入射流强， $I_{out}$  为出射流强， $I_{out}$  为探测器各道测得的电流信号的总和。对于高电荷态离子在微孔膜中的导向实验，利用类高斯函数式(1)可以很好地拟合传输效率随倾斜角的变化关系。因此，利用方程(1)对本实验的结果进行了拟合，拟合结果如图 2 中的实线所示。

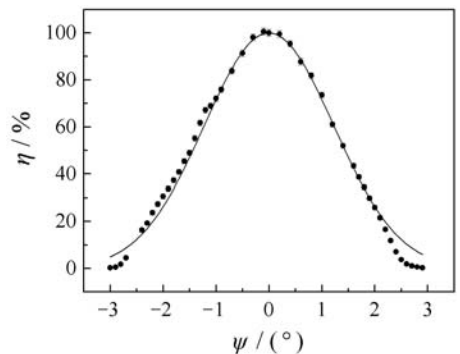


图 2 传输效率随倾斜角的变化

横坐标表示倾斜角，纵坐标表示绝对传输效率；点代表实验数据，实线为拟合结果；图中误差来源于探测器输出误差。

$$f(\psi) = f(0^\circ) \exp\left(-\frac{\sin^2 \psi}{\sin^2 \psi_c}\right), \quad (1)$$

其中： $f(0^\circ)$  为倾斜角为  $0^\circ$  时的传输效率； $\psi_c$  为特征导向角，是传输强度降低到  $0^\circ$  传输强度的  $1/e$  时对应的倾斜角，是表征导向能力的物理量。利用方程(1)能对大多数倾斜角的传输效率做出比较好的拟合，从而可以得出  $\psi_c \approx 1.73^\circ$ 。对于大角度的情况，拟合与实验产生偏差的主要原因是，实验所采用的位置灵敏法拉第筒对弱信号的探测效率较低<sup>[15]</sup>。

所使用的位置灵敏法拉第筒除了可以得到出射

离子的总流强，还可以获得出射离子的角分布信息。图 3 给出了不同倾斜角下出射离子的角分布。显然，当入射角为 0° 时，出射离子的强度最大；随着入射角度的增大，出射离子强度明显下降。同时，随着倾斜角的改变，出射离子角分布的最大值位置

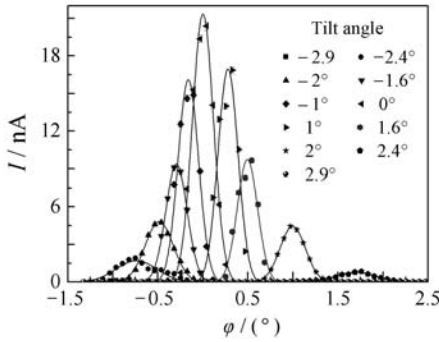


图 3 不同倾斜角的出射离子角分布

横坐标表示出射离子的观测角，纵坐标表示出射离子的强度；点代表实验数据，实线为高斯拟合的结果。

会发生移动，即随着倾斜角的改变出射离子方向会发生改变。但值得注意的是，0° 角左右两侧出射离子角分布明显不对称。在 0° 角左侧，各个倾斜角下的出射离子角分布最大值位置的角度都小于相应的倾斜角，而在 0° 角右侧，则是接近甚至大于倾斜角。这说明，不论是在 0° 角左侧还是 0° 角右侧，出射离子都不是沿轴向出射，而是沿着入射束流方向与玻璃板水平轴向之间的某一个方向出射，这与离子在微孔膜中的导向效应有所不同。我们分析认为，这可能是由电荷在左右两个板上的沉积方式引起的，如图 4 所示。当玻璃板倾向 0° 角左侧时(图 4 (a),  $\psi < 0$ )，由于玻璃板是向左倾斜，电荷将首先沉积在右侧板的入口处。当沉积电荷达到足够大时，后入射的离子被偏向左侧板，使部分电荷沉积在左板上。在左右两板上形成的电荷片的作用下，出射离子最终会沿入射离子方向与玻璃板轴向方向之间的某一方向出射。当玻璃板倾向 0° 角右侧时(图 4(b),  $\psi > 0$ )，电荷会在左板的入口处沉积，同时，先前在板上沉积的电荷会沿各自板的表面扩散。此时，板上沉积的电荷主要分布在图 4(b)所示的 3 个位置，其中左板入口处电荷最多。在这种情况下，出射离子将沿比玻璃板水平轴向方向角度略大的角度出射。对于图 4(a)和图 4(b)所对应的两种情况，在一定角度范围内，倾斜角越大，都会导致出射离子方向偏离玻璃板轴向方向越大。

