

20 keV 质子在聚碳酸酯微孔膜中传输的动态演化过程

白雄飞 牛书通 周旺 王光义 潘鹏 方兴 陈熙萌 邵剑雄

Dynamic evolution of 20-keV H^+ transmitted through polycarbonate nanocapillaries

Bai Xiong-Fei Niu Shu-Tong Zhou Wang Wang Guang-Yi Pan Peng Fang Xing Chen Xi-Meng
Shao Jian-Xiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 093401 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.093401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.093401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

100-keV 质子在聚碳酸酯微孔膜中传输的动态演化过程

Dynamic evolution of 100-keV H^+ through polycarbonate nanocapillaries

物理学报.2016, 65(10): 103401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.103401>

近玻尔速度氙离子激发钒的K壳层X射线

Vanadium K-shell X-ray emission induced by xenon ions at near the Bohr velocity

物理学报.2016, 65(2): 027901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.027901>

Mg-CO($X^1\Sigma^+$) 体系的冷碰撞动力学

Collision dynamic behaviors of CO($X^1\Sigma^+$) molecule with Mg atom in cold and ultracold temperatures

物理学报.2015, 64(10): 103402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.103402>

低能氢粒子沿不同角度轰击钨(001)表面的反射概率及入射深度分布的分子动力学研究

Molecular dynamics simulation of low-energy hydrogen atoms bombarding tungsten (001) surface at different angles and their depth distribution

物理学报.2013, 62(22): 227901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.227901>

近玻尔速度 Ne^{2+} 离子穿过碳膜引起的电子发射

Secondary electron emission from carbon foils by Ne^{2+} near Bohr velocity

物理学报.2013, 62(15): 157901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.157901>

20 keV 质子在聚碳酸酯微孔膜中传输的动态演化过程*

白雄飞¹⁾ 牛书通¹⁾ 周旺¹⁾ 王光义²⁾ 潘鹏¹⁾ 方兴¹⁾
陈熙萌^{1)†} 邵剑雄^{1)‡}

1) (兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

2) (兰州空间技术物理研究所, 真空低温技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

(2016年12月12日收到; 2017年1月29日收到修改稿)

测量了20 keV 质子穿过倾斜角为 $+1^\circ$ 的聚碳酸酯微孔膜后, 出射粒子的位置分布、相对穿透率以及电荷纯度随时间的演化. 实验发现, 能量电荷比 $E/q \approx 10^1$ kV的质子穿过绝缘纳米微孔的物理机理与 $E/q \approx 10^0$ kV和 $E/q \approx 10^2$ kV区域离子有显著不同. 对于 $E/q \approx 10^1$ kV的质子穿过绝缘纳米微孔, 存在一段相当长的导向建立之前(导向前的)过程, 在该时期内出射质子及氢原子的特性和导向建立后的特性有很大差异. 在导向前的演化过程中, 我们可以观察到出射质子的峰位逐渐向孔轴向附近转移; 出射氢原子由束流方向的尖峰以及孔轴向的主峰构成, 峰位角保持基本不变且尖峰逐渐消失. 这一过程的主要机理为微孔内表面以下的多次随机二体碰撞和近表面镜面反射两种传输方式逐步向电荷斑约束下的“导向效应”过渡的过程. 对 $E/q \approx 10^1$ kV区间离子“导向前过程”的完整观测, 使得对低能向中能过渡区间离子穿过绝缘微孔膜物理机制和图像有更深入和完整的认识, 有助于约10 keV离子微束的精确控制和应用.

关键词: 微孔膜, 电荷斑, 导向效应, 导向前

PACS: 34.50.-s, 79.20.Rf, 68.49.Sf

DOI: 10.7498/aps.66.093401

1 引言

近年来, 应用很高精度的离子径迹蚀刻技术可以制作出纳米尺寸到微米尺寸的导电和绝缘微孔膜^[1,2]. 为了对不同材料纳米微孔的内部电特性以及微束的操纵进行研究, 越来越多的实验小组^[3-6]参与到带电粒子与微孔膜相互作用的研究当中. 而后“导向效应”^[6]的发现, 不仅对绝缘纳米微孔电特性研究有理论的启示, 也对微束的操纵和应用^[7,8]有指导意义.

