

16 keV C⁻ 离子在锥形玻璃管中的输运过程

牛书通[†] 詹欣 华强 李文腾 周利华 杨廷贵

(中核四〇四有限公司, 兰州 732850)

(2023 年 9 月 17 日收到; 2023 年 12 月 1 日收到修改稿)

鉴于经锥形玻璃管聚焦的离子束在微纳加工、微区分析以及辐照生物学等领域具有广阔的应用前景, 本文研究了 16 keV C⁻ 在不同倾斜角度的锥形玻璃管中输运过程. 实验发现当处于 0° 倾斜角度时, 出射粒子由核区和晕区构成, 核区是从锥形管后锥孔中直接出射, 未与锥形管内壁之间发生电荷交换, 主要成分为 C⁻ 离子. 晕区是 C⁻ 与锥形管内壁发生部分电荷交换作用, 由 C⁻ 和 C⁰ 构成. 当倾斜角度为 1° 时, 出射离子由两部分组成: C⁰ 原子束斑和 C⁻ 离子束斑, 未出现核区. 出射核区的离子方向始终保持在入射粒子方向, 与锥形管倾斜角度无关. 随着锥形管不断倾斜, 相对透射率不断减小, C⁰ 束斑占比增加, C⁻ 束斑占比减小. 锥形管对入射离子有聚焦效应. 本实验弥补了低能负离子在锥形管运输过程研究的欠缺, 有助于聚焦离子束的后续开发应用.

关键词: 锥形玻璃管, 输运特性, 负离子**PACS:** 34.50.-s, 79.20.Rf, 68.49.Sf**DOI:** 10.7498/aps.73.20231513

1 引言

随着人们对于带电离子与微孔膜相互作用研究的深入, 锥形管与带电粒子的相互作用逐渐引起研究人员的关注. 相较于微孔膜的直管结构, 锥形玻璃管入口大, 在百微米量级, 而出口多在于微米量级, 这种入口大出口小的结构, 可以使出口直接面向周围环境, 而不用担心对真空有较大的破坏, 同时锥形管能够对入射离子形成亚微米尺度的聚焦离子束^[1]. 正是基于锥形管以上优良特性, 使其在生物学^[2,3]、材料分析^[4]等领域得到了广泛的应用. 探索带电离子在锥形微管中的输运^[5]是一种对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.

首先, Stolterfoht 等^[5]在 2002 年发现了低能离子在微孔膜中的导向效应, 利用 3 keV 的 Ne⁷⁺ 入射具有一定倾斜角度的纳米微孔膜, 发现离子几

乎都是沿着孔道轴向方向出射且保持电荷态不变. 研究发现是由于微孔内壁形成的自组织电荷斑抑制了电荷交换并偏转入射离子顺着孔的轴线方向出射. 随后, 许多机构开始致力于带电粒子在微孔中输运机制的研究, 各种能量 (从 eV 到 MeV) 和类型 (电子, 质子, 负离子) 的入射离子陆续被用于实验^[6-13].

鉴于锥形管形成亚微米尺度的聚焦离子束有广阔应用前景, 其同样引起了人们的研究兴趣^[6,14-21]. 在低能区, Yamazaki 研究组^[6]用 8 keV 的 Ar⁸⁺ 离子入射锥形玻璃微管时, 发现其聚焦系数在 10 左右, 同时确认了离子在玻璃微管的导向效应运输, 作用原理同样是自组织的电荷传输. 对于高能区, Hasegawa 等^[14]用 2 MeV 的质子轰击锥形玻璃管, 在输运过程中发现微孔内壁沉积的电荷对 MeV 离子穿过微孔没有影响, 主要以深入表面以下的多次随机的非弹性碰撞为主要输运机制^[15-18].

目前对于离子与锥形玻璃微管的输运特性主

[†] 通信作者. E-mail: niusht14@lzu.edu.cn

要集中在正离子与玻璃微管的运输研究, 相较于正离子, 负离子为弱束缚系统, 与正离子入射情况有很大不同^[1], 对低能负离子与锥形玻璃微管的运输研究较少, 且主要集中在负离子入射 0° 倾斜的锥形玻璃管的运输特性^[22,23], 对不同倾斜角度的运输特性研究较少. 本文将重点研究低能负离子在不同倾斜角度锥形管中的运输过程, 获得出射粒子中心角度、二维分布谱图、相对透射率和半高宽 (FWHM) 的演化情况^[1]. 本文补充了低能负离子与锥形管实验研究欠缺, 有助于加强对低能负离子与锥形管运输过程的认识.

2 实验技术

本研究是利用兰州大学核科学与技术学院 2×1.7 MV 静电串列加速器实验平台的负离子开展, 实验装置如图 1 所示. 利用铯溅射负离子源产生 C^- 离子束经过两组相距 75 cm, 孔径为 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的光栅准直后 (发散角度为 0.2°), 与高真空靶室的中央的锥形玻璃管发生碰撞, 靶室真空度为 10^{-6} Pa, 锥形玻璃管的角度通过精度为 0.1° 的调角器实现, 出射的离子束经过距离锥形玻璃管后 5 cm 的偏转板偏转后, 出射粒子中的 C^- 离子和 C^0 原子在 Y 轴方向得以分离并且分离同时保留其在 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 处的二维微孔通道板探测器记录.

测器记录.

本实验所采用的锥形管是普通高硼硅玻璃管, 主要成分是 81% SiO_2 , 13% B_2O_3 , 4% Na_2O , 2% Al_2O_3 ^[23]. 锥形管是通过加热高硼硅玻璃直管玻璃管中间部分, 然后以一定恒力向两端拉伸, 从而获得入口直径为 $580 \mu\text{m}$, 出口直径为 $23 \mu\text{m}$, 长度为 30 mm 的锥形玻璃管, 锥形玻璃管的锥角为 1° .

