



·核科学与工程·

# 低能电子穿越绝缘体微孔膜动力学过程研究\*

周 鹏<sup>1</sup>, 万城亮<sup>1</sup>, 袁 华<sup>1</sup>, 程紫东<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>1</sup>, 张浩文<sup>1</sup>,  
崔 莹<sup>1,2</sup>, 张红强<sup>1,2</sup>, 陈熙萌<sup>1</sup>

(1. 兰州大学 核科学与技术学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学 稀有同位素前沿科学中心, 兰州 730000)

**摘 要:** 采用二维位置灵敏的微通道板探测器对能量为 1500 eV 的低能电子束穿过孔径为 400 nm、未经照射过的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)微孔膜后的全角分布以及时间演化进行了测量,同时采用自制的积分式能谱测量装置测量了穿透电子的能量分布。实验结果表明:在充电阶段,当入射电子束束流较弱时,透射电子强度随充电时间逐渐上升;充电过程中,透射电子的角分布宽度由小变大,但是角分布中心基本不随膜的倾角移动。对出射电子达到平衡态时的电子能谱的测量表明,穿透电子的能量保持着入射时的能量。对于理解电子在绝缘体微孔中的传输给出了新的实验证据,给出了可能形成“导向效应”的微孔内部电场的条件。

**关键词:** 低能电子;导向效应;沉积电荷;微纳结构;二维位置灵敏探测器

中图分类号: O462

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220120

## Dynamic process of low energy electrons through insulating nanocapillaries

Zhou Peng<sup>1</sup>, Wan Chengliang<sup>1</sup>, Yuan Hua<sup>1</sup>, Cheng Zidong<sup>1</sup>, Li Pengfei<sup>1</sup>, Zhang Haowen<sup>1</sup>,  
Cui Ying<sup>1,2</sup>, Zhang Hongqiang<sup>1,2</sup>, Chen Ximeng<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Center for Advanced Science of Rare Isotopes, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In the study of the transportation of low energy electrons through insulating capillaries, the experimental results are very different and depending on many conditions. This leads to some controversies on whether the mechanisms of the electron guiding exists or not. This work studies the electron beam with an energy of 1500 eV transmitting through the insulating PET capillaries of 400 nm in diameter. The capillaries have never been irradiated by any beams before. The two-dimensional angular distributions of transmitted electrons and their evolution are measured by a Mirco-channel Plate (MCP) detector with the phosphor screen. The energy distribution of the transmitted electrons is also measured by a mesh system before the MCP detector where the stepping voltages are put on and the transmitted electrons are recorded by the MCP detector accordingly. The experimental results show that the intensity of transmitted electrons increases with the charging time when the capillaries starts to be exposed to the electron beam, and a typical charging-up is observed. During the charging process, the angular distribution width of transmitted electrons increases from small to large, but the center of the angular distribution remains the same. The energy spectrum of the transmitted electrons when they reach the stationary state shows that the most transmitted electrons keep their initial energy. This work provides new experimental evidence for understanding electron transport in insulator micropores, and gives the conditions for the formation of guiding electric field in micropores that may form guiding effect.

**Key words:** low energy electrons, orientation effect, deposition charge, micro-nano structure, 2D position sensitive detector

近年来,带电粒子与固体形成的微纳结构的相互作用成为带电粒子与物质相互作用领域研究人员广泛关注的热点,其中离子与绝缘体微孔相互作用中的所谓“导向效应”是其中一个研究热点<sup>[1-2]</sup>。这个效应起源于 Stolterfoht

\* 收稿日期:2022-04-24; 修订日期:2022-09-29  
基金项目:国家自然科学基金项目(U1732269)  
联系方式:周 鹏, zhoupeng@higt.com。  
通信作者:崔 莹, cuying@lzu.edu.cn。

等人观测  $\text{Ne}^{7+}$  离子穿过 PET 微孔膜后离子的角分布和能量损失以及电荷交换过程。他们发现, 当入射离子的入射方向与微孔中心轴方向之间的夹角大于微孔的几何张角时, 离子仍可沿微孔中心轴方向射出, 且几乎所有出射离子的能量和电荷态与入射离子相比未发生明显改变, 这个效应被称为“导向效应”。

带电粒子通过“导向效应”在绝缘毛细管中的传输可以将束流的横截面控制在 nm 级别上, 这为离子束光学方法提供了新的思路和方法, 同时这个研究为采用带电粒子束作为对绝缘毛细管和纳米尺度上的绝缘微孔的结构和电学性质的研究工作提供了一种可行方法<sup>[3]</sup>。

低能高电荷态离子在各种材料, 各种类型的绝缘微纳结构中的“导向效应”的研究已广泛展开<sup>[4-18]</sup>, 正离子的“导向效应”机制研究已经较为完整<sup>[1-2]</sup>, 人们发现离子在微孔内的镜像电荷力对离子的散焦作用, 结合不同几何截面的微孔对离子束起到了整形的作用<sup>[19-20]</sup>。正离子的“导向效应”发生的能区在 keV 左右, 而更高的能量下, 离子不能完全被电荷斑的库伦场偏转而与管壁碰撞, 散射过程所占份额逐渐明显<sup>[21]</sup>。