通过对3 keV Ne^{7+} 离子在绝缘纳米微孔中传输的研究, Stolterfoht等^[6]发现了“导向效应”: 入射离子会保持初始电荷态并沿着孔轴向出射. 此后

的研究表明^[9-14], 在纳米微孔内壁形成的几块自组织电荷斑, 阻止入射离子和微孔内壁发生近距离碰撞, 并约束离子按照微孔轴向运动. 该类实验的 E/q 约为 10^0 kV量级, 低能区高电荷态离子容易在短时间内沉积大量电荷形成足够强的电荷斑以抵消入射离子的横向动量, 进而使离子顺孔轴向运动, 这就是电荷斑和导向过程在 $E/q \approx 10^0$ kV区域很快建立的原因所在.

周旺等^[15]在研究100 keV质子在聚碳酸酯(PC)纳米微孔中运输的动态演化过程中, 发现在充放电平衡后, 出射粒子的峰位从孔轴向逐渐转移到束流入射方向. 此实验的 E/q 约为 10^2 kV, 比Stolterfoht等^[6]的实验参数高出两个数量级. 周旺等^[15]认为, 实验开始阶段, 中能区低电荷态质子

* 国家自然科学基金(批准号: 11675067)和国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11605078)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenxm@lzu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: shaojx@lzu.edu.cn

可直接进入微孔内表面以下, 受到多次随机二体碰撞, 丢失电荷态及轨迹等初始信息, 最后不得不顺着微孔管道出射, 这是“表观”上的导向过程. 经长时间充电后, 电荷斑形成, 但仍不能抵消中能区入射质子的横向动量, 入射粒子仍会有较大机会和微孔内壁发生近距离镜面反射. 这种电荷斑辅助下的临近表面的镜面反射最终使粒子沿束流入射方向出射, 该机制正是 $E/q \approx 10^2$ kV 区域离子在微孔内部传输有别于 $E/q \approx 10^0$ kV 区域离子的最根本原因.

在 MeV 能区, E/q 约为 10^3 kV 的离子在绝缘纳米微孔中的运输机制也得到了深入的研究 [16–18]. 研究表明: 由于离子能量很高, 电荷斑对入射离子的作用可忽略, 离子直接进入微孔内表面以下, 受到多次随机碰撞, 最终只能沿着微孔轴向出射. 基于二体卢瑟福散射的运行轨迹模拟可再现该能区离子穿过绝缘纳米微孔的径迹和出射离子能量分布.

在约 10 keV 能区, E/q 约为 10^1 kV 的离子在绝缘纳米微孔中传输的动态演化过程还没有被充分研究. 我们认为对这个能区的研究, 会对 $E/q \approx 10^0$ kV 和 $E/q \approx 10^2$ kV 区域离子在绝缘微孔中运输的实验现象提供有力的衔接和补充. 考虑到质子

电荷交换形式简单, 只有 H^+ 和 H^0 , 不存在其他干扰. 同时, 约 10 keV 能区的质子, 速度较快, 电荷态低且仅有一个电荷, 就需要很长时间来形成足够强的电荷斑, 我们也就会有足够时间来仔细观察导向前 (pre-guiding) 的整个演化过程, 对更深入了解导向建立是有益的.

在本文中, 我们测量了 20 keV 质子穿过倾斜角为 $+1^\circ$ 的 PC 纳米微孔后出射粒子的相对穿透率、电荷纯度、出射角 (出射粒子与入射束流的夹角) 分布以及半高全宽 (FWHM) 随时间的演化. 实验结果表明, 对于 $E/q \approx 10^1$ kV 的质子入射, 的确存在一段相当长的导向前时期, 在该时期内出射质子及氢原子的特性和导向建立平衡后的特性有很大不同. 在导向前演化过程中, 我们可以观察到出射质子的峰位逐渐转移到孔轴向附近; 出射氢原子的 $+0.2^\circ$ 尖峰和 $+0.9^\circ$ 主峰的峰位角基本不变, 而尖峰的相对份额逐渐减小.