3 实验结果

在这一部分重点介绍了 16 keV C^- 在不同倾斜角的锥形管内出射粒子运输特性的演化情况.

3.1 16 keV C^- 在处于 0° 倾斜角锥形管中的运输特性

图 2 和图 3 分别给出了在无偏转电压和偏转电压为 300 V 时, 16 keV C^- 在倾斜角度为 0° 的锥形玻璃管中出射粒子的二维分布谱图 (图 2(a)、图 3(a)) 以及在 X , Y 轴方向上的投影分布情况 (图 2(b)、图 3(b)). 当锥形管处于 0° 倾斜角时, 出射二维谱图由核区 (core) 和晕区 (halo) 两部分组成, 其中核区位于出射粒子的中心方向, 其中心出射角度为 0° , 全部由 C^- 离子构成, 如图 2 和图 3 中红线区域. 晕区位于核区的四周, 如图 2 中蓝线区域. 核区和晕区之间有明显的空白区域. 在偏转电压的作用下, 晕区分为晕区的 C^0 原子区域和晕

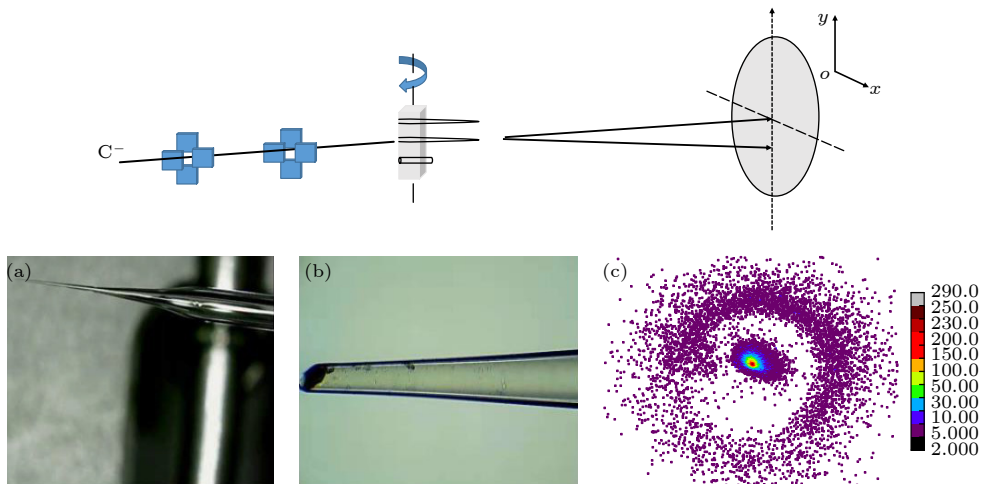


图 1 实验装置示意图 (a) 使用锥形管轮廓图, 入口直径为 $580 \mu\text{m}$; (b) 锥形出口情况, 直径为 $23 \mu\text{m}$; (c) 倾斜角度为 0° 时的二维谱图

Fig. 1. The schematic view of the setup for the ion transmission experiments: (a) The profile of tapered glass capillary with an inlet diameter of $580 \mu\text{m}$ and (b) the outlet with a diameter of $23 \mu\text{m}$; (c) the typical two-dimensional spectrum of transmitted particles with 16 keV incident energy and with a tilt angle of 0° .

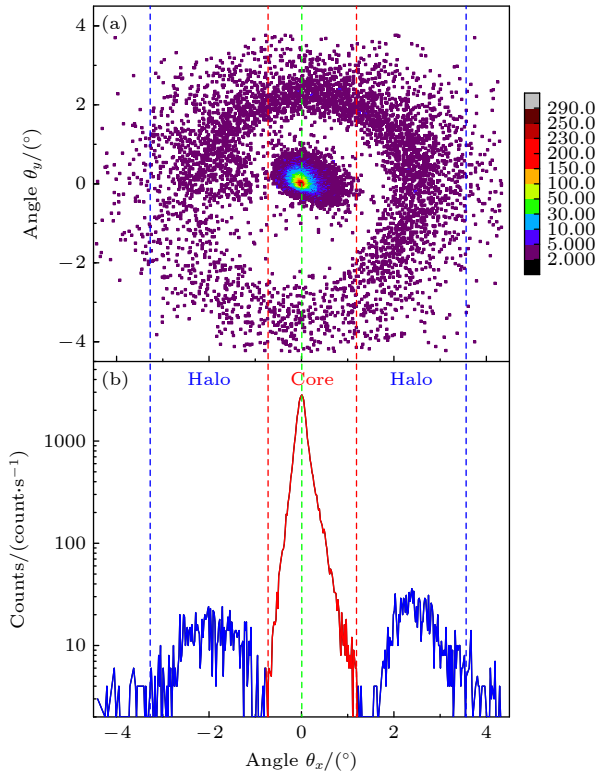


图 2 16 keV C^- 入射处于 0° 倾斜角的锥形管, 未加偏转电压时出射粒子的二维分布谱图 (a) 以及在 X 轴方向上的投影分布情况 (b)

Fig. 2. The typical two-dimensional spectrum (a) and the projections in the X-axis direction of the transmitted particles (b) after 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary with a tilt angle of 0° with the 0 V deflection bias.

