

100-keV 质子在聚碳酸酯微孔膜中传输的动态演化过程

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

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

Zhou Wang Niu Shu-Tong Yan Xue-Wen Bai Xiong-Fei Han Cheng-Zhi Zhang Mei-Xiao Zhou Li-Hua Yang Ai-Xiang Pan Peng Shao Jian-Xiong Chen Xi-Meng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 103401 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.103401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.103401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

100-keV 质子在聚碳酸酯微孔膜中传输的动态演化过程*

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[‡]

(兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2016年1月17日收到; 2016年3月7日收到修改稿)

本工作测量了 100 keV 质子穿过倾角为 $+1^\circ$ 的聚碳酸酯 (PC) 纳米微孔膜后, 出射粒子电荷态、位置的分布以及相对穿透率随时间的演化. 实验发现, 100 keV (E/q 约为 100 kV) 质子穿过绝缘纳米微孔的物理机理与 keV 能区的导向过程有根本的不同. 在实验测量初期, 微孔内部无电荷沉积, 质子主要通过微孔内表面以下的多次随机二体碰撞过程为主要传输机理; 而当充放电平衡后, 微孔内部有明显的电荷斑, 主要传输机理为电荷斑辅助的表面以上(或近表面)的镜面散射行为. 这一物理图像使质子穿过微孔的物理认识更加深入和完整, 也将促进百千电子伏质子微束的应用.

关键词: 微孔膜, 电荷斑, 表面散射

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

DOI: 10.7498/aps.65.103401

1 引言

随着纳米技术的发展, 纳米尺寸的微管在物理、生物^[1-3]和材料^[4]等领域得到了广泛的应用. 对不同材料的纳米微管的电特性研究显得越来越重要. 探索带电离子在纳米微管中的输运^[5]是一种对纳米微管电特性研究的很好手段, 同时对微束的控制与应用^[6,7]也是十分有价值的.

Stolterfoht 等^[5]发现的“导向效应”显示, 低能高电荷态离子能够在与微孔膜的倾角大于微孔几何张角的情况下, 保持初始电荷态并沿着孔轴方向(微孔轴线方向)穿过微孔, 而不会与微孔内壁发生近距离碰撞. 此后的研究表明^[8-13], 在微孔内壁随着时间演化逐个形成的自组织电荷斑对导向效应起决定性作用. 尽管电子和负离子穿过绝缘微孔的机理和正离子不同, 但是也都观测到了表观上的导向现象^[14-17].

另一方面, MeV 能区的离子在微孔中的输运行为也得到了研究^[18]. 研究结果表明: 微孔内壁沉积的电荷对 MeV 离子穿过微孔没有影响, 而深入表面以下的多次随机的非弹性碰撞是主要输运机理. 基于二体卢瑟福散射的蒙特卡洛计算可以较好地描述该能区离子穿过微孔的传输特性.

在中间能区 (100 keV), 离子穿过纳米微孔的输运机理是一个未被充分研究的重要问题. 在应用方面, 百千电子伏的离子正好处在布拉格峰附近, 其在物质中射程一般在微米量级且在物质表面沉积能量较大, 这使得百千电子伏离子微束在单细胞辐照领域有很好的应用前景. 因此, 该能区离子在纳米微孔中的输运机理需要深入地研究.

在本工作中, 我们测量了 100 keV 质子穿过倾角为 $+1^\circ$ 的 PC 纳米微孔膜后, 出射粒子的出射角(出射粒子与入射离子间的夹角)分布、电荷态分布以及相对穿透率随时间的演化. 实验结果表明: 在充放电平衡后, 出射粒子角分布逐渐转向入射束

* 国家自然科学基金(批准号: 11174116, 11175075)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: shaojx@lzu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: chenxm@lzu.edu.cn

流方向附近, 而不在导向方向. 同时, 我们利用理论计算针对这一特性给出定量的解释.

2 实验方法

本实验在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完成. 实验装置如图 1 所示.