2 实验方法

本实验的束流源来自中国科学院兰州近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子物理实验平台的

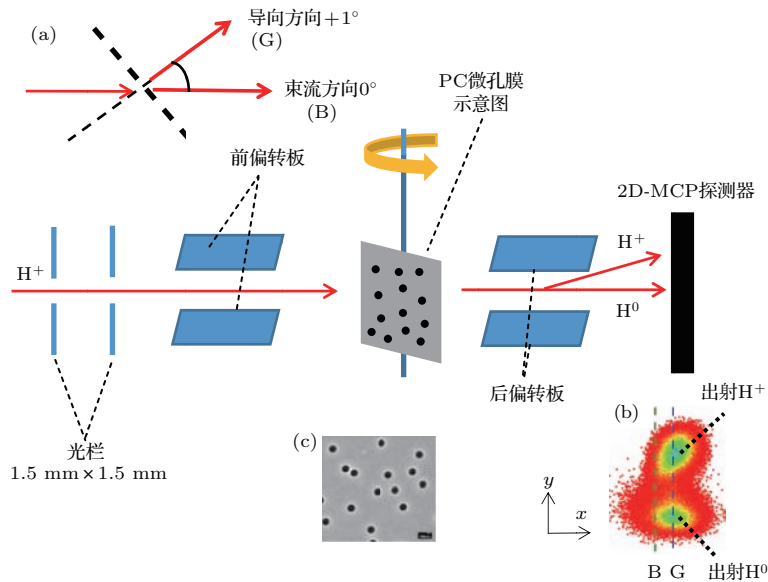


图1 (网刊彩色) 整套实验装置示意图 (a) 对导向方向和束流方向的定义, 其中, 导向方向标为“G”, 意为 Guiding, 束流方向标为“B”, 意为 Beam; (b) 20 keV H^+ 以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 纳米微孔后所呈现的最终典型二维谱图, 其中上下束斑分别为出射 H^+ 和 H^0 ; (c) PC 纳米微孔膜的 SEM 图像

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of the whole experiment: (a) Definitions of the guiding direction (G) and the beam direction (B); (b) the final typical two-dimensional spectrum of the transmitted particles with 20 keV incident energy through $+1^\circ$ nanocapillaries in PC membrane. The upper and lower beam spots present the transmitted H^+ and H^0 , respectively; (c) SEM image of the PC nanocapillary membrane.

14.5 GHz ECR 离子源. 20 keV, 1 nA/mm² 的质子束经过两组相距 75 mm, 尺寸为 1.5 mm × 1.5 mm 的矩形光栏准直后 (角发散度为 0.2°), 与固定在高真空靶室中央竖直轴上的 PC 微孔膜碰撞, 其中靶室真空度为 10⁻⁶ Pa. 在实验中, 束流与微孔轴的夹角 (倾斜角) ϕ 通过调节精度为 0.1° 的调角器, 旋转中央竖直轴来获得. 束流与中央竖直轴的夹角 (方位角) 通过微孔膜前端 10 cm 处的一对静电偏转板 (前偏转板) 来调节, 使束流以 90° 的方位角垂直入射微孔膜. 膜后端 7 cm 处的另一对偏转板 (后偏转板) 是用来使出射粒子中的 H⁺ 和 H⁰ 在 y 轴方向上分开, 并且使 x 轴方向上的位置不变. 出射粒子在 xy 平面上的位置信息被膜后端 30 cm 处的二维微通道板探测器记录. 图 1 是整套实验装置示意图. 图 1 (a) 定义了束流方向 (B) 和导向方向 (G). 图 1 (b) 所示为最终所得典型图像, 其中上下束斑分别代表出射的 H⁺ 和 H⁰, 可以看出上下束斑相互独立, 且本底计数较低.

本实验所采用的微孔膜制备过程如下 [19]: 首先, 利用德国 GSI 实验室 11.4 MeV/u 的铀离子对 30 μ m 厚的 PC 膜进行辐照. 其次, 用 5 M (1 M = 1 mol/L), 50 °C 的氢氧化钠溶液对 PC 膜进行蚀刻, 使 PC 膜中的重离子径迹形成微孔. 微孔的直径为 200 nm, 长度为 30 μ m, 对应的长径比为 150 : 1, 几何张角为 0.38°. 最后, 为了防止离子束对微孔膜表面进行宏观充电, 我们在 45° 倾斜角方向对微孔膜的前后表面镀 30 nm 厚的金层. 图 1 (c) 所示为该 PC 微孔膜的扫描电子显微镜

(SEM) 图像, 从图中可看出微孔的开口为圆形, 且孔径基本一致.