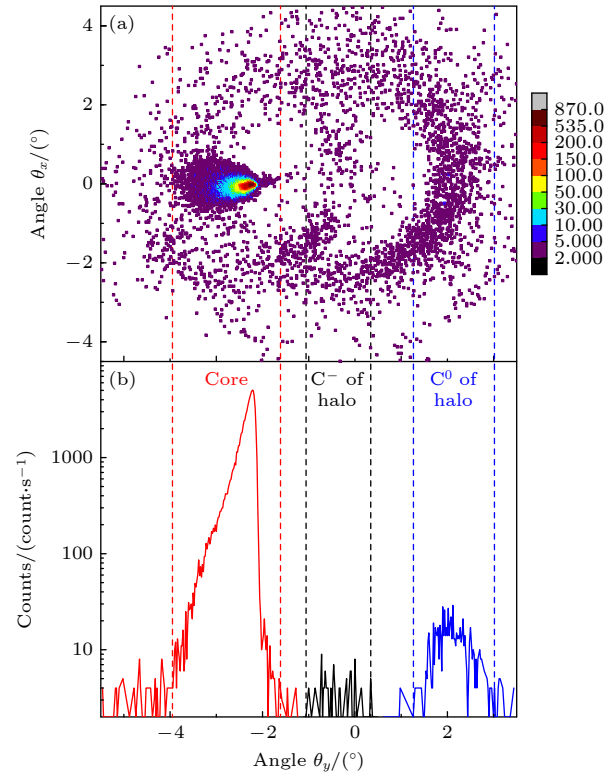


图 3 16 keV C^- 入射处于 0° 倾斜角的锥形管, 偏转电压为 300 V 时出射粒子的二维分布谱图 (a) 以及在 Y 轴方向上的投影分布情况 (b)

Fig. 3. The typical two-dimensional spectrum (a) and the projections in the Y-axis direction of the transmitted particles (b) after 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary with a tilt angle of 0° with the 300 V deflection bias.

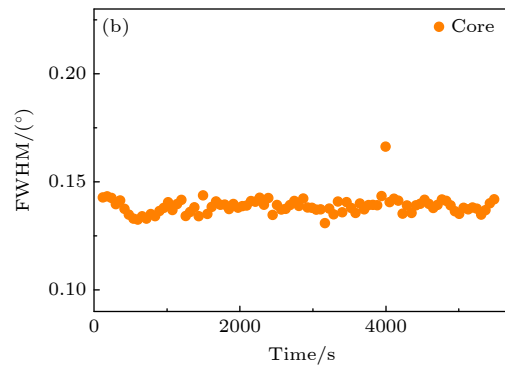
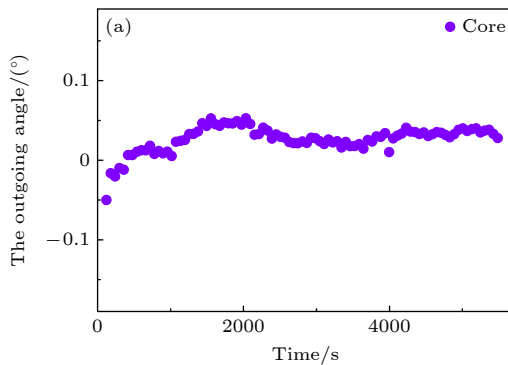


图 4 16 keV C^- 入射处于 0° 倾斜角的锥形管时, 出射离子 core 区域中心角度分布 (a) 和半高宽 (b) 的演化情况

Fig. 4. The evolution of the outgoing angle of core (a) and the FWHM of the transmitted particles (b) for 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary at the tilt angle of 0° .

区的 C^- 离子区域两部分. 即 16 keV C^- 在倾斜角度为 0° 的锥形玻璃管中的出射离子由中心的核区 (红色)、晕区的 C^0 原子 (蓝色) 和晕区的 C^- 离子 (黑色) 构成.

随着入射粒子不断入射, 核区的中心出射角度

从开始阶段的 -0.05° 逐渐增加到 0.05° , 随后逐渐下降到 0.03° 并保持上下波动, 可以认为核区的中心出射角度沿 0° 方向出射, 如图 4(a) 所示. 出射的核区粒子的半高宽始终维持在 0.14° 附近, 如图 4(b) 所示.

随着离子不断入射, 相对透射率由开始阶段的 60% 快速增加到 100%, 随后逐渐减小并维持在 90% 上下, 如图 5(a) 所示. 出射离子由中心的核区、晕区的 C^0 原子和晕区的 C^- 离子构成, 三部分占比基本保持不变, 即核区 (紫色) 占比为 96.2%, 晕区 C^0 原子 (蓝色) 占比为 2.3%, 晕区 C^- 离子 (红色) 的占比为 1.5%, 如图 5(b).

通过以上对 0° 倾斜角的锥形管运输分析可知, 出射粒子主要由核区和晕区构成, 晕区主要由晕区 C^0 和晕区 C^- 构成. 核区的中心出射角度方向为 0° , 是直接从前锥孔中出射, 未与内壁发生电荷相互作用, 电荷价态保持不变, 因此主要由 C^- 离子构成; 晕区是入射 C^- 与锥形管内壁发生部分电荷相互作用, 一部分转变为 C^0 , 一部分电荷态保持不变, 主要由 C^- 离子和 C^0 原子构成.