电子的实验测量由于其质量小而对电磁场非常敏感, 穿透电子的弹性散射部分与非弹性散射部分通常混合在一起等因素影响, 导致了对电子的运输机制研究的困难。负离子的实验观测和理论模拟却相对比较容易, 实验和理论研究, 10 keV 以上负离子穿越  $\text{Al}_2\text{O}_3$  微孔膜的运输机制, 发现出射的负离子主要经历了散射和电荷交换过程, 沉积电荷起到了十分微小的作用<sup>[12]</sup>。

在低能电子穿过 PET 微孔膜的实验<sup>[13]</sup>中, 观测到穿透电子穿透率随倾角增加呈指数下降并且出现了能量损失, 电子的穿透强度随时间演化快速上升达到平衡; 在低能电子穿过  $\text{Al}_2\text{O}_3$  微孔膜的实验中<sup>[16]</sup>, 发现电子的穿透强度随时间演化减小, 穿透电子没有明显能量损失。2009 年, Schiessl 等<sup>[22]</sup>通过模拟计算 500 eV 电子穿过 PET 微孔膜的电子角分布和能量分布, 认为穿透电子主要发生镜面散射和多次小角度散射过程, 一些研究者认为这是由于电子特殊的沉积深度以及对应的电场强度变化导致的<sup>[23-25]</sup>。在电子穿越单玻璃管的研究中, 情况更加复杂, 穿透电子发生不稳定的振荡<sup>[17, 26]</sup>, 甚至出现了多个穿透电子斑的情况<sup>[27-28]</sup>。对于电子穿越绝缘微孔的研究, 电荷的沉积模式仍有争议, 其中的物理机制仍需要大量的实验和计算工作来理解。

在本文工作实验条件下, 发现穿透电子的角分布和能量分布特征与几何穿透类似, 不符合正离子“导向效应”的角分布特征, 穿透电子的角分布的时间演化谱测量显示出透射电子穿透率随时间快速上升达到平衡, 与之前的低能电子穿越 PET 膜测量结果一致, 即穿透电子强度随时间增加有充电现象, 但是角分布的中心基本保持相同位置, 不像正离子充电那样移动。本文分析其中的原因, 给这个领域的研究提出了新的图景。

## 1 实验设置

该实验在兰州大学多功能加速器实验平台上进行, 图 1 为本次实验所用的低能电子实验装置示意图, 整个平

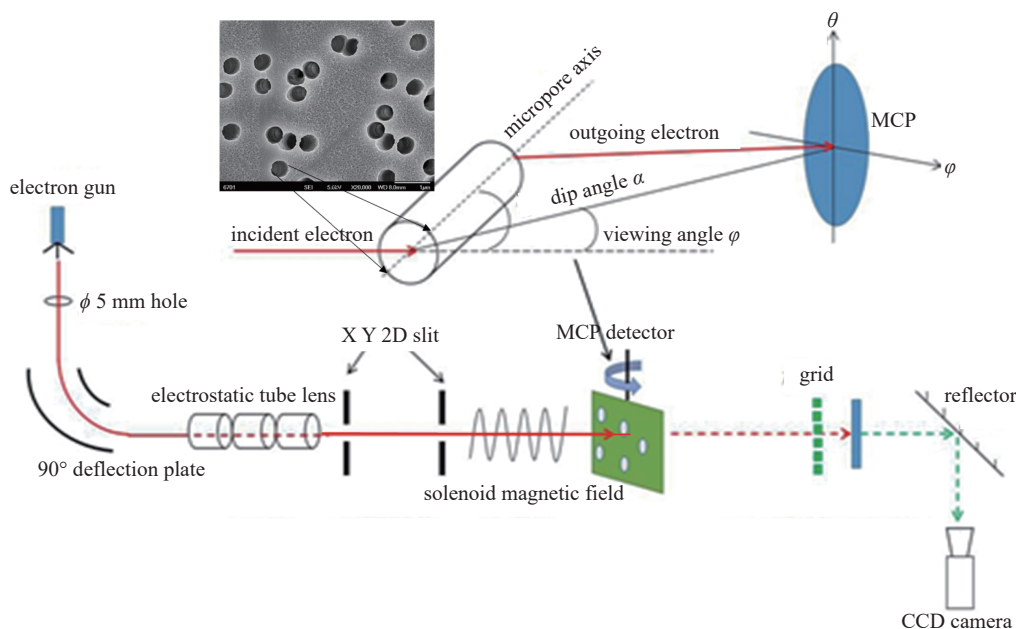


Fig. 1 Device diagram of experimental platform

图 1 实验平台的基本装置示意图

台装置为了减少地磁场对电子传输与探测过程中的影响,采用螺线管产生的反向磁场与地磁场抵消从而对地磁场进行屏蔽。热阴极电子枪产生能量为 1500 eV 的低能电子,通过 90°弧形偏转板后,电子束被静电管透镜聚焦,经过两个相距 220 mm 的四级狭缝准直后,被螺线管磁场再次聚焦准直,最终形成束斑尺寸为 1.5 mm×1.5 mm、发散度小于 0.3°的电子束。探测电子的探测器是一套二维灵敏的 MCP 探测器,采用 P43 荧光屏进行入射电子打在 MCP 上形成雪崩电子的位置成像,荧光屏上发出的荧光经过 45°全反镜后透过石英玻璃窗被 CCD 相机记录并成像。实验中,通过调节电子枪的灯丝加热电流来得到所需要的束流强度。本次实验束流强度为 8 fA,初始电子束穿过两层铜网(几何穿透率分别为 18% 以及 1%)后,由 MCP 探测器测量其计数和角分布。实验中使用的 PET 微孔膜微孔直径为 400 nm,孔密度为 1  $\mu\text{m}^{-2}$ ,厚度 10  $\mu\text{m}$ ,计算得到其几何穿透率为 12.5%,几何张角为 2.3°。PET 微孔膜被安装在一个五维调角器上,使其可以在前后、左右、上下三个方向上独立移动,并在水平和垂直两个平面内独立转动。将 PET 微孔膜上微孔中心轴与入射束流在水平面内的夹角定义为微孔膜的倾角  $\alpha$ ,将探测器与出射束流方向垂直方向上夹角为  $\theta$ ,在水平方向上的夹角为  $\varphi$ ,探测系统可在以靶室中心为中心轴的水平面内转动(如图 1 所示)。