3 实验结果

图 2 所示为 20 keV 质子穿过倾斜角为 +1° 的 PC 纳米微孔后, 出射粒子位置谱在 x 轴上的投影谱随测量时间的演化过程 (注: 由于初始相对穿透率很小, 所以将谱按照最高峰值拉平, 视觉上更容易分辨). 从图 2 (a)—(d) 可以看出: 1) 在初始阶段, 出射 H⁺ 占总出射粒子的相对份额很小, 峰位在 +0.75° 附近; 随着充电过程进行, 出射 H⁺ 的相对份额增加, 峰位逐渐向 +1° 靠近, FWHM 有明显增加; 充放电平衡后, 出射 H⁺ 的相对份额达到最大, 且远大于出射 H⁰ 的相对份额, 出射 H⁺ 的峰位保持在 +1.1° 附近, FWHM 也增加至最大; 2) 在初始阶段, 出射 H⁰ 的角分布呈现出双峰现象, 在 +0.2° 附近有一个尖峰, 主峰则出现在 +0.9° 附近; 随着充电进行, 出射 H⁰ 的左侧尖峰和主峰的峰位角基本没变, 而左侧尖峰在逐渐减弱, 出射 H⁰ 的相对份额也在逐渐减小; 充放电平衡后, 出射 H⁰ 的左侧尖峰已消失, 主峰保持在 +1° 附近, 且出射 H⁰ 的相对份额已远远低于出射 H⁺ 的相对份额.

为了对 20 keV 质子在纳米微孔中传输的动态演化过程做进一步的讨论, 我们在图 3—图 6 中详细给出出射粒子的相对穿透率、电荷纯度、峰位角以及 FWHM 随时间演化的特性图.

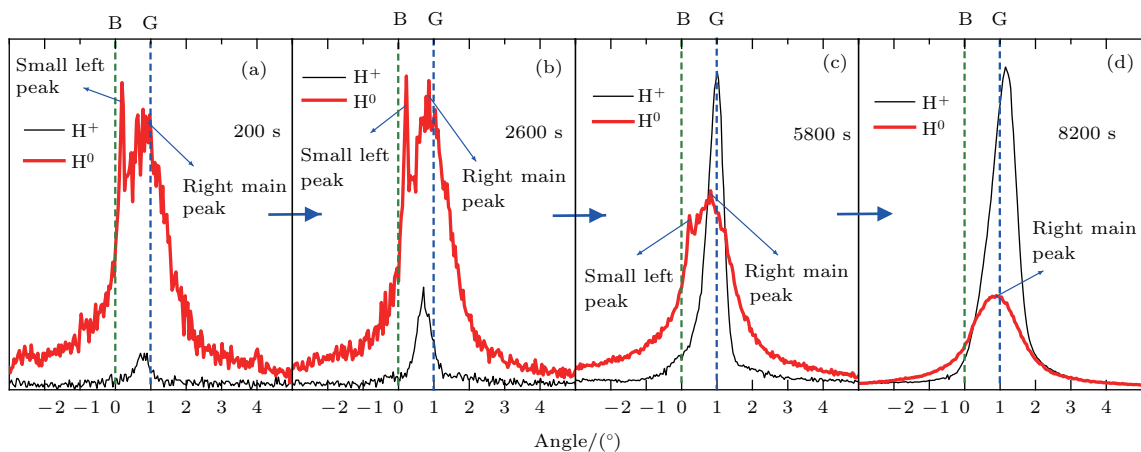


图 2 (网刊彩色) 出射粒子位置谱在 x 轴上的投影谱随测量时间的演化 (a)—(d) 分别为 200, 2600, 5800 和 8200 s 时的投影谱图; 黑色实线和红色实线分别表示出射的 H⁺ 和 H⁰

Fig. 2. (color online) The time evolution of the transmitted particles projected in x axis panels. Panels (a)—(d) present the projected spectra of 200, 2600, 5800 and 8200 s. The black and red solid lines present the transmitted H⁺ and H⁰, respectively.

图3所示为出射 H^+ 和 H^0 的相对穿透率以及插图中电荷纯度随时间的演化特性. 从图3可以看出: 1) 0—3000 s, 大约对应图2(a)到图2(b)的过程, 出射 H^+ 和 H^0 的相对穿透率和电荷纯度很小, 且变化不大, 说明这是一个长时间的电荷斑预建立过程; 2) 3000—8000 s, 大约对应图2(b)到图2(d)的过程, 出射 H^+ 和 H^0 的相对穿透率和电荷纯度明显上升, 说明这段时间电荷斑逐渐建立对粒子的相对穿透率有明显的增强作用, 且阻止入射质子与微孔内表面进行电荷交换, 导向过程逐渐建立; 3) 8000 s以后, 约为图2(d)以后, 出射 H^+ 和 H^0 相对穿透率和电荷纯度均增加至最大, 且基本不变, 说明足够强度的电荷斑已建立, 使粒子的相对穿透率增大至最大, 且阻止绝大部分入射质子与内表面进行电荷交换, 约束质子顺孔轴向运动, 进入了导向过程.