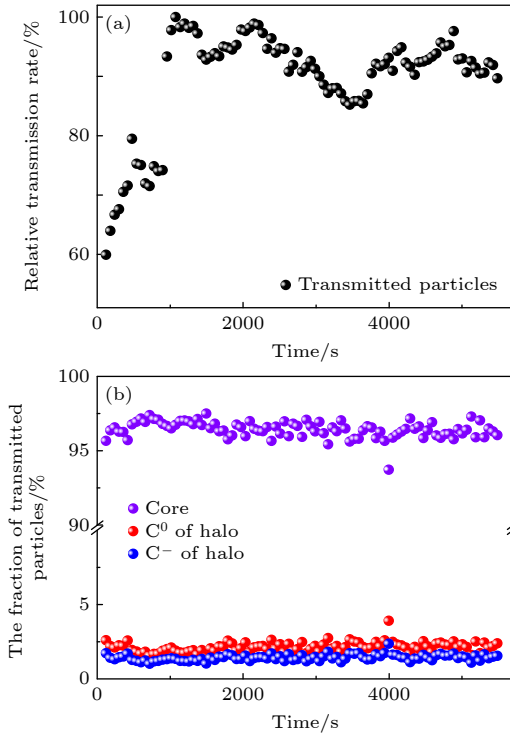


图 5 16 keV C^- 入射处于 0° 倾斜角的锥形管时, 相对透射率 (a) 和 C^- , C^0 占比 (b) 的演化情况

Fig. 5. The evolution of the relatively transmission rate (a) and the fraction of the transmitted particles (b) for 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary at the tilt angle of 0° .

3.2 16 keV C^- 在处于 1° 倾斜角锥形管中的运输特性

图 6 给出了 16 keV C^- 入射处于 1° 倾斜角的锥形管时, 出射粒子的二维分布谱图以及在 Y 轴

方向上的投影分布情况, 与 16 keV C^- 入射处于 0° 倾斜角的锥形管的二维分布谱图相比, 16 keV C^- 入射处于 1° 倾斜角的锥形玻璃管的出射粒子二维谱图, 没有出现核区 (core), 其出射离子束斑主要由出射 C^- 离子和 C^0 原子构成, C^- 离子和 C^0 原子的中心出射角度均为 1° , 即出射粒子中心角度方向沿锥形管中心线方向出射.

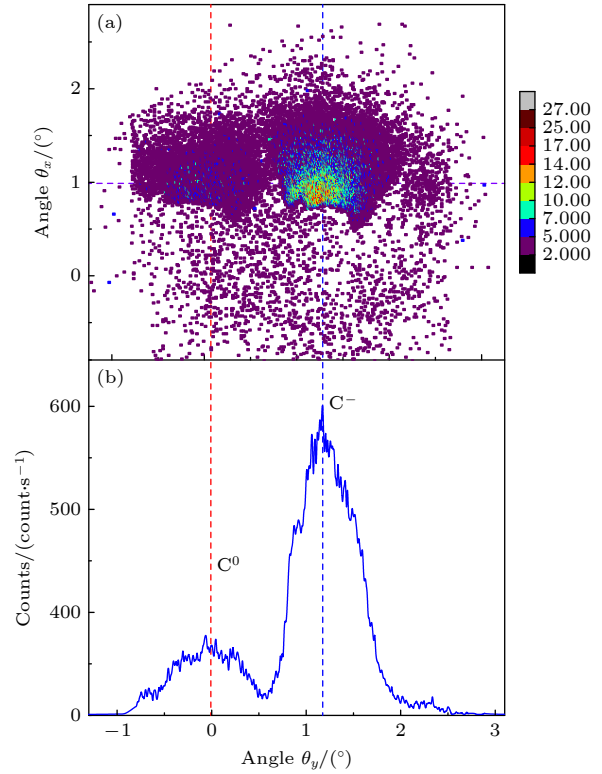


图 6 16 keV C^- 入射处于 1° 倾斜角的锥形管时, 偏转电压为 200 V 时出射粒子的二维分布谱图 (a) 以及在 Y 轴方向上的投影分布情况 (b). 其中紫线表示锥形管倾斜方向, 为 1° , 红线表示出射 C^0 在 Y 轴中心出射方向, 蓝线表示 C^- 在 Y 轴中心出射方向

Fig. 6. The typical two-dimensional spectrum (a) and the projections in the Y-axis direction of the transmitted particles (b) after 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary with a tilt angle of 1° with the 200 V deflection bias. The purple line indicates the tilt angle of the tapered glass capillary, the red line indicates the center direction of C^0 ions, and the blue line indicates the center direction of C^- ions.

随着离子不断入射, C^- 中心出射角度始终沿着 1.06° 左右波动, C^0 中心出射角度始终沿着 1° 左右波动, 即可以认为出射粒子的方向与锥形管偏转角度相同, 始终沿着锥形管中心线方向出射, 如图 7(a) 所示. C^- 和 C^0 的半高宽在 0.5° 附近上下波动, 如图 7(b) 所示.

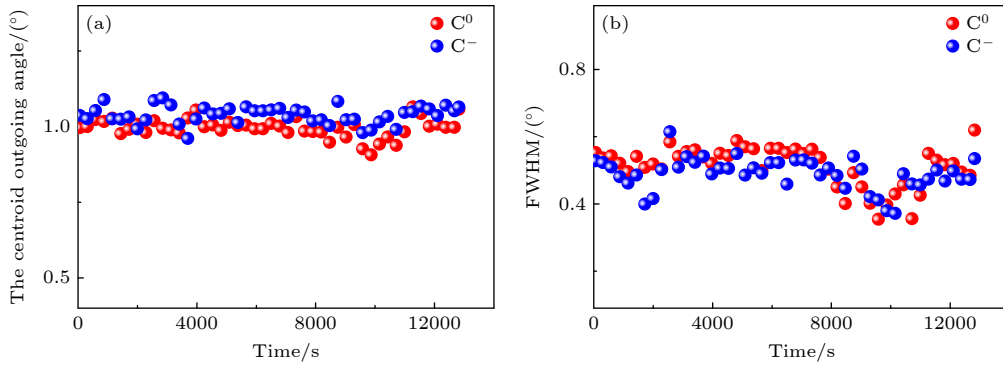


图 7 16 keV C^- 入射处于 1° 倾斜角的锥形管时, 中心出射角度方向 (a) 和半高宽 (b) 的演化情况

Fig. 7. The evolution of the outgoing angle (a) and the FWHM of the transmitted particles (b) for 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary at the tilt angle of 1°.