320 kV 高电荷态离子综合研究平台使用 14.5 GHz ECR 离子源. 束流密度为 1 nA/mm^2 的质子束经过两块相距 75 cm, 孔径为 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 光栏准直后 (发散度为 0.2°), 与高真空靶室中央的 PC 微孔膜碰撞, 靶室真空度为 10^{-6} Pa . 在实验中, 微孔膜的倾斜角 ϕ (入射束流与微孔膜法向量之间的夹角) 通过精度为 0.1° 的调角器来实现, 微孔膜的俯仰角通过位于靶室前端距离微孔膜 10 cm 处的一对静电偏转板来调节, 保证束流在竖直方向上以 90° 垂直入射微孔膜. 靶室后端的偏转板距靶 7 cm 处, 通过调节后偏转板上所加高压使得出射粒

子中的 H^+ 离子和 H 原子在 y 轴方向得以分离并且保留了其在 x 轴方向的信息. 出射粒子的位置分布信息被距离靶架后方 30 cm 处的二维微通道板探测器记录. 图 1 (c) 所示的是最终形成的图像, 其中上束斑为 H^+ 离子, 下束斑为 H 原子, 可以看到 H^+ 与 H^0 得到了有效分离, 并且本底计数较低.

本实验所采用的 PC 绝缘微孔膜制备过程是先经过德国 GSI 的 11.4 MeV/u 铀离子辐照, 然后在 5 M ($1 \text{ M} = 1 \text{ mol/L}$), 50°C 的氢氧化钠溶液中蚀刻, 使重离子径迹在 PC 膜中形成微孔. 微孔的直径为 200 nm, 厚度为 $30 \mu\text{m}$, 其深宽比为 150 : 1, 对应的几何张角为 0.38° . 图 1 (b) 所示的是该微孔膜的扫描电子显微成像, 从图中可以看到微孔之间分离较大且没有发生重叠现象. 从由此制作的纳米线可以看出微孔为规则的圆柱体 [19], 孔径一致且内表面比较光滑. 为了避免在实验过程中发生的表面充电效应, 在微孔膜前后平面都进行了以 45° 方向镀有 30 nm 厚的金层.

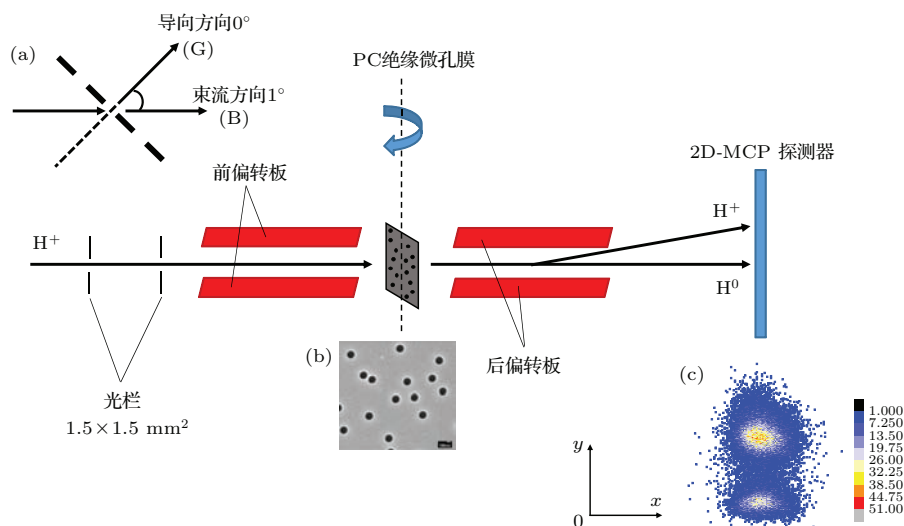


图 1 (网刊彩色) 实验装置示意图 (a) 对束流方向 (B) 和导向方向 (G) 的定义; (b) PC 绝缘微孔膜的扫描电子显微镜成像; (c) 100 keV H^+ 离子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射微孔膜后所呈现的典型二维谱图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of the experiment: (a) Definitions of the beam direction (B) and guiding direction (G); (b) SEM image of the PC nanocapillary membrane; (c) the typical 2D spectrum of transmitted particles with 100 keV incident energy and with a tilt angle of $+1^\circ$.