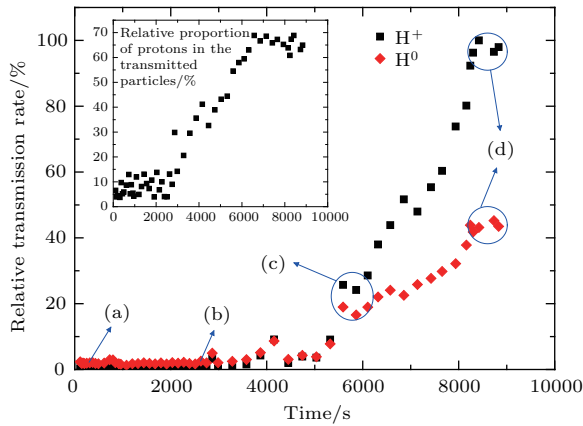


图3 (网刊彩色) 20 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 纳米微孔后出射粒子的相对穿透率以及插图中 H^+ 占总出射粒子的相对份额 (电荷纯度) 随时间的演化, 其中黑色实心方形和红色实心方形分别表示出射的 H^+ 和 H^0

Fig. 3. (color online) The time evolution of the relative transmission rate and relative proportion of protons (charge purity) of the transmitted particles with 20 keV incident energy and $+1^\circ$ nanocapillaries tilt angle. The black solid square and red solid square present the transmitted H^+ and H^0 , respectively.

出射 H^+ 峰位角的时间演化如图4所示. 结合图2(a)—(d)可以看出: 约3000 s以前, H^+ 的峰位在 $+0.75^\circ$ 附近; 随着充电过程进行, 在3000 s以后逐渐增大; 约7000 s后, 峰位处于 $+1.1^\circ$ 附近, 说明出射质子基本沿着微孔轴向出射.

图5所示为出射 H^0 的双峰峰位角随时间的演化过程, 结合图2(a)—(d)可以看出, 左侧尖峰和右侧主峰的峰位角基本没有变化, 尖峰基本在 $+0.2^\circ$

附近, 且大约8000 s以后消失, 而主峰在整个实验过程中, 基本保持在微孔轴向附近.

出射粒子FWHM随时间的演化如图6所示, 结合图2(a)—(d)可以看出: 1) 约3000 s以前, H^+ 的FWHM约为 0.5° , 且基本不变; 随着充电的进行, 在3000 s以后有明显上升; 约8000 s以后, H^+ 的FWHM基本在 1.2° 左右; 2) H^0 的FWHM在整个过程中缓慢上升, 这说明电荷斑的建立对 H^0 的出射也有一定的作用.

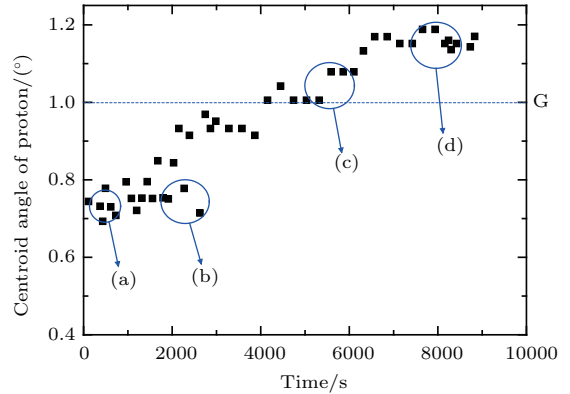


图4 (网刊彩色) 20 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 纳米微孔后出射 H^+ 峰位角随时间的演化

Fig. 4. (color online) The time evolution of the centroid angle of the transmitted H^+ with 20 keV incident energy and $+1^\circ$ nanocapillaries tilt angle.

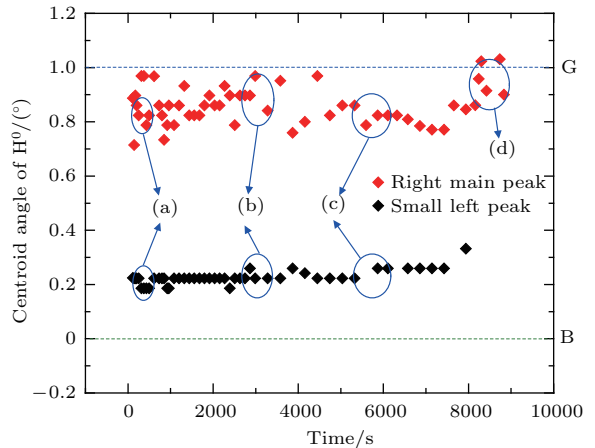


图5 (网刊彩色) 20 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 纳米微孔后出射 H^0 峰位角随时间的演化, 其中黑色实心方形表示束流方向尖峰, 红色实心方形表示导向方向主峰

Fig. 5. (color online) The time evolution of the centroid angle of the transmitted H^0 with 20 keV incident energy and $+1^\circ$ nanocapillaries tilt angle. The black solid square presents the small left peak and the red solid square presents the right main peak of the transmitted H^0 .