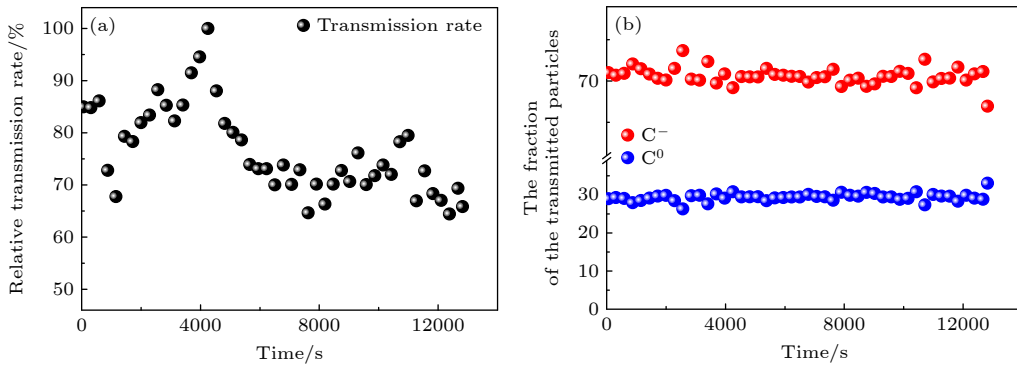


图 8 16 keV C^- 入射处于 0° 倾斜角的锥形管时, 相对透射率 (a) 和 C^- , C^0 占比 (b) 随的演化情况

Fig. 8. The evolution of the relatively transmission rate (a) and the fraction of the transmitted particles (b) for 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary at the tilt angle of 0°.

随着离子的不断入射, 相对透射率从开始阶段的 67% 迅速增加到 100% 左右, 随后逐渐减小到 70% 左右, 如图 8(a) 所示; 出射离子中 C^- 离子的占比基本保持在 70% 左右波动, 出射离子中 C^0 原子的占比基本保持在 30% 左右波动, 如图 8(b) 所示。

通过以上对 1° 倾斜角锥形管输运过程分析可知, 其与 0° 倾斜角的锥形管输运特性有很大不同, 此时出射离子主要由 C^- 和 C^0 构成, 未出现核区. C^- 和 C^0 出射的中心角度为 1°, 即粒子中心出射角度方向沿锥形管中心线方向, 出射离子中 C^- 离子、 C^0 原子占比基本保持在 70% 和 30% 左右。

3.3 16 keV C^- 在处于不同倾斜角锥形管中的输运特性

本文研究了 16 keV C^- 入射处于 0.5°, 0.8°, 1.2°, 1.4°, 1.6°, 1.8°, 2.0°, 2.4°, 3.0° 的锥形管中的输运过程, 获得出射粒子角度分布、半高宽、相对透射率和出射粒子占比的演化情况。

当锥形管倾斜角度为 0° 时, 出射粒子主要由核区和晕区两部分组成, 核区的中心出射角度为 0°; 当倾斜角度为 0.5° 和 0.8° 时, 此时出射粒子主要由核区的 C^- 离子、 C^- 离子束斑、 C^0 原子束斑等三部分组成, 其中核区的 C^- 离子中心出射角度始终保持在 0° 附近, 即沿入射离子束方向出射, C^- 离子束斑的中心出射角度分别为 0.51° 和 0.66°, 即粒子的中心出射角度沿锥形管中心线方向出射; 当锥形管倾斜角度大于 1° 时, 离子的中心出射角度随着倾斜角增加而增加, 且粒子的中心出射角度与倾斜角度相同, 即粒子的中心出射角度沿锥形管中心线方向出射, 且此时未出现核区, 如图 9(a). 随着锥形管的不断倾斜, 出射粒子的半高宽呈现先逐渐增加, 后逐渐减小的变化趋势, 如图 9(b) 所示。

通过以上在不同倾斜角度的分析, 对于核区的中心出射角度始终在 0° 左右, 即核区离子始终沿入射离子束方向出射, 而 C^- , C^0 的中心出射角度与始终倾斜角相同, 粒子的中心出射角度始终沿锥形管中心线方向出射。

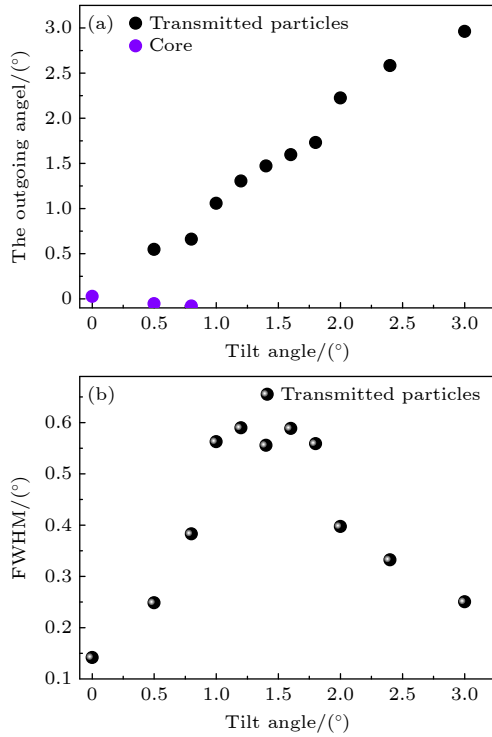


图9 16 keV C^- 入射处于不同倾斜角的锥形管时, 中心出射角度方向 (a) 和半高宽 (b) 随倾斜角度演化

Fig. 9. The evolution of the outgoing angle (a) and the FWHM of the transmitted particles (b) at various tilt angles for 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary.