图 2 为本次实验所采用的积分式的能量测量系统结构,由 3 层栅网、MCP 和荧光屏组成,前后两层栅网接地,中间一层加高压。单层栅网的穿透率为 88% 左右,整个测量系统的穿透率为 69% 左右。其工作原理是:改变加在中间栅网上电压,能量低于该电压的入射电子将不能穿越栅网,因此每个电压下,MCP 探测器上测量的是所有高于这个电压对应的能量的电子,最终形成穿透电子的积分式的能谱。该系统中间栅网电压以及 MCP 上穿透电子的计数由本实验组研发的 Labview 程序控制。Labview 程序控制每一个时间步长下一个特定模拟电压输出,经过电压放大器放大后,施加在中间栅网上,穿过栅网的电子被后续的 MCP 探测器探测,通过后续电子学系统的前放、时间滤波放大、恒分甄别器产生一个计数脉冲,被 Labview 计数卡同步记录,形成积分能量谱。

## 2 实验结果与讨论

本文首先对透射电子角度分布以及强度和微孔倾角之间的关系进行了研究,透射电子强度随倾角的变化如图 3 所示,孔径为 400 nm PET 微孔膜的几何穿透情况下容许的穿透角度为 2.32°,图中倾角  $\alpha$  指 PET 微孔膜上微孔中心轴与入射束流在水平面内的夹角。从图 3 中可以看出,当膜的倾角为 0°时,透射电子的强度最大,透射电子的强度随倾角的增大而减小。当膜的倾角大于几何穿透情况下容许的最大穿透角度(2.32°)时,透射电子强度下降了接近一个数量级。整个穿透角分布和强度特征与几何穿透特征相似,没有发现类似于离子的“导向效应”导致的穿透分布特征。

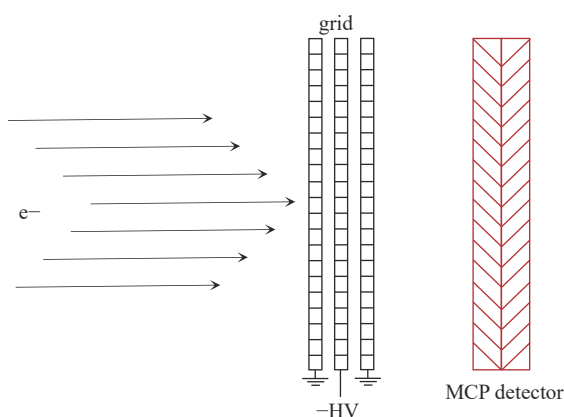


Fig. 2 Structure diagram of integral energy measurement system

图 2 积分式的能量测量系统结构示意图

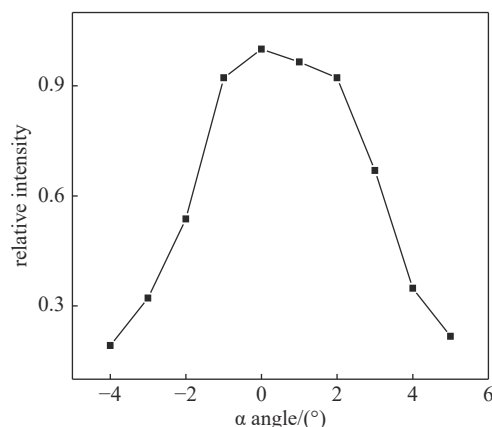


Fig. 3 Transmitted electron intensity varies with inclination angle  $\alpha$

图 3 透射电子强度随倾角变化

在连续测量时,每一个测量角度的结果会受上一个角度充电导致的已有沉积电荷的影响,沉积电荷不会短期放电消失,这种效应称之为“记忆效应”<sup>[26]</sup>。因此在倾角连续-4°开始到+4°依次以步长为 1°进行连续测量时,“记忆效应”会导致其穿透率在对称角度下出现一定的穿透率的差异。

图 4 为能量为 1500 eV 低能电子穿过孔径为 400 nm 的 PET 微孔膜后,在入射电子束不同倾角下稳定的透射电子二维角分布,其中  $\varphi$  和  $\theta$  分别表示水平方向与竖直方向的散射角度。图 4(a)~(g)为电子束以不同倾角入射时,