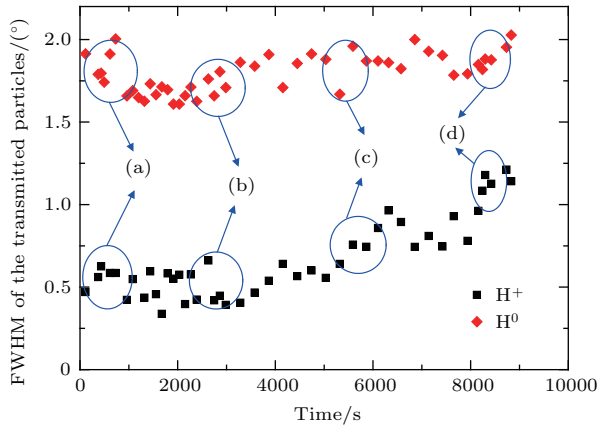


图6 (网刊彩色) 20 keV 质子以 +1° 倾斜角入射 PC 纳米微孔后出射粒子 FWHM 随时间的演化, 其中黑色实心方形和红色实心方形分别表示出射的 H⁺ 和 H⁰

Fig. 6. (color online) The time evolution of the FWHM of the transmitted particles with 20 keV incident energy and +1° nanocapillaries tilt angle. The black solid square and red solid square present the transmitted H⁺ and H⁰, respectively.

4 讨论

考虑到 20 keV 质子速度比 keV 离子快很多, 且质子电荷态低, 仅有一个电荷, 需要很长时间来积累电荷并逐步形成足够强的电荷斑. 所以我们对 20 keV 质子 (E/q 约为 10^1 kV) 在倾斜角为 +1° 的 PC 纳米微孔中传输进行了研究, 观察到较长时间的导向过程. 下文中, 我们将对 20 keV 质子在倾斜角为 +1° 的 PC 纳米微孔中传输的主要特性做定性的物理分析.

在测量初始阶段, 微孔内壁无电荷沉积, 入射粒子容易靠近微孔内表面, 并有较大机会穿入表面以下, 只有很少一部分以类似于“镜面反射”的形式从表面以上掠射通过. 大部分入射质子穿入表面以下, 由于低能区质子的电荷俘获截面远远大于其电荷损失截面, 所以穿入表面以下的质子经过若干次表面以下随机碰撞, 几乎都会俘获电子变为氢原子, 并丢失入射轨迹等初始信息, 不得不随微孔管道出射. 只有很少一部分穿入表面以下的质子没有电荷交换, 也经过若干次表面以下随机碰撞, 最终以质子形式靠近孔轴向出射, 但其份额很少. 由于多次随机二体碰撞, 角度发散, 孔轴向出射的氢原子和质子的 FWHM 较宽. 同时, 对于那些少部分以“镜面反射”的形式从表面以上掠射通过的粒子, 20 keV 所对应的横向动量足以使其接近表面而发生电荷交换变为氢原子, 这就造成出射氢原子中会

有一小部分经过了两次“镜面反射”的过程从入射束流方向附近, 即 0° 左右出射. 由于两次镜面反射受微孔的几何构型限制, 所以呈现小尖峰.

综上所述, 在初期无电荷沉积, 出射粒子中绝大部分应当是处于微孔轴向的氢原子, 伴随少量经过两次近表面镜面反射在入射方向出射的氢原子; 由于进入表面以下的入射质子较容易发生电荷交换, 所以在孔轴向出射的质子极少. 这一点与图 2(a)–(b) 测量结果的主要特征相符.

随着充电过程进行, 微孔内表面电荷斑逐渐建立起来, 由于电荷斑对入射质子的排斥作用, 并倾向于约束入射质子顺着微孔轴向运动, 所以入射粒子进入微孔内表面以下的概率明显减小, 从而, 经过多次表面以下随机碰撞而顺着微孔轴向出射的氢原子相对会减少, 而由导向力约束沿孔轴向出射的质子相对份额会显著升高. 同时, 由于导向力的排斥, 入射离子接近表面原子层发生镜面反射并电荷交换的概率也会降低, 所以, 在 0° 出射的氢原子尖峰也不再明显. 这一点和图 2(c) 的实验结果相一致.