3 实验结果

图 2 给出了 100 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 绝缘微孔膜后出射粒子投影谱形的时间演化. 从图 2 可以看出, 在实验刚开始阶段 H^+ 和 H^0 的出射角方位都分布在 $+1^\circ$ 方向, 也就是微孔的轴向方向 (G), 并且出射粒子位置分布呈现较好的高斯

型分布. 随着沉积电荷的增加, 见图 2 (b), 出射的 H^+ 和 H^0 粒子逐渐趋向 0° 方向, 也就是质子的入射方向 (B). 当微孔内部沉积电荷达到一定量时, 见图 2 (c), 出射的 H^+ 离子在大约 -0.2° 附近开始出现了一个小峰, 出射质子呈现双峰叠加的行为. 达到充放电平衡后, 从图 2 (d) 可以看到 H^+ 离子在 -0.2° 附近的峰逐渐明显, 顺着入射方向出射 H^+

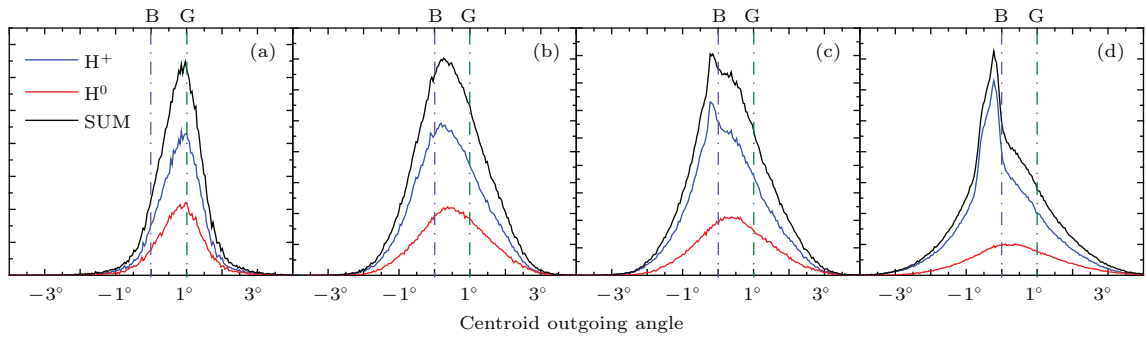


图2 (网刊彩色) 出射粒子位置谱在 x 方向的投影随测量时间的演化 (a)—(d) 分别为微孔膜前表面接收电荷为 5×10^5 , 2×10^7 , 4×10^7 和 7×10^7 pC 时的投影谱图. 黑色实线代表总的出射粒子, 蓝色和红色实线分别表示出射的 H^+ 和 H^0

Fig. 2. (color online) The time evolution of the transmitted particles projected in x direction: (a)—(d) present the charge deposited on the front surface of 5×10^5 , 2×10^7 , 4×10^7 and 7×10^7 pC; the black, blue and red solid lines present the total transmitted particles, H^+ and H^0 , respectively.

离子相对比例明显增强, H^0 在出射粒子中所占的份额明显减少. 为了进一步阐述 100 keV 质子穿过微孔膜后出射粒子特性随时间演化的过程, 我们在图3—图6中详细给出出射粒子的中心角度、半高宽 (FWHM)、电荷态分布以及相对穿透率随时间演化特性图.

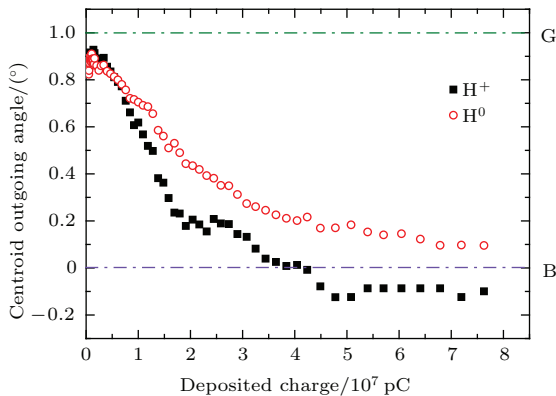


图3 (网刊彩色) 100 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 绝缘微孔膜后出射粒子中心角随时间的演化, 其中黑色实心方形表示出射的 H^+ 离子, 红色空心圆形表示出射的 H^0 原子

Fig. 3. (color online) Evolution of the centroid angle of transmitted particles at an incident energy of 100 keV and a membrane tilt angle of $+1^\circ$. The black solid square and red open circle present the transmitted H^+ and H^0 , respectively.