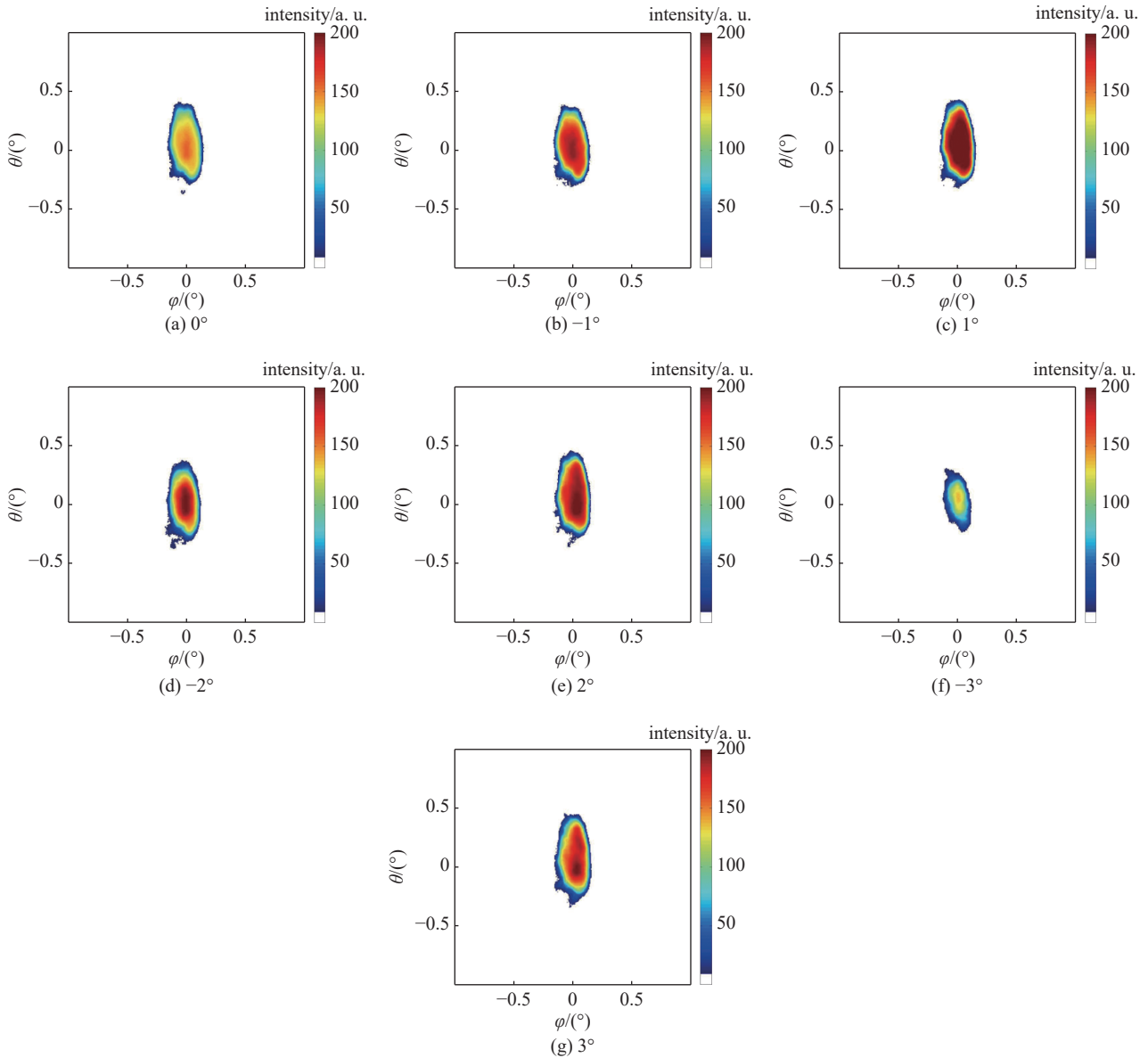


Fig. 4 2D angular distribution of outgoing electrons in equilibrium at different inclination angles

图4 不同倾角下出射电子平衡态下二维角分布图

出射电子在MCP探测器上的二维角分布。从图中可以看到,随着倾角的移动,透射电子二维角分布中心保持在零度附近,角分布在几何张角(2.3°)外变窄。

为进一步研究在电子在穿越绝缘体微孔的可能充电过程,选取膜倾角为1°时,测量了透射电子二维角分布随时间演化过程,如图5(f)所示,电子束穿过无任何辐照的微孔膜后,透射电子强度随时间逐渐增加,最终趋于平稳,有明显的充电现象,充电时间为200 s左右。图5(a)~(e)为充电过程中透射电子的二维角分布随时间的演化图,各个数据采样时间点分别标于图中,从图5(a)~(e)中可以看到,透射电子束斑最开始出现的范围及强度都很弱,呈点状分布;随着充电时间的增加,角分布宽度逐渐增大,最终逐渐趋于稳定,而角分布中心基本保持不变。出射电子的二维角分布变化过程显示出了可能的负电场的形成过程,与正离子的情况有所不同,未出现角分布中心的随倾角变化的明显移动,反应出电子的负电场没有足够强的偏转能力。

为了研究透射电子的能量组分,在倾角为1°的条件下,测量了透射电子的能量积分谱,从图6可以看出,透射电子的能量相较于入射电子的初始能量基本没有发生改变,平衡态下电子在穿越PET微孔膜后保持着入射时的能量。

部分文献研究成果<sup>[6]</sup>显示,在倾角为1°时,入射电子束通过微孔内壁的散射过程,其散射电子能量将发生变化,且由于散射过程,将会有有一个散射角分布,而在我们探测器观测范围内,测量到的透射电子能量基本没有发生