最终, 当电荷斑完全建立并达到充放电平衡时, 可以预想会有更多的入射质子被导向力约束沿微孔轴向出射, 而在表面以下发生随机碰撞并电荷交换的概率会进一步受到抑制, 将导致 +1° 附近出射的氢原子份额相对变得更少, 且 0° 附近尖峰也将不再存在, 而绝大多数出射的粒子都是导向方向的质子, 以上特性在图 2(d) 中可以得到验证.

5 结论

在本实验中, 我们测量了 20 keV 质子在 PC 微孔膜中传输的动态演化过程. 发现 $E/q \approx 10^1$ kV 的离子, 仍可以逐渐达到导向过程, 并观察到很长时间的导向过程, 这一点与 $E/q \approx 10^0$ kV 和 $E/q \approx 10^2$ kV 区域离子有一定的不同. 在导向过程中, 起主要作用的是表面以下的随机二体碰撞过程和相对较弱的近表面的镜面反射过程; 在导向过程建立后, 导向力才逐渐占据统治地位. 该实验结果把 $E/q \approx 10^0$ kV 至 $E/q \approx 10^2$ kV 区间离子在微孔膜中输运的物理图像联接起来, 形成更加完整的物理认识: 中低能区 (近玻尔速度区) 离子通过微孔, 存在表面以下随机二体碰撞、近表面散射和导向三种输运方式的动态竞争, 随着入射能量的不同表现出不同的竞争形式. 这一实验结果也对 $E/q \approx$

10^1 kV 区域离子微束在空间和电荷品质的控制上有一定的理论指导意义。

感谢中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子物理实验平台上的员工为我们提供高品质稳定的质子束。

参考文献

- [1] Spohr R 1990 *Ion Tracks and Microtechnology* (Braunschweig: Vieweg) pp93–182
- [2] Fleischer R L, Price P B, Walker R M 1969 *Sci. Amer.* **220** 30
- [3] Yamazaki Y, Ninomiya S, Koike F, Masuda H, Azuma T, Komaki K, Kuroki K, Sekiguchi M 1996 *J. Phys. Soc. Jpn.* **65** 1199
- [4] Ninomiya S, Yamazaki Y, Koike F, Masuda H, Azuma T, Komaki K, Kuroki K, Sekiguchi M 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 4557
- [5] Tökési K, Wirtz L, Lemell C, Burgdörfer J 2000 *Phys. Rev. A* **61** 020901
- [6] Stolterfoht N, Bremer J H, Hoffmann V, Hellhammer R, Fink D, Petrov A, Sulik B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 133201
- [7] Ikeda T, Kanai Y, Kojima T M, Iwai Y, Kambara T, Yamazaki Y, Hoshino M, Nebiki T, Narusawa T 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 163502
- [8] Cassimi A, Ikeda T, Maunoury L, Zhou C L, Guillous S, Mery A, Lebius H, Benyagoub A, Grygiel C, Khemliche H, Roncin P, Merabet H, Tanis J A 2012 *Phys. Rev. A* **86** 062902
- [9] Stolterfoht N, Hellhammer R, Bundesmann J, Fink D, Kanai Y, Hoshino M, Kambara T, Ikeda T, Yamazaki Y 2007 *Phys. Rev. A* **76** 022712
- [10] Skog P, Zhang H Q, Schuch R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 223202
- [11] Stolterfoht N, Hellhammer R, Fink D, Sulik B, Juhász Z, Bodewits E, Dang H M, Hoekstra R 2009 *Phys. Rev. A* **79** 022901
- [12] Cassimi A, Maunoury L, Muranaka T, Huber B, Dey K R, Lebius H, Lelièvre D, Ramillon J M, Been T, Ikeda T, Kanai Y, Kojima T M, Iwai Y, Yamazaki Y, Khemliche H, Bundaleski N, Roncin P 2009 *Nucl. Instrum. Meth. B* **267** 674
- [13] Zhang H Q, Skog P, Schuch R 2010 *Phys. Rev. A* **82** 052901
- [14] Juhász Z, Sulik B, Rácz R, Biri S, Bereczky R J, Tökési K, Kövér Á, Pálincás J, Stolterfoht N 2010 *Phys. Rev. A* **82** 062903
- [15] Zhou W, Niu S T, Yan X W, Bai X F, Han C Z, Zhang M X, Zhou L H, Yang A X, Pan P, Shao J X, Chen X M 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 103401 (in Chinese) [周旺, 牛书通, 闫学文, 白雄飞, 韩承志, 张鹏泉, 周利华, 杨爱香, 潘鹏, 邵剑雄, 陈熙萌 2016 物理学报 **65** 103401]
- [16] Lemell C, Burgdörfer J, Aumayr F 2013 *Prog. Surf. Sci.* **88** 237
- [17] Simona M J, Zhou C L, Döbeli M, Cassimi A, Monnet I, Méry A, Grygiel C, Guillous S, Madi T, Benyagoub A, Lebius H, Müller A M, Shiromaru H, Synal H A 2014 *Nucl. Instrum. Meth. B* **330** 11
- [18] Hasegawa J, Jaiyen S, Polee C, Chankow N, Oguri Y 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 044913
- [19] Mo D 2009 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [莫丹 2009 博士学位论文 (兰州: 中国科学院近代物理研究所)]