当锥形管处于 0° 倾斜角时, 将相对透射率设置为 100%, 随着锥形管不断倾斜, 相对透射率快速减小, 当倾斜角度为 3° 时, 相对透射率仅相当于 0° 倾斜角的 5%, 如图 10(a) 所示. 当随着锥形管不断倾斜, 核区 (core) 的占比不断减小并最终消失, C^0 束斑的占比增加, C^- 束斑的占比减小, 如图 10(b) 所示.

带电粒子在锥形玻璃管中输运过程具有聚焦效应, 其聚焦倍数 F 定义为出射离子束流密度与入射离子束流密度的比值^[14], 即

$$F = \frac{N_o/S_o}{N_i/S_i} = \frac{N_o r_i^2}{N_i r_o^2}, \quad (1)$$

其中 N_o , N_i 分别为出射核区离子和入射离子的计数率; S_o , r_o , S_i , r_i 分别为锥形玻璃管出口的面积, 出口半径, 入口面积和入口半径.

当 16 keV C^- 入射处于 0° 倾斜角的锥形管时, 入射离子的计数率 N_i 为 8367.924/s, 出射核区离子计数率 N_o 为 234.029/s. 根据 (1) 式可得, 其聚焦倍数 F 为 17.78. 当锥形管处于 0.5° 倾斜角时, 出射核区离子计数率 N_o 为 204.028/s, 聚焦倍数

F 为 15.50. 当锥形管处于 0.8° 倾斜角时, 出射核区离子计数率 N_o 为 133.450/s, 聚焦倍数 F 为 10.13. 当锥形管倾斜角度大于 1° , 由于出射离子中没有核区离子, 无法计算其聚焦倍数.

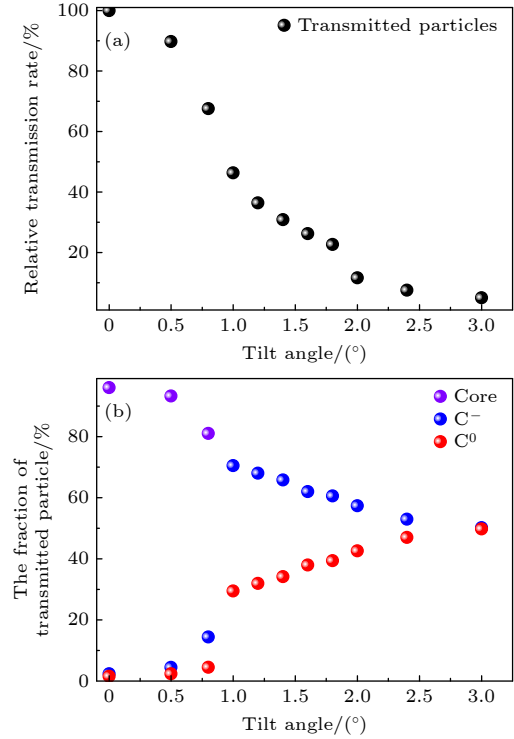


图10 16 keV C^- 离子入射处于不同倾斜角的锥形管时, 相对透射率 (a) 和 C^- , C^0 占比 (b) 随锥形管倾斜角度的演化

Fig. 10. The evolution of the relatively transmission rate (a) and the fraction of the transmitted particles (b) at various tilt angles for 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary.

4 讨论

通过实验结果的展示可以看出, 低能 C^- 入射处于不同倾斜角度的锥形玻璃管时其出现的谱图是不同的, 为了更形象地理解 16 keV C^- 在不同倾斜角度的锥形管中的输运机制, 我们引入低能负离子入射处于倾斜角 0° 和 1° 的锥形管时, 粒子在锥形管内部传输过程的示意图, 如图 11 和图 12 所示.

当锥形管倾斜角度为 0° 时, 一部分 C^- 将入射到锥形管内壁上, 直接进入内表面中, 与靶原子发生相互碰撞, 并最终沉积到内表面内部, 如图 11(a) 所示. 随着入射 C^- 在锥形管内壁电荷沉积, 开始逐渐在锥形管内壁形成负电荷斑, 从而导致一部分入射的 C^- 在锥形管出口处受到沉积负电

荷斑的作用下,以类平面反射的方式出射,这部分 C^- 未与锥形管内壁沉积电荷斑发生电荷交换,以 C^- 形式出射;一部分入射 C^- 与锥形管内壁电荷斑发生电荷交换,转变为 C^0 原子并出射,即为晕区,晕区主要由晕区 C^- 和晕区 C^0 组成,如图 11(b) 所示.此时由于倾斜角度小于锥形玻璃管的锥角,大部分入射的 C^- 可以从后锥孔中出射,即为核区,核区的 C^- 离子未与锥形玻璃管内壁发生碰撞和电荷相互作用, C^- 离子保持价态不变,即在核区主要由 C^- 离子组成,如图 11(c) 所示.

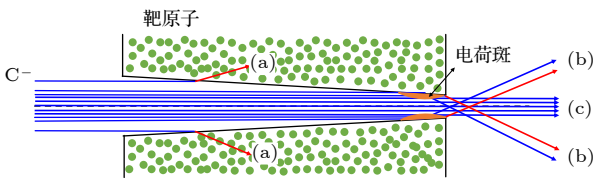


图 11 16 keV C^- 入射处于 0° 倾斜角的锥形管时,入射离子在锥形管中的运输示意图

Fig. 11. Simulated trajectories of transmitted particles for 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary at the tilt angle of 0° .