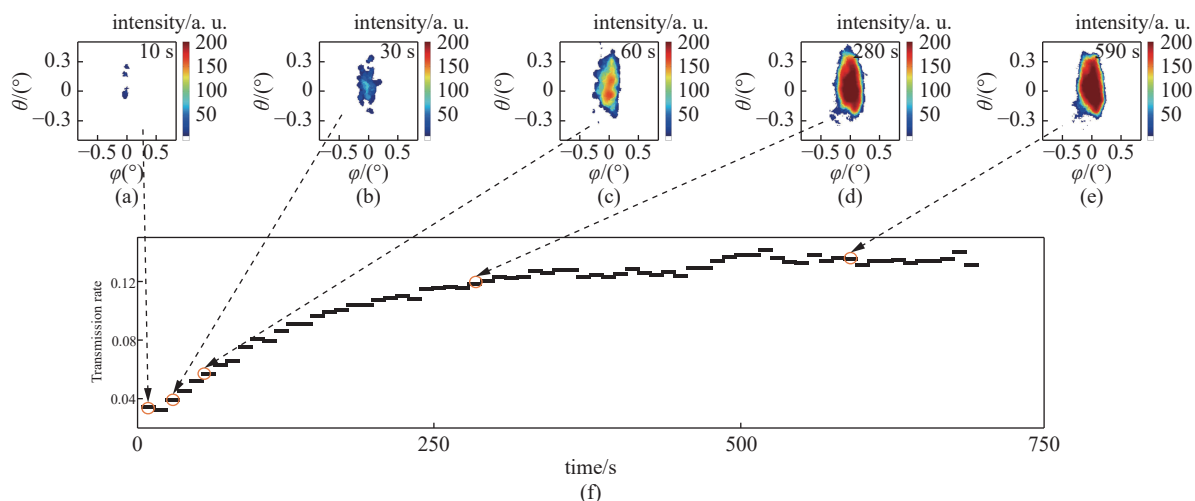


Fig. 5 Transmission electron transmittance (f) and evolution of 2D angular distribution with time

图 5 完全放电状态下的微孔膜倾角为 1° 时透射电子穿透率及二维角分布随时间演化

变化,因此在,出射电子中的散射电子的比例在探测器的观测角度范围内可以被忽略。

与正离子的导向作用不同,电子通过绝缘纳米毛细管的传输过程涉及更复杂的过程,目前对于 nm 微孔内部的实际电荷沉积无法直接测量。本文使用 CASINO 软件对电子束入射微孔内表面而在其附近形成的电荷沉积状态进行了模拟,并根据模拟的结果推测了整个微孔内部的电荷沉积模式。由于对不同绝缘材料和不同直径毛细管(从几百 nm 的 nm 毛细管到内径接近 1 mm 的玻璃管)的透射电子强度时间演化的研究显示了不同的电荷沉积效应。电子撞击毛细管内壁会产生大量二次电子,这使得充电过程非常复杂。为深入了解这一点,本文进行了简单的模拟计算:首先通过考虑散射电子、二次电子和入射电子,使用蒙特卡罗模拟程序软件“CASINO”<sup>[29-31]</sup>计算电子与 PET 平面小面积碰撞的简单情况下的沉积电荷分布;再依据 CASINO 模拟出的单个碰撞点电荷沉积分布情况,将入射束流与微孔内壁相互作用过程中沿微孔轴向方向分布情况进行预测,得出不同入射情况下的受沉积电荷影响的电子束运动轨迹与出射电子的出射角度。

CASINO 在模拟中可以通过蒙特卡罗方法对电子进行详细的径迹计算,其电子与样品之间作用的物理过程通过随机数取值与几率分布的方式实现。模拟过程可以追踪每一个电子在相互作用中放出的二次电子及后续的二次电子的相互作用过程中位置和动量变化,也可以追踪入射电子的相互作用中的位置和动量的变化。这样可以提取复杂相互作用过程中几乎全部信息:二次电子发射特征,入射电子沉积特征,空穴产生的位置和分布。电子径迹追踪过程结束的判据是在电子从样品中出射或者被样品俘获(电子的能量小于某个阈值)。当对二次电子进行模拟时,将样品的功函数作为阈值。电子传输中每一步的能量损失包含等离子体激元的激发、价带内外跃迁和内核激发。当入射电子能量较低时,可以通过改进的 Bethe 公式,即式(1)对电子在样品中的能量损失进行很好的描述<sup>[32]</sup>。软件中增加了一个剩余能量损失项作为可调参数加入改进的 Bethe 公式中(1),可以对电子能量低于样品功函数情况下能量损失率进行补偿<sup>[33]</sup>。

$$\frac{dE}{ds} = -7850 \frac{\rho Z}{AE} \ln \left[ \frac{1.66(E+kJ)}{J} \right] \quad (\text{eV/nm}) \quad (1)$$

式中:  $E$  是入射电子能量(eV),  $s$  是沿轨迹的路径长度(nm),  $\rho$  是密度( $\text{g/cm}^3$ ),  $Z$  是原子序数,  $A$  是靶的原子量,  $J$  为平均电离度材料电势(eV),  $k$  是一个变量,其值取决于所测试的材料。