Dynamic evolution of 20-keV H^+ transmitted through polycarbonate nanocapillaries*

Bai Xiong-Fei¹⁾ Niu Shu-Tong¹⁾ Zhou Wang¹⁾ Wang Guang-Yi²⁾ Pan Peng¹⁾
Fang Xing¹⁾ Chen Xi-Meng^{1)†} Shao Jian-Xiong^{1)‡}

1) (School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2) (National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Technology and Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

(Received 12 December 2016; revised manuscript received 29 January 2017)

Abstract

In recent years, by using the etching techniques with great precision, the ion tracks in materials were converted into insulator and metal nanocapillaries. The physical and chemical properties of the inner surface on micro and nano-scales of these capillaries can be investigated by the interaction of ions with the surfaces.

Stolterfoht et al. (2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 133201) have found the evidence for capillary guiding in studying the transmission of 3 keV Ne^{7+} ions (energy/charge $E/q \approx 10^0$ kV) through the polymer nanocapillaries. The self-organized charge-up process was thought to inhibit close contact between the ions and the inner capillary walls. Skog et al. (2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 223202) investigated the guiding effect of 7 keV Ne^{7+} ions ($E/q \approx 10^0$ kV) transmitted through SiO_2 nanocapillaries, and found the evidence of sequentially formed charge patches along the capillary. For these keV highly charged ions with $E/q \approx 10^0$ kV, the charge patches were formed in a very short time, and then the repulsive electric field rapidly becomes strong enough to deflect the ions, then the ions move along the capillary axis without charge exchange.

Zhou et al. (2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 103401) have investigated the transmission of 100 keV protons ($E/q \approx 10^2$ kV) through the nanocapillaries in polycarbonate (PC) membrane. It was found that the transmitted ions are located around the direction of the incident beam, rather than along the capillary axis. This indicated that the transmission mechanism of hundreds of keV protons through nanocapillaries is significantly different from that for keV highly charged ions. For 100 keV protons, several charge patches suppress the protons to penetrate into the surface, and the protons are transmitted via twice specular scattering near the surface and finally emitted along the incident direction. However, the study of the transmission of $E/q \approx 10^1$ kV ions through nanocapillaries is still lacking.

In this work, we measure the time evolution of the relative transmission rate, charge state and angular distribution as well as the full width at half maximum of 20 keV protons ($E/q \approx 10^1$ kV) transmitted through the nanocapillaries in PC membrane at a tilt angle of $+1^\circ$. We observe a very long time pre-guiding period before the stable guiding process is established. During the pre-guiding period the direction of the transmitted H^+ ions changes to the direction of capillary axis gradually. The transmitted H^0 particles are composed of two peaks: the higher and sharper one is nearly in the beam direction, the wider and lower one is around the guiding direction. With the continuous charging-up process, the intensities of the narrow and sharp peak of transmitted H^0 near the beam direction will decrease and disappear at the end. The data indicate that the scattering and guiding forces are both important for $E/q \approx 10^1$ kV ions during the period of pre-guiding process, and the guiding force is dominant till a long time pre-guiding period is ended. This finding will fill in the gap between $E/q \approx 10^0$ kV and 10^2 kV of previous studies of ions transmitted through nanocapillaries. It is also helpful for finding the applications of nano- and micro-sized ion beams produced by tapered glass capillary with $E/q \approx 10^1$ kV.

Keywords: nanocapillary membrane, charge patch, guiding effect, pre-guiding period

PACS: 34.50.-s, 79.20.Rf, 68.49.Sf

DOI: 10.7498/aps.66.093401

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11675067) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11605078).

† Corresponding author. E-mail: chenxm@lzu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: shaojx@lzu.edu.cn