

文章编号: 1007-4627(2012)02-0184-05

强流电子束入射弯曲宏观石英管的导向效应研究

张明武^{1,2}, 王伟^{1,2,3}, 薛迎利¹, 于得洋¹, 陈婧^{1,2}, 武晔虹^{1,2}, 杨变^{1,2}, 蔡晓红¹

(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;

3. 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 研究了强流(~ 129 nA)、高能(1 500~1 900 eV)电子束在大角度(9°)弯曲宏观石英管中的导向效应。实验分别测量了入射流强及能量对出射电子角分布值(FWHM)和传输效率的影响。实验观察到出射电子角分布 FWHM 随着入射电子流强和入射电子能量增加变化均不明显;发现电子传输效率随入射流强增加而增加,但随入射能量增加而减小,这与高电荷态离子导向中离子传输效率随入射能量增加而增加的现象相反。分析发现,与高电荷态离子导向机制不同,电子束导向并非是由电子在石英管内壁的自组织充电过程引起的,而是入射电子与管内壁弹性和非弹性散射碰撞共同作用的结果。

关键词: 电子束; 弯曲石英管; 角分布; 传输效率

中图分类号: O562.5; O485 **文献标志码:** A

1 引言

2002 年, Stolterfoht 等^[1]发现,用 3 keV Ne^{7+} 离子束入射孔径比为 1:100(孔直径 100 nm, 长度 10 μm)的绝缘 PET 材料毛细管,绝大部分出射离子保留了入射时的电荷态和能量,即使在入射离子与 PET 膜夹角为 20° 时,仍发现出射离子主要成分的电荷态和能量与入射离子一致。这与离子掠入射金属表面或者通过的金属毛细管的现象不同^[2],由此激发了人们对离子通过不同材料绝缘毛细管导向效应的研究^[3-4]。

研究发现,离子在毛细管中导向效应是由毛细管内壁表面自组织充电引起的^[1,5]。在微观尺寸纳米毛细管(孔径 <100 nm)中,高电荷态离子导向理论模拟^[6-7]揭示,毛细管内壁表面瞬时电荷沉积形成了分布不均匀的单个或多个电荷堆积包,特别是靠近毛细管入口区域形成的电荷沉积包,对导向有至关重要的作用。Skog 等^[8]认为,与毛细管内壁自组织充电效应相比,导向过程中伴随的电荷转移和非弹性效应引起的贡献非常小,出射离子保持了最初电荷态和能量,形成导向现象。

在电子束通过 Al_2O_3 ^[9] 和 PET^[10] 纳米毛细管的实验中,发现同样存在导向效应。对于 PET 纳米毛细管,入射电子能量较高(500 和 1 000 eV),实验发现出射电子束有能损。这种现象在低能电子(250~350 eV)通过 Al_2O_3 纳米毛细管的实验中并没有观测到。PET 中电子束导向显示^[10],导向中的能量损失,是电子与毛细管内壁非弹性散射过程引起的。例如,电子对表面的激发电离、二次电子发射和电子引起的晶格热运动等。Schiessl 等^[11]利用平均场经典传输理论^[12-13],引入电子与毛细管内壁表面平均吸引势作用的量子反射过程,以及入射电子进入和穿过毛细管内壁发生的多次小角度弹性和非弹性散射过程,模拟了上述两个实验过程,计算结果和实验值吻合得较好。研究认为,与高电荷态离子导向机制不同,毛细管内壁的自组织充电效应在电子导向中作用甚微。

在电子束与单根宏观尺寸(>10 μm)玻璃管的相互作用中^[14-15],也观察到导向现象。例如,漆德君等^[14]利用强流和高能(1 100, 1 300 和 1 500 eV)

收稿日期: 2011-09-22; 修改日期: 2011-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10775160); 国家重点基础研究发展计划项目资助(973 计划)(2010CB832900)