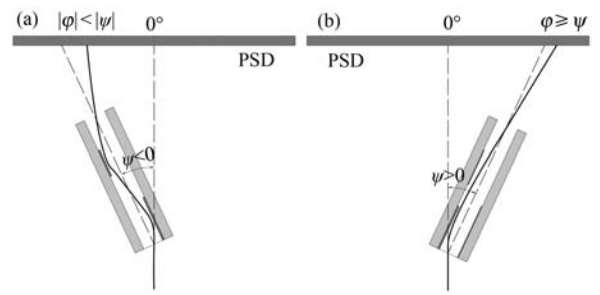


图 4 不同倾斜角下电荷在板上的沉积情况示意图

(a)和(b)分别表示  $\psi < 0$  和  $\psi > 0$  的情况；PSD 为位置灵敏探测器， $\psi$  和  $\varphi$  分别为倾斜角和观测角。

另外，从图 3 中还可以直观地看出，出射离子角分布的宽度会随倾斜角发生改变。图 5 给出了出射离子角分布的半高全宽(FWHM)随倾斜角的变化关系，图中给出的误差是由探测器的分辨引起。

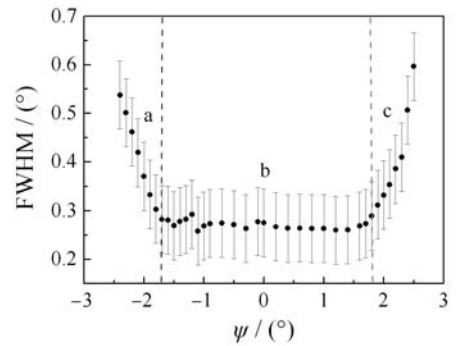


图 5 出射离子角分布的半高全宽 FWHM 随倾斜角的变化关系

横坐标是倾斜角，纵坐标是出射离子角分布的半高全宽 FWHM；误差是由探测器的分辨率引起，探测器位置分辨为 0.3 mm，对应的角度分辨为 0.07°。

前面已提到，探测器每道的宽度是 0.3 mm，也就是说探测器的位置分辨是 0.3 mm，相对应的角度分辨为 0.07°。FWHM 随倾斜角的变化关系分成 a, b 和 c 3 个不同的区域，在 b 区域( $-1.7^\circ < \psi < 1.8^\circ$ )，FWHM 几乎不随倾斜角变化；在 a 和 c 两个区域，FWHM 都随倾斜角的绝对值增大而增大。a, b 和 b, c 区域分界处对应的倾斜角分别为  $-1.7^\circ$  和  $1.8^\circ$ ，这两个角度值非常接近用方程(1)拟合得出的特征导向角  $\psi_c$  ( $1.73^\circ$ )。另外，FWHM 比高电荷态离子穿过微孔膜的角分布 FWHM 小得多，这一点与 Stolterfoht 等<sup>[16]</sup>的研究结果相符合。他们的研究认为，FWHM 随  $E_p/q$  ( $E_p$  为离子入射能量， $q$  为出射离子电荷态)的增大而减小。我们采用的

$\text{Ar}^{7+}$  的  $E_p/q$  为 15 kV, 比微孔膜的实验( $E_p/q$  一般为 1 kV 以下)要大得多。

在文献[17]中, Stolterfoht 提出:

$$\sin^{-2} \phi_c = \frac{E_p}{qU}, \quad (2)$$

$$\sin^{-2} \sigma_i = \frac{1}{4 \ln 2} \frac{E_p}{qU_i}, \quad (3)$$

其中,  $\sigma_i$  为出射离子角分布的 FWHM,  $U_i$  和  $U$  分别为毛细管内沉积的电荷在管的出口处和入口处形成的电势。 $U$  对入射离子起导向作用,  $U$  越大导向能力越好。 $U_i$  主要起到展宽出射离子角分布的作用,  $U_i$  越大出射离子角分布越宽。 $U_i$  比  $U$  小约一个量级, Stolterfoht 认为  $U_i$  和  $U$  都是由毛细管管口沉积的电荷产生的。

用方程(2)和(3)能很好地解释出射离子角分布的 FWHM 随倾斜角的变化关系。从方程(2)可以看出, 当  $\phi = \phi_c$  时, 垂直玻璃板表面的能量分量  $E_{\perp} = E_p \sin^2 \phi = qU$ 。当  $\phi < \phi_c$  时,  $E_{\perp} < qU$ , 入射离子直接被导向出管外, 而不会继续在板上沉积,  $U_i$  保持不变。所以  $\phi < \phi_c$  时,  $\sigma_i$  不会随倾斜角变化。当  $\phi > \phi_c$  时,  $E_{\perp} > qU$ , 入射离子继续向玻璃板上沉积电荷, 使板上沉积的电荷增多, 从而沉积电荷产生的电位  $U$  和  $U_i$  会增大。从方程(3)可以看出, 出射离子角分布的 FWHM  $\sigma_i$  与  $U_i$  成正比。因此,  $\phi > \phi_c$  ( $1.73^\circ$ ) 时, 随着倾斜角的增大,  $\sigma_i$  会逐渐增大。