100 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 绝缘微孔膜后出射粒子中心角的时间演化如图3所示, 图中横坐标是从微孔膜前表面接收到的入射质子所带的总电荷量. 在测量刚开始阶段, H^+ 和 H^0 的出射中心角位于 $+0.9^\circ$ 方向, 粒子基本上是沿着微孔轴线方向出射. 随着充电过程的进行, 出射粒子的中心角均偏 0° 方向附近. 当达到充放电平衡后, H^+

和 H^0 的出射中心角分别稳定在 -0.1° 和 0.1° 附近, 即出射粒子大部分沿着质子入射方向出射, 而不是沿着微孔的导向方向.

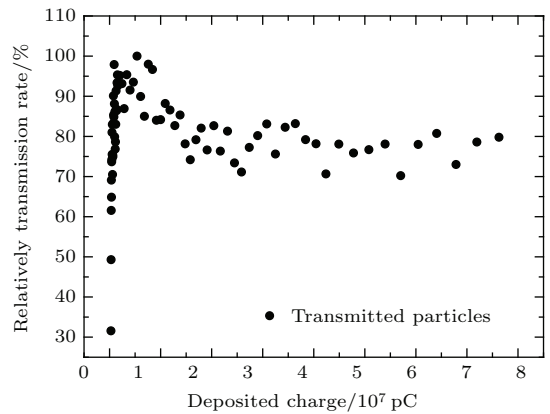


图4 100 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 绝缘微孔膜后出射粒子相对穿透率随时间的演化

Fig. 4. Evolution of the relative transmission rate of transmitted particles at an incident energy of 100 keV and a membrane tilt angle of $+1^\circ$.

图4所示为在测量过程中粒子相对穿透率随时间的演化过程. 从图4可以看出, 随着充电过程的进行, 粒子的相对穿透率在实验开始阶段由大约 30% 上升至最大值, 随后随着测量时间的增加有微弱并且缓慢的减弱. 该减弱过程是由于微孔内部积累电荷过多所导致的 Blocking 效应^[20] 所致, 微孔入口处过强的电荷斑将会适度减弱离子进入微孔的概率, 并且过度扭曲离子的轨迹减弱其出射率. 在微孔内部达到充放电平衡后, 其相对穿透率达到最大穿透率的大约 70%—80% 之间. 简而言之, 对于 100 keV 的入射质子, 微孔内部所沉积的电荷仍然会对粒子的穿透率有较为明显的增强作用.

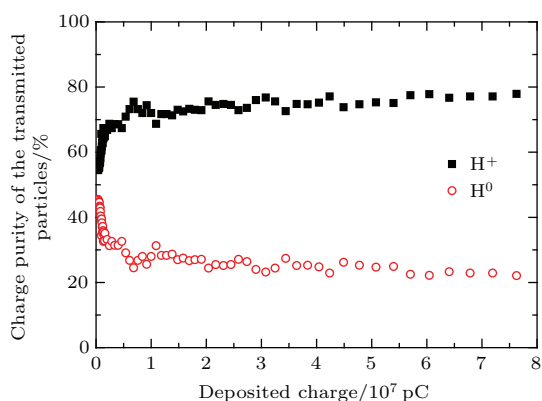


图5 (网刊彩色) 100 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 绝缘微孔膜后出射粒子电荷态分布随时间的演化, 其中黑色实心方形表示出射 H^+ 相对份额, 红色空心圆形表示出射 H^0 的相对份额

Fig. 5. (color online) Evolution of the charge purity of transmitted particles at an incident energy of 100 keV and a membrane tilt angle of $+1^\circ$. The black solid square and red open circle present the transmitted H^+ and H^0 , respectively.