在模拟计算中使用的 PET 样本的三维(3D)模型参数为:长度和宽度均为 200 nm,高度为 60 nm。电子束能量

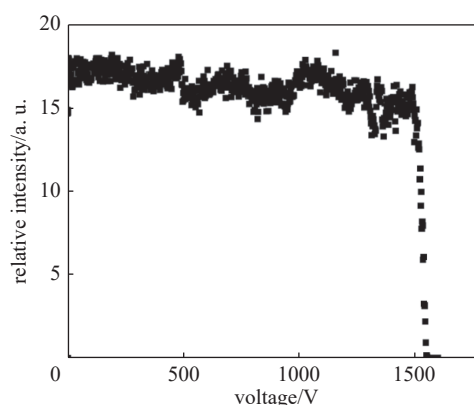


Fig. 6 Transmission electron energy integral spectrum

图 6 透射电子能量积分谱

设置为 1500 eV, 束径为 50 nm, 入射角为 1°, 模型图如图 7(a)所示:  $x$  方向为电子入射方向,  $z$  方向为深度方向, 以上表面顶点为原点, 深度以负值表示。PET 的内部电荷沉积由入射电子组成, 如图 7(b)所示; PET 表面存在的由二次电子发射引起的空穴, 如图 7(d)所示。入射电子沉积位置分布在 PET 表面以下 60 nm 范围内, 其强度随深度分布图如图 7(c)所示, 电子主要分布在深度为 20 nm 处左右, 在一定范围内扩散分布; PET 微孔内部表面存在的大量空穴由二次电子发射引起, 空穴相对强度随深度分布如图 7(e)所示, 空穴分布深度在 0.2 nm 范围内, 主要集中在 PET 膜孔壁表面。

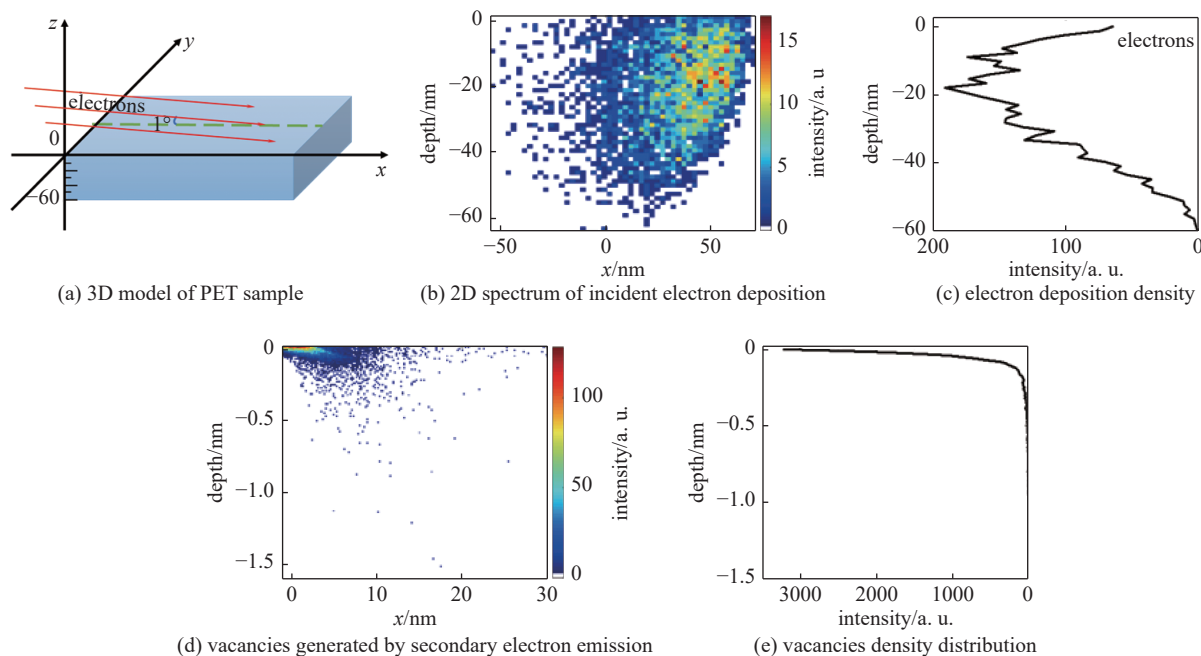


Fig. 7 The 3D model of PET sample used in CASINO and simulation of internal deposition of PET

图 7 在 CASINO 中使用的 PET 样本的三维(3D)模型及 PET 膜内部沉积模拟

电子在入射过程中, 与微孔内壁相互作用, 导致入射电子会沉积在微孔内壁较深的位置, 形成在表面以下的负电荷沉积, 随着入射电子不断入射, 其表面下的负电荷累积剂量不断增加; 同时, 入射的电子与微孔内壁相互作用过程中, 也会在表面上发生二次电子发射而产生空穴, 最终形成表面的空穴与表面以下的负电荷共同叠加的电荷斑。电子碰撞区域表面形成正电荷, 内部形成负电荷, 这种叠加形成的电荷斑在微孔内壁的径向方向上呈对称分布, 在电子入射方向上沿微孔内壁延伸, 使得入射电子感受到的电场将是这两部分电荷叠加的效果, 由于电子形成的负电荷和空穴形成的正电荷会扩散并在固体内出现电荷中和过程, 整体上微孔内的电荷沉积会出现三种可能性: 电负性, 电中性和电正性。出现哪种可能是依赖于材料的特性的, 例如孔洞内部表面的粗糙度, 原子组分和化学状态导致的电学性质改变, 温度导致的电学性质改变, 以及入射电子的能量等<sup>[10,21-22]</sup>。当在总体呈现负电性, 而沉积的负电荷无法产生足够的电场使入射电子产生偏转时就不会产生后续出射电子角分布的移动, 该区域形成的负电场能够使得入射电子不进入表面而被弹出微孔, 这种微弱的负电场只足够增加出射电子的几率而不能像离子那样产生足够的与镜面反射相似的偏转电场使得电子发生导向。