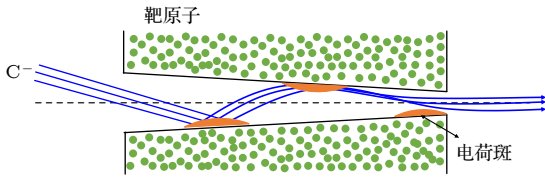


图 12 16 keV 的 C^- 离子入射倾斜角度等于 1° 的锥形玻璃管时,入射离子在锥形玻璃管中的运输示意图

Fig. 12. Simulated trajectories of transmitted particles for 16 keV C^- transmitted through tapered glass capillary at the tilt angle of 1° .

锥形管倾斜角度为 1° 时,其运输过程如图 12 所示.由于此时锥形玻璃管的倾斜角度大于锥形玻璃管的锥角, C^- 只能与锥形管内壁发生碰撞,而不能从后锥孔中直接出射,即不能出现核区现象.在离子入射开始阶段, C^- 入射到锥形玻璃管的内壁时,发生碰撞并将负电荷沉积到锥形管内壁,从而形成一系列带负电荷的内壁沉积电荷斑,随着内壁电荷的不断沉积,入射离子受到负电荷斑的排斥作用,入射方向发生偏转,随后在其他沉积负电荷斑的共同作用下,使入射离子沿锥形管的后锥孔中出射,并保持电荷价态不变,即沿锥形玻璃管的中心线方向出射.同时由于沉积的负电荷斑为动态平衡过程,一部分 C^- 入射到锥形管内壁时与负电荷斑

发生电荷交换从而转换成 C^0 ,并从锥形管后锥孔出射,但其出射发散角度较大.随着倾斜角度增加,入射 C^- 横向动量不断增加,锥形管内壁需要沉积更多的电荷才能够使 C^- 方向发生偏转,沉积的电荷越多,出射 C^0 原子增加, C^- 离子减小,相对透射率减小.即 C^- 在倾斜角大于等于 1° 的锥形管中运输时,未出现核区,出射粒子沿着锥形玻璃管中心线方向出射,相对透射率减小,出射粒子中 C^- 离子减小, C^0 粒子增加,且其出射发散角度较大,与图 9、图 10 中倾斜角大于等于 1° 数据较为符合.

当锥形管倾斜角度处于 0° 和 1° 之间时,此时出射粒子运输特征兼具锥形管倾斜角处于 0° 的运输特性和锥形管处于大角度倾斜时的运输特征.此时锥形管的倾斜角度依旧小于锥形管的锥角,入射的 C^- 仍能够从锥形管后锥孔中直接出射,但随着倾斜角度增加,能够从后锥孔中直接出射 C^- 将逐渐减小,即核区的中心角度仍在 0° 附近,但核区占比不断减小,此时与倾斜角处于 0° 的运输特性一致.对于部分 C^- 离子将在锥形管内壁沉积负电荷斑的作用下,保持电荷价态不变,并从锥形管的中心线方向出射,此时与处于大角度倾斜时的运输特征一致.核区的中心角度仍在 0° ,即沿离子入射方向出射, C^- 离子和 C^0 原子出射中心方向沿着锥形玻璃管中心线方向,核区占比减小,相对透射率减小,与图 9、图 10 中倾斜角度处于 0° 和 1° 之间的数据较为符合.

因此对于 16 keV C^- 离子入射处于不同倾斜角度锥形玻璃管时,其运输特性是不完全相同的.当倾斜角度为 0° 时,出射离子由核区、晕区 C^- 、晕区 C^0 原子构成;当倾斜角度大于等于 1° 时,出射离子主要由 C^- 、 C^0 构成,未出现核区.核区中心出射角度始终沿离子束流入射方向,与锥形管倾斜角度无关, C^- 离子、 C^0 原子出射中心角度始终沿锥形管的中心线方向.随着锥形管不断倾斜, C^0 原子不断增加, C^- 离子不断减小.

5 结 论

本文研究了 16 keV 的 C^- 入射处于不同倾斜角度的锥形管中运输过程,并对处于不同倾斜角度的锥形管进行定性分析.当倾斜角度为 0° 时,出射离子主要由核区、晕区 C^- 、晕区 C^0 构成,核区离子能够从后锥孔中直接出射,而未与锥形管内壁发生

电荷交换,保持价态不变,主要由 C^{-} 离子组成;晕区是入射离子与锥形管内壁发生电荷交换,由 C^{-} 离子和 C^0 原子构成.当倾斜角度等于 1° 时,出射离子主要由 C^{-} , C^0 构成,未出现核区.出射的 C^{-} 离子中心角度为锥形管的中心线方向,主要是由于入射的 C^{-} 在锥形管内壁沉积的负电荷的导向作用下,使出射 C^{-} 离子沿锥形玻璃管中心线方向出射.随着锥形管不断倾斜, C^0 不断增加, C^{-} 不断减小.锥形管对入射负离子有聚焦效应,聚焦倍数为 17.78.