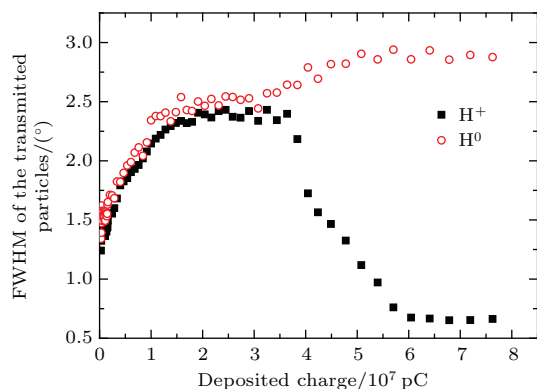


图6 (网刊彩色) 100 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 绝缘微孔膜后出射粒子半高宽随时间的演化, 其中黑色实心方形表示 H^+ , 红色空心圆形表示 H^0

Fig. 6. (color online) Evolution of the FWHM of transmitted particles at an incident energy of 100 keV and a membrane tilt angle of $+1^\circ$. The black solid square and red open circle present the transmitted H^+ and H^0 , respectively.

图5给出在测量过程中出射粒子的电荷态分布随时间的演化特性. 从图5可以看出, 在测量初始阶段, 出射粒子中质子的相对比例大约为50%左右, 该实验值和Bohr的离子在固体中穿行时的平衡电荷态公式估算出的结果保持较好的一致性, 一定程度上说明在测量刚开始时, 入射质子应当是经过微孔内表面以下数次碰撞达到电荷平衡态后, 从微孔后端出射. 随着充电过程的进行, 出射粒子中质子的份额从54%上升至70%左右, 之后经过缓慢上升在充放电平衡后, 最终出射的 H^+ 的份额保持在75%左右. 从图5中可以明确看出, 微孔内部沉

积的电荷有助于抑制入射质子和微孔内部进行的电荷交换过程.

出射粒子半高宽随时间的演化如图6所示, 在测量初期, 出射的 H^+ 离子和 H^0 原子的半高宽基本一致, 均为 1.2° 左右. 该现象说明在电荷斑尚未建立时, 质子和氢原子在微孔内部的传输机理基本一致. 随着充电过程的进行, 出射粒子中 H^+ 和 H^0 的半高宽都随着入射电荷量的增加而变大, 逐渐从 1.2° 增大至 2.2° 左右. 之后, 随着微孔内部充电量的继续增加, 出射 H^0 的半高宽保持小幅度增大, 最终稳定在 2.8° ; 而出射 H^+ 的半高宽则开始逐渐变小, 最终稳定在 0.4° 左右, 约等于微孔的几何张角, 该特性和 H^0 的演化特性相反.

4 讨论

结合上述实验现象可以看出, 100 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 微孔膜, 微孔内部沉积的电荷斑对粒子的输运过程起到重要的影响. 具体表现在, 随着充电过程的进行, 出射粒子位置分布中心角由实验开始阶段的微孔轴向方向逐步向入射束流方向转变, 最终在达到充放电平衡后保持在入射束流方向附近, 这一点与低能段的导向过程有很大不同. 另一方面, 微孔内部不断增强的电荷斑能够明显抑制入射质子在微孔内部的电荷交换过程, 出射粒子中 H^+ 成分随着充电过程的进行不断增大. 同时, 电荷斑的形成也有助于入射质子通过微孔膜, 达到充放电平衡后粒子的相对穿透率较测量初期有显著的提升. 在下文中, 我们将对这些100 keV 质子传输的主要特性做出定性分析.

在以往研究低能 (keV) 区, 离子和微孔膜相互作用时, 一般认为微孔内部电荷斑产生的导向力足以抵消入射离子倾斜入射时的横向动量, 从而让离子顺着孔道方向平行出射, 形成导向.

但是对于100 keV左右的离子, 其在倾斜状态下入射时横向动量要比低能的keV离子高一到两个数量级, 微孔内部电荷斑的库仑力很可能不能完全抵消入射离子的横向动量. 在这种情况下, 入射离子就会有较大的机会去和微孔内壁发生近距离的散射, 而这种散射力和导向力的协同作用是百千电子伏能区离子在微孔内部传输有别于低能离子的最根本原因.

当粒子在微孔内部运行时基本上会受到三种力的作用. 第一种是微孔内部沉积电荷斑对入射粒

子的长程库仑力, 即导向力, 该力倾向于抵消入射粒子横向动量, 使粒子沿孔道方向出射. 第二种是当粒子进入微孔内表面以下时, 它与表面以下原子的多次随机碰撞中所受到的二体碰撞力, 这种力倾向于使入射粒子忘记入射时轨迹、电荷等初始信息, 使粒子运动更加无规则. 第三种是当入射粒子在表面以上的近表面区域运动时, 会感受到表面最上面几层原子的短程集体散射力作用, 这种力在表面以上几个原子单位之内很强, 倾向于使小角度入射并接近表面的粒子呈现出“镜面掠射”的散射过程.