## 4 结论

实验采用能量为 105 keV 的  $\text{Ar}^{7+}$  离子入射长度、间距分别为 21 和 1 mm 的平行玻璃板, 利用位置灵敏探测器实时测量了不同倾斜角下出射离子的强度和角分布信息, 并对结果进行了解释。实验研究表明, Ar 离子入射平行玻璃板时, 在玻璃板中发生了导向效应。实验中观察到的其他现象能用现有的导向效应模型给出定性的解释, 但其导向的物理机制还需要进一步的研究。

## 参考文献 (References):

- [1] STOLTERFOHT N, HELLHAMMER R, BUNDESMANN J, *et al.* Phys Rev A, 2007, **76**: 022712.
- [2] SKOG P, ZHANG HQ, SCHUCH R. Phys Rev Lett, 2008, **101**: 223202.
- [3] STOLTERFOHT N, HELLHAMMER R, FINK D, *et al.* Phys Rev A, 2009, **79**: 022901.
- [4] ZHANG H Q, SKOG P, SCHUCH R, Phys Rev A, 2010, **82**: 052901.
- [5] STOLTERFOHT N, HELLHAMMER R, SULIK B, *et al.* Phys Rev A, 2011, **83**: 062901.
- [6] STOLTERFOHT N, BREMER J H, HOFFMANN V, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **88**: 133201.
- [7] SCHIESSL K, PALFINGER W, TÖKÉSI K, *et al.* Phys Rev A, 2005, **72**: 062902.
- [8] HELLHAMMER R, BUNDESMANN J, FINK D, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2007, **258**: 159.
- [9] SKOG P, SOROKA I L, JOHANSSON A, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2007, **258**: 145.
- [10] SAHANA M B, SKOG P, VIKOR G, *et al.* Phys Rev A, 2006, **73**: 040901.
- [11] NEBIKI T, SEKIBA D, YONEMURA H, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2008, **266**: 1324.
- [12] NAKAYAMA R, TONA M, NAKAMURA N, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2009, **267**: 2381.
- [13] BERECZKY R J, KOWARIK G, AUMAYR F, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2009, **267**: 317.
- [14] WANG Wei, YU Deyang, SHE Qianshun, *et al.* Nuclear Physics Review, 2010, **27**(2): 54 (in Chinese).  
(王伟, 于得洋, 余乾顺, 等. 原子核物理评论, 2010, **27**(2): 54.)
- [15] SHE Qianshun. Design and Implement of Measurement System for Weak Current [D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences 2009: 55(in Chinese).  
(余乾顺. 微弱电流检测系统的设计与实现[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2009: 55.)
- [16] STOLTERFOHT N, HELLHAMMER R, JUHÁSZ Z, *et al.* Phys Rev A, 2009, **79**: 042902.
- [17] STOLTERFOHT N, HELLHAMMER R, BUNDESMANN J, *et al.* Phys Rev A, 2008, **77**: 032905.

# Guiding of 105 keV Ar<sup>7+</sup> Ions through a Gap Formed by a Paired Parallel Glass Plates

LIU Jun-liang<sup>1, 2</sup>, XUE Ying-li<sup>1</sup>, YU De-yang<sup>1</sup>, WU Ye-hong<sup>1, 2</sup>, CHEN Jing<sup>1, 2</sup>, DU Fan<sup>1, 2</sup>,  
ZHANG Ming-wu<sup>1</sup>, RUAN Fang-fang<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, LI Jin-yu<sup>1</sup>,  
WANG Ping-zhi<sup>1</sup>, KANG Long<sup>1</sup>, CAI Xiao-hong<sup>1</sup>

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** The transmission of 105 keV Ar<sup>7+</sup> ions with high incident current (about 80 nA) through the gap formed by a paired parallel glass plates was investigated. The intensity and angular distribution of the transmitted ions for various tilt angles were measured using a one-dimensional position sensitive detector. The results indicate the existence of a guiding effect when Ar<sup>7+</sup> ions pass through the gap, but it is different from that for ions passing through nonacapillaries. We found a measurable dependence of the full width at half maximum (FWHM) of the transmitted ions as a function of the tilt angle. In addition, when the gap was tilted with respect to the direction of the incident beam, the observation angle related to the center of the transmitted ions profile was not equal to the tilt angle.

**Key words:** highly charged ion; guiding effect; paired parallel glass plate