参考文献

- [1] Niu S T 2018 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [牛书通 2018 博士学位论文 (兰州: 兰州大学)]
- [2] Steinbock L J, Otto O, Chimere C, Gornall J, Keyser U F 2010 *Nano Lett.* **10** 2493
- [3] Le'tant S E, van Buuren T W, Terminello L J 2004 *Nano Lett.* **4** 1705
- [4] 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
- [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, Benyagoub A, Grygiel 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, Bereczky R J, Tökési K, Kövér Á, Pálinkás J, Stolterfoht N 2010 *Phys. Rev. A* **82** 062903
- [14] Hasegawa J, Jaiyen S, Polee C, Chankow N, Oguri Y 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 044913
- [15] Zhou C L, Simon M, Ikeda T, Guillous S, Iskandar W, Méry A, Rangama J, Lebius H, Benyagoub A, Grygiel C, Müller A, Döbeli M, Tanis J A, Cassimi A 2013 *Phys. Rev. A* **88** 050901
- [16] Gruber E, Kowarik G, Ladening F, Waclawek J P, Aumayr F, Bereczky R J, Tökési K, Gunacker P, Schweigler T, Lemell C, Burgdörfer J 2012 *Phys. Rev. A* **86** 062901
- [17] Stolterfoht N, Gruber E, Allinger P, Wampl S, Wang Y Y, Simon M J, Aumayr F 2015 *Phys. Rev. A* **91** 032705
- [18] Simon M J, Zhou C L, Döbeli M, Cassim 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. Methods Phys. Res., Sect. B* **330** 11
- [19] Nakayama R, Tona M, Nakamura N, Watanabe H, Yoshiyasu N, Yamada C, Yamazaki A, Ohtani S, Sakurai M 2009 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **267** 2381
- [20] Nebiki T, Yamamoto T, Narusawa T, Breese B H, Teo E J, Watt F 2003 *J. Vac. Sci. Technol.* **21** 1671
- [21] Liu S D, Wang Y Y, Zhao Y T, Zhou X M, Cheng R, Lei Y, Sun Y B, Ren J R, Duan J L, Liu J, Xu H S, Xiao G Q 2005 *Phys. Rev. A* **71** 012714
- [22] Pan P, Niu S T, Song H Y, Chen X M, Shao J X 2019 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **450** 332
- [23] Song H Y, Yang Z S, Yu L F, Zhou D J, Zhou D W, Shao J X, Yang A X 2020 *Eur. Phys. J. D* **74** 208

Study on transport process of 16 keV C^- ions in tapered glass capillary: Role of capillary tilt angles

Niu Shu-Tong[†] Zhan Xin Hua Qiang Li Wen-Teng
Zhou Li-Hua Yang Ting-Gui

(The 404 Company Limited, China National Nuclear Corporation, Lanzhou 732850, China)

(Received 17 September 2023; revised manuscript received 1 December 2023)

Abstract

The tapered glass capillaries have been widely used in physics, biology, materials. The features of ions transmitted through the insulating tapered glass capillary manifest themselves mainly in the interaction between positive ions and tapered glass capillary, However, the transmission process of negative ions in tapered glass capillary has been studied scarcely so far.

In the present study, we measure the properties of 16 keV C^- ions transmitted through the tapered glass capillary, such as the two-dimensional spectral distribution, the relative transmission rate, the centroid angle, the charge state purity and the full width at half maximum of the transmitted particles. As the tapered glass capillary tilt angle is equal to 0° , the transmitted particles are composed of three components, i.e. the core, the C^- of halo and the C^0 of halo. As the tilt angle is 1° , the transmitted particles are composed of two components, i.e. C^- and C^0 . As the tilt angle is $>1^\circ$, there is no core region, the transmitted particles are composed of two components, i.e. C^- and C^0 . No matter how the tilt angle changes, the centroid angles of core are always along the direction of the incident ions, independent of the tilt angles. And the centroid angles of transmitted C^- and C^0 are always along the direction of the capillary axis. The transmission processes of 16 keV C^- ions in tapered glass capillary with different tilting angles are analyzed qualitatively. When the tilting angle is small ($0^\circ-1^\circ$), the C^- ions are directly traveling straight through the back cone hole of tapered glass capillary, which are mainly composed of C^- ions. When the tilt angle is large ($>1^\circ$), the C^- ions cannot directly travel straight through the back cone hole of the tapered glass capillary, and the core region does not appear. Due to the guiding effect of the negative charges deposited on inner wall of tapered glass capillary, the transmitted C^- ions are located around the direction of the capillary axis. The tapered glass capillary has a focusing effect on the incident ions. This experiment covers the lack of the studies of low-energy negative ions transmitted through tapered capillary and helps to strengthen the understanding of the transmission process of low-energy ions transmitted through tapered capillary.

Keywords: tapered glass capillary, transmission features, negative ions

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

DOI: 10.7498/aps.73.20231513

[†] Corresponding author. E-mail: niusht14@lzu.edu.cn



16 keV C^- 离子在锥形玻璃管中的输运过程

牛书通 詹欣 华强 李文腾 周利华 杨廷贵

Study on transport process of 16 keV C ions in tapered glass capillary: Role of capillary tilt angles

Niu Shu-Tong Zhan Xin Hua Qiang Li Wen-Teng Zhou Li-Hua Yang Ting-Gui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 053401 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231513

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231513>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率单孔柱-孔汇聚传输结构的电磁粒子仿真

Electromagnetic particle-in-cell simulation of high-power single-hole post-hole convolute

物理学报. 2019, 68(17): 178401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190535>

低能电子在玻璃管中的稳定传输

Stable transmission of low energy electrons in glass tube with outer surface grounded conductively shielding

物理学报. 2022, 71(7): 074101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212036>

30 keV H^+ 在聚碳酸酯微孔膜中动态输运过程的实验和理论研究

Experimental and theoretical research on the dynamical transmission of 30 keV H^+ ions through polycarbonate nanocapillaries

物理学报. 2018, 67(20): 203401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181062>

低能电子穿越玻璃直管时倾角依赖的输运动力学

Dynamics of low energy electrons transmitting through straight glass capillary: Tilt angle dependence

物理学报. 2022, 71(8): 084104 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212335>

30 keV He^{2+} 在不同倾斜角度的聚碳酸酯微孔膜中的传输过程

Transmission of 30-keV He^{2+} ions through polycarbonate nanocapillaries: Dependence on the incident angle

物理学报. 2018, 67(17): 176102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172484>

低能Cl在 Al_2O_3 绝缘微孔膜中的输运过程

Transmission of low-energy Cl ions through Al_2O_3 insulating nanocapillaries

物理学报. 2020, 69(9): 094101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190933>