在测量初始阶段, 微孔内部没有明显的电荷沉积, 出射粒子中的质子和氢原子均按照微孔孔道方向出射, 位置分布呈现近高斯型, 半高宽约为 1.2° 明显大于微孔的几何张角 0.38° ; 并且其电荷分布符合Bohr的电荷平衡态公式计算的结果. 这些特征说明, 测量初期几乎所有的入射质子均穿入微孔内表面以下, 在表面以下的多次随机碰撞后, 入射质子丢失了对于原始电荷态以及轨迹的记忆, 其轨迹变得很曲折也很不规则, 最终不得不沿着微孔孔道方向出射. 这样的无规则出射过程将导致在实验上观测到出射质子和氢原子均沿着微孔导向方向出射, 且基本为对称高斯型、半高宽较宽, 电荷分布满足平衡电荷公式. 简而言之, 测量初期, 100 keV 质子在微孔内部传输过程是表面以下的多次随机二体碰撞过程, 仅仅是“表观”上的导向过程, 和图2(a)中的实验观测结果一致.

随着充电过程的进行, 微孔内部电荷斑基本建立, 但是其电荷斑强度仅可以适当减弱入射100 keV质子的横向动能(约几十个eV), 但不能完全抵消它. 入射离子仍然有较大概率去接近表面, 甚至穿入表面以下. 此时电荷斑仅仅是一种辅助作用, 它可以排斥入射离子以适当增加入射离子在表面以上的近表面区域内掠射通过的概率. 此时, 最上面几层的表面原子集体散射力起到至关重要的影响, 在众多向上的集体散射力合力的作用下, 入射离子将以近似的“小角度镜面反射”的方式出射. 当粒子运动到微孔的后半段时, 再经由一次电荷斑辅助的表面集体散射作用下的镜面反射后, 大部分的出射粒子将在两次镜面反射后按照入射离子方向附近出射.

由于有相当一部分入射离子仍会穿入微孔内表面以下, 经过数次随机二体碰撞后沿着孔道方向出射. 所以, 最终的出射粒子谱在 x 轴方向投影应当由两部分组成. 主要的一部分是经由电荷斑辅助

的两次镜面散射过程出射, 呈现出在入射离子方向(即B方向)的尖锐的出射峰; 另一小部分仍然是经由表面以下多次随机碰撞最终以小概率从微孔孔道方向(G方向)出射的粒子. 所以, 其谱型应当是零度左右较高的尖峰和一度左右较低的平缓高斯峰的叠加, 这一点和图2(d)的实验测量结果是相符的.

由于电荷斑仍然起到增强表面以上掠射过程概率的作用, 所以可预期粒子的出射率应当会随着电荷斑的增强而增强. 另一方面, 电荷斑起到抑制粒子接近微孔内表面的作用, 减少入射离子与表面的电荷交换, 出射粒子电荷态纯度也应当适当提高.

对于出射粒子角分布的半高宽而言, 在尚未达到充放电平衡时, 经由两次镜面散射后出射的粒子仅会在大约 0° (即B方向)方向产生一个较弱的镜面散射峰. 此时, 结合导向方向 1° 附近出现的高斯型导向峰, 两个峰叠加将导致总的谱型仍呈现出近高斯型但半高宽会增加, 该趋势如图2(b)所示.

当微孔内部达到充放电平衡之后, 出射粒子中大部分是以镜面散射的形式出射, 较少部分是以导向方式出射. 此时, 0° 附近的窄峰占主导地位, 即以 0° 附近有一尖锐窄峰, 辅以 1° 附近较低较宽的肩膀构型. 谱型呈现出不对称趋势, 由于 0° 附近窄峰占主要地位, 故仍对其进行半高宽统计. 同时, 由于镜面散射行为相比表面以下随机碰撞来说更加规则, 其出射粒子角度分布会受微孔几何构型限制, 所以 0° 附近镜面散射峰半高宽约为 0.4° , 基本和微孔孔道几何张角 0.38° 相当, 如图2(d)所示.