本文对不同入射情况下的电子的轨迹进行了分析, 图 8 为微孔内部沉积电荷影响下出射电子的可能路径。其中探测器的 0°角定义为入射束对应的方向, 探测器的 1°角定义为微孔轴向对应方向。图中使用序号标注了电子束入射过程中, 离散度在 0.3°范围内, 电子穿过微孔过程中的可能情况: ①为入射电子与微孔轴向夹角为 1°, 在微孔的内部未经碰撞直接通过, 到达探测器 0°位置; ②为入射电子与微孔轴向夹角大于 1°, 由于入射角度与微孔轴向夹角加大, 使得入射电

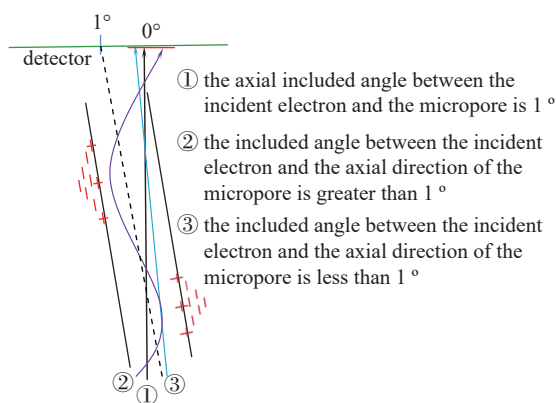


Fig. 8 Electron emission path diagram of internal deposition of PET

图 8 PET 膜内部沉积电子出射路径图

子受到沉积电荷影响,增加了电子出射概率,使探测器 $0^\circ$ 位置接收到的电子数有所增加;③为入射电子与微孔轴向夹角小于 $1^\circ$ ,入射电子束与微孔轴向夹角偏小,可直接穿过微孔到达探测器 $0^\circ$ 方向偏正角度的方向(具体值由束流角发散以及孔的张角决定)。图3~图6所展示的实验结果显示:电子通过微孔的传输极大的受几何条件的限制,在毛细管几何开口角之外,电子主要通过散射过程出射,这与我们目前的实验观察结果一致。

### 3 结 论

本文通过对1500 eV的低能电子穿过孔径为400 nm的PET微孔膜后透射电子的二维角分布以,以及强度随时间、倾角的演化关系的测量,对电子在PET微孔膜中的输运过程进行了研究。结果发现:整个穿透角分布和强度特征与几何穿透特征相似,未发现同正离子类似的“导向效应”导致的穿透分布特征;透射电子二维角分布中心保持在零度附近,穿透电子强度在接近几何张角时迅速降低趋于消失;透射电子的能量相较于入射电子的初始能量基本没有发生改变;透射电子强度随时间增加,有明显的充电现象;透射电子角分布宽度随充电过程逐渐增大,透射角分布中心基本保持不变,这与正离子实验结果有所不同;电子透射过程中,微孔内部可能也具有微弱负电场的形成,但不能产生足够强的负电场以支撑电子“导向效应”的发生。