简而言之, 0° 附近镜面散射峰的逐步出现将使出射粒子位置分布谱的半高宽有所增加; 而当镜面散射峰成为主要部分时, 出射粒子角度分布的半高宽又会逐渐减小.

目前, 本实验并未对不同的微孔几何构型进行研究, 而这将在我们未来的实验中开展. 在此, 我们初步推测, 孔径对百千电子伏离子的传输过程影响大致如下: 当孔径减小时, 离子在微孔中的传输过程会变得更加曲折, 可能会经过更多次的镜面反射后出射, 这同时也要考虑在孔道后半段所建立起的电荷斑能不能克服离子的横向动量阻止其进入表面以下, 所以在细孔的后半段可能会以表面以下随机碰撞为主, 和粗孔的传输行为有所不同. 当入射离子以 $+1^\circ$ 入射孔径大于200 nm的微孔膜时, 离子的传输轨迹很有可能是经过一次镜面反射后

沿 -1° 方向出射.

5 总 结

本工作测量了 100 keV 质子以 $+1^\circ$ 倾斜角入射 PC 绝缘微孔膜后出射粒子角度分布、电荷态分布以及相对穿透率随时间的演化特性. 发现微孔内沉积的电荷可以明显提高该能量质子的穿透率和出射电荷态纯度; 但充放电平衡后出射粒子集中在束流入射方向附近, 而不是在导向方向, 这一点和 keV 能区的实验结果有很大不同. 我们对这一特征做出了定性的物理解释, 表明 100 keV 质子在 PC 绝缘微孔中的主要传输机理是电荷斑辅助的近表面镜面散射行为. 这一实验结果把 keV 至 MeV 能区离子在微孔中输运现象联接起来, 形成更加完整的物理图像, 即 keV 能区是表面以上远离表面的导向过程; MeV 能区是深入表面以下的非弹性散射过程; 而百千电子伏能区是电荷斑辅助下的临近表面的镜面散射过程, 这一实验结果也有助于该能区微束的控制和应用.

参考文献

- [1] Steinbock L J, Otto O, Chimere C, Gornall J, Keyser U F 2010 *Nano Lett.* **10** 2493
- [2] Létant S E, van Buuren T W, Terminello L J 2004 *Nano Lett.* **4** 1705
- [3] Iwai Y, Ikeda T, Kojima T M, Yamazaki Y, Maeshima K, Imamoto N, Kobayashi T, Nebiki T, Narusawa T, Pokhil G P 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 023509
- [4] Martin C R 1994 *Science* **266** 1961
- [5] Stolterfoht N, Bremer J H, Hoffmann V, Hellhammer R, Fink D, Petrov A, Sulik B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 133201
- [6] 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
- [7] Cassimi A, Ikeda T, Maunoury L, Zhou C L, Guillous S, Mery A, Lebius H, Grygiel A, C, Khemliche H, Roncin P, Merabet H, Tanis J A 2012 *Phys. Rev. A* **86** 062902
- [8] Stolterfoht N, Hellhammer R, Bundesmann J, Fink D, Kanai Y, Hoshino M, Kambara T, Ikeda T, Yamazaki Y 2007 *Phys. Rev. A* **76** 022712
- [9] Stolterfoht N, Hellhammer R, Fink D, Sulik B, Juhász Z, Bodewits E, Dang H M, Hoekstra R 2009 *Phys. Rev. A* **79** 022901
- [10] Skog P, Zhang H Q, Schuch R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 223202
- [11] Zhang H Q, Skog P, Schuch R 2010 *Phys. Rev. A* **82** 052901
- [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] Juhász Z, Sulik B, Rácz R, Biri S, J Bereczky R, Tökési K, Kövér Á, Pálinkás J, Stolterfoht N 2010 *Phys. Rev. A* **82** 062903
- [14] Schiessl K, Tökési K, Solleder B, Lemell C, Burgdörfer J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 163201
- [15] Milosavljević A R, Víkor G, Pešić Z D, Kolarž P, Šević D, Marinković B P, Mátéfi-Tempfli S, Mátéfi-Tempfli M, Piraux L 2007 *Phys. Rev. A* **75** 030901
- [16] Das S, Dassanayake B S, Winkworth M, Baran J L, Stolterfoht N, Tanis J A 2007 *Phys. Rev. A* **76** 042716
- [17] Feng D, Shao J X, Zhao L, Ji M C, Zou X R, Wang G Y, Ma Y L, Zhou W, Zhou H, Li Y, Zhou M, Chen X M 2012 *Phys. Rev. A* **85** 064901
- [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)]
- [20] Stolterfoht N, Hellhammer R, Sulik B, Juhász Z, Bayer V, Trautmann C, Bodewits E, Hoekstra R 2011 *Phys. Rev. A* **83** 062901

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

Zhou Wang Niu Shu-Tong Yan Xue-Wen Bai Xiong-Fei Han Cheng-Zhi
 Zhang Mei-Xiao Zhou Li-Hua Yang Ai-Xiang Pan Peng
 Shao Jian-Xiong[†] Chen Xi-Meng[‡]

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

(Received 17 January 2016; revised manuscript received 7 March 2016)

Abstract

In recent years, the guiding effect of highly charged ions (HCIs) through insulating nanocapillary membrane has received extensive attention. It is found that slow highly charged ions at keV energies can be guided along the capillary even when the tilt angle of membrane is a few degrees and larger than geometry opening angle of the capillary. Initially, Stolterfoht *et al.* (2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 133201), according to the incident ions deposit positive charges on the capillary surface in a self-organizing manner, proposed scattering and guiding regions to explain this guiding phenomenon. Hereafter, a detailed experiment and simulation performed by Skog *et al.* (2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 223202) provided clear evidence that the guiding process is actually attributed to the self-organized charge patches formed on the inner capillary walls. HCIs entering into a capillary may hit the surface, leaving their charge on the inner wall of the capillary. When the capillary axis is tilted with respect to the beam incidence direction, a charge patch is formed in the capillary entrance, simultaneously a repulsive electric field is created. After sufficient charge deposition this field is strong enough to deflect the subsequent ions in the direction of the capillary exit. Therefore, the ions are guided through the capillary. The deflection at the charge patch only occurs at relatively large distances from the capillary wall so that the incident charge state of the ions is kept during the passage through the capillary. Further experimental and theoretical studies on various target materials, such as polyethylene terephthalate (PET), polycarbonate (PC), SiO_2 , and Al_2O_3 indeed found that a single or a small number of charge patches near the entrance formed in the charge up process dominate the observed oscillatory variations of the ion emission angle and the final guiding process. Besides, measurements and simulations of the steering of swift ions at MeV energies have shown that the transmission mechanism of the high energy ions in a tapered tube is primarily dominated by multiple random inelastic collisions below the surface and the charge patches are not responsible for the transmission process. However, the studies of the transmission of hundreds keV ions through nanocapillaries are still lacking so far. In this work, we observe the evolution of the angular distribution, charge state distribution, FWHM and transmission rate of 100 keV H^+ ions incident on a polycarbonate (PC) membrane at $+1^\circ$ tilt angle. It is found that the transmitted particles are located around the direction along the incident beam, not along the capillary axis, which suggests that the mechanism of hundreds keV ($E/q \sim 100$ kV) protons through capillaries is significantly different from that for the guiding effect of keV protons. We present a qualitative explanation based on the data: that the 100 keV H^+ are transmitted by multiple random inelastic collisions below the surface is attributed to the absence of the deposited charges on the surface of the capillary at the beginning of the experiment. After the equilibrium, several charge patches are formed on the inner wall of the capillary, which suppresses the ions to penetrate into the surface of the capillary, while the H^+ is transmitted via specular scattering above the surface (or closest to the surface) assisted by the charge patches, and finally is emitted in the incident direction through twice specular scattering. This finding increases the knowledge of charged ions through nanocapillaries, which is conducive to the applications of nanosized beams produced by capillaries or tapered glass within hundreds keV energies in many scientific fields.

Keywords: nanocapillary membrane, charge patch, surface scattering

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

DOI: 10.7498/aps.65.103401

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174116, 11175075).

[†] Corresponding author. E-mail: shaojx@lzu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: chenxm@lzu.edu.cn