#### 参考文献:

- [1] Lemell C, Burgdörfer J, Aumayr F. Interaction of charged particles with insulating capillary targets—The guiding effect[J]. *Progress in Surface Science*, 2013, 88(3): 237-278.
- [2] Stolterfoht N, Yamazaki Y. Guiding of charged particles through capillaries in insulating materials[J]. *Physics Reports*, 2016, 629: 1-107.
- [3] Martin C R. Nanomaterials: a membrane-based synthetic approach[J]. *Science*, 1994, 266(5193): 1961-1966.
- [4] Stolterfoht N, Hellhammer R, Bundesmann J, et al. Scaling laws for guiding of highly charged ions through nanocapillaries in an insulating polymer[J]. *Physical Review A*, 2008, 77: 032905.
- [5] Stolterfoht N, Hellhammer R, Bundesmann J, et al. Density effects on the guided transmission of 3 keV  $\text{Ne}^{7+}$  ions through PET nanocapillaries[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2009, 267(2): 226-230.
- [6] Vokhmyanina K A, Kubankin A S, Myshelovka L V, et al. Transport of accelerated electrons through dielectric nanochannels in PET films[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 15: C04003.
- [7] Sahana M B, Skog P, Vikor G, et al. Guiding of highly charged ions by highly ordered  $\text{SiO}_2$  nanocapillaries[J]. *Physical Review A*, 2006, 73: 040901(R).
- [8] Zhang H Q, Skog P, Schuch R. Dynamics of guiding highly charged ions through  $\text{SiO}_2$  nanocapillaries[J]. *Physical Review A*, 2010, 82: 052901.
- [9] Stolterfoht N, Hellhammer R, Juhász Z, et al. Guided transmission of  $\text{Ne}^{7+}$  ions through nanocapillaries in insulating polymers: scaling laws for projectile energies up to 50 keV[J]. *Physical Review A*, 2009, 79: 042902.
- [10] 哈帅, 张文铭, 谢一鸣, 等. 低能 $\text{Cl}^-$ 在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 绝缘微孔膜中的输运过程[J]. *物理学报*, 2020, 69: 094101. (Ha Shuai, Zhang Wenming, Xie Yiming, et al. Transmission of low-energy  $\text{Cl}^-$  ions through  $\text{Al}_2\text{O}_3$  insulating nanocapillaries[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69: 094101)
- [11] Skog P, Soroka I L, Johansson A, et al. Guiding of highly charged ions through  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano-capillaries[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 258(1): 145-149.
- [12] Zhang Qi, Liu Zhonglin, Li Pengfei, et al. Transmission of low-energy negative ions through insulating nanocapillaries[J]. *Physical Review A*, 2018, 97: 042704.
- [13] Das S, Dassanayake B S, Winkworth M, et al. Inelastic guiding of electrons in polymer nanocapillaries[J]. *Physical Review A*, 2007, 76: 042716.
- [14] 李鹏飞, 袁华, 程紫东, 等. 低能电子在玻璃管中的稳定传输[J]. *物理学报*, 2022, 71: 074101. (Li Pengfei, Yuan Hua, Cheng Zidong, et al. Stable transmission of low energy electrons in glass tube with outer surface grounded conductively shielding[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71: 074101)
- [15] 李鹏飞, 袁华, 程紫东, 等. 低能电子穿越玻璃直管时倾角依赖的输运动力学[J]. *物理学报*, 2022, 71: 084104. (Li Pengfei, Yuan Hua, Cheng Zidong, et al. Dynamics of low energy electrons transmitting through straight glass capillary: tilt angle dependence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71: 084104)
- [16] Milosavljević A R, Vikor G, Pešić Z D, et al. Guiding of low-energy electrons by highly ordered  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanocapillaries[J]. *Physical Review A*, 2007, 75: 030901(R).
- [17] Dassanayake B S, Das S, Bereczky R J, et al. Energy dependence of electron transmission through a single glass macrocapillary[J]. *Physical Review A*, 2010, 81: 020701(R).
- [18] Wickramarachchi S J, Dassanayake B S, Keerthisinghe D, et al. Electron transmission through a microsize tapered glass capillary[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2011, 269(11): 1248-1252.
- [19] Zhang Hongqiang, Akram N, Soroka I L, et al. Transmission of highly charged ions through mica nanocapillaries of rhombic cross section[J]. *Physical Review A*, 2012, 86: 022901(R).
- [20] Zhang H Q, Akram N, Skog P, et al. Tailoring of keV-ion beams by image charge when transmitting through rhombic and rectangular shaped nanocapillaries[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108: 193202.
- [21] Zhang Hongqiang, Akram N, Schuch R. Guiding and scattering of ions in transmission through mica nanocapillaries[J]. *Physical Review A*, 2016, 94: 032704.

- [22] Schiessl K, Tókési K, Solleder B, et al. Electron guiding through insulating nanocapillaries[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 163201.
- [23] Dassanayake B S, Keerthisinghe D, Wickramarachchi S, et al. Temporal evolution of electron transmission through insulating PET nanocapillaries[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2013, 298: 1-4.
- [24] Keerthisinghe D, Dassanayake B S, Wickramarachchi S J, et al. Charge deposition dependence and energy loss of electrons transmitted through insulating PET nanocapillaries[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2013, 317: 105-108.
- [25] Keerthisinghe D, Dassanayake B S, Wickramarachchi S J, et al. Elastic and inelastic transmission of electrons through insulating polyethylene terephthalate nanocapillaries[J]. *Physical Review A*, 2015, 92: 012703.
- [26] Dassanayake B S, Bereczky R J, Das S, et al. Time evolution of electron transmission through a single glass macrocapillary: charge build-up, sudden discharge, and recovery[J]. *Physical Review A*, 2011, 83: 012707.
- [27] Wickramarachchi S J, Ikeda T, Dassanayake B S, et al. Electron-beam transmission through a micrometer-sized tapered-glass capillary: dependence on incident energy and angular tilt angle[J]. *Physical Review A*, 2016, 94: 022701.
- [28] Wickramarachchi S J, Ikeda T, Dassanayake B S, et al. Incident energy and charge deposition dependences of electron transmission through a microsized tapered glass capillary[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2016, 382: 60-66.
- [29] Hovington P, Drouin D, Gauvin R, et al. CASINO: a new Monte Carlo code in C language for electron beam interactions—part III: stopping power at low energies[J]. *Scanning*, 1997, 19(1): 29-35.
- [30] Drouin D, Couture A R, Joly D, et al. CASINO V2.42—A fast and easy-to-use modeling tool for scanning electron microscopy and microanalysis users[J]. *Scanning*, 2007, 29(3): 92-101.
- [31] Demers H, Poirrier-Demers N, Couture A R, et al. Three-dimensional electron microscopy simulation with the CASINO Monte Carlo software[J]. *Scanning*, 2011, 33(3): 135-146.
- [32] Joy D C, Luo S. An empirical stopping power relationship for low-energy electrons[J]. *Scanning*, 1989, 11(4): 176-180.
- [33] Lowney J R. Monte Carlo simulation of scanning electron microscope signals for lithographic metrology[J]. *Scanning*, 1996, 18(4): 301-306.