作者简介: 张明武(1984—), 男, 甘肃天水人, 博士研究生, 从事原子物理研究; E-mail: zhangmingwu@impcas.ac.cn

通讯联系人: 蔡晓红, E-mail: caixh@impcas.ac.cn

的入射电子束，采用长度和内径分别为 30 和 2.3 mm 玻璃管，对电子在宏观尺寸毛细管中的导向效应进行了探索。由于其入射流强无法确定，实验中没有测量导向传输效率随入射能量和流强的变化关系。Dassanayake 等^[15]采用两个内径分别为 0.18 和 0.23 mm，对应长度为 14.4 和 16.8 mm 的直玻璃管，分别使用入射电子能量 300, 500, 800 和 1 000 eV，对导向效应的影响进行了研究。在 Dassanayake 等^[15]的实验中，没有考虑电子束入射流强的影响。同时 Dassanayake 等^[15]用卢瑟福散射模型，对实验结果进行的尝试性解释，在 800 和 1 000 eV 时，与实验结果相差非常大。

本实验采用强流 (~120 nA；文献[9]中为 14 nA；文献[10]中 0.3~0.8 nA)，高能 (1 500~1 900 eV) 电子束入射大角度弯曲 (9°) 宏观尺寸石英管，对电子导向效应进行了研究，并且测量了入射流强和能量对角分布及电子传输效率的影响。通

过与现有工作比较，对实验结果进行了分析。

2 实验装置

本实验布局如图 1 所示。图中，电子束经过两级光栏(间距 10 mm)准直，进入长 30 mm、内径 2.2 mm、弯曲度约 9° 的石英管中，出射信号由距出口 50 mm 远的 64 通道位置灵敏法拉第筒^[16]测量。所有装置都固定在不锈钢定位板上，整体置于高真空靶室内，靶室真空好于 1.0×10^{-5} Pa。由 LaB₆ 电子枪产生电子束经过两级光栏准直，光栏孔径分别为 1 和 0.5 mm，光栏相距 10 mm，各光栏都接有灵敏电流表。石英管外用铝箔包裹，以防止其外表面充电。石英管出口处放置偏转板(本实验中偏转板未加偏压)，偏转板后为一维位置灵敏探测器，毛细管出口距探测器距离为 50 mm，管口对准探测器中心位置；探测器信号引出真空后由采集卡采集并由数据获取软件读出^[16]。

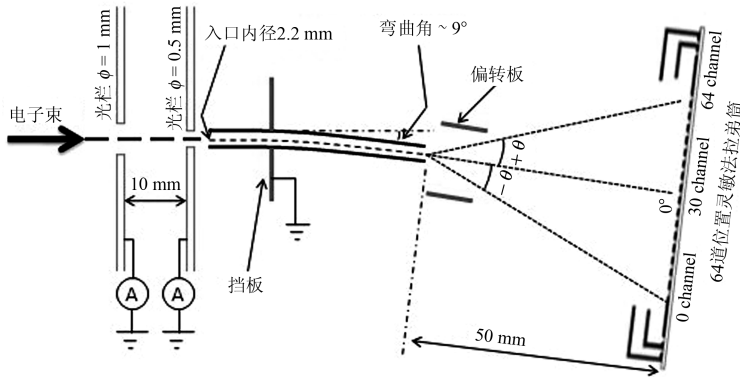


图 1 实验装置示意图

实验采用的管材料为 SiO₂，长 30 mm，外径 4.5 mm，内径 2.2 mm，弯曲角度约为 9°，绝缘管直径与长度比为 1/15，对应角度 4°。

3 实验结果与讨论

实验分别测量了入射流强和能量对出射电子角分布和传输效率的影响。如图 2 所示，相同入射能量下，随着入射流强增加，归一化的电子传输效率随之增加，这与高电荷态离子导向相同。但是，实验观察到出射电子角分布 FWHM 随入射流强增加变化不明显，如图 3 所示。图 3 中高斯拟合和实验结果在角分布中间区域符合较好，在两远侧稍有偏差。由于探测器刻蚀通道工艺限制，探测器两端通

道分辨率较低，所以对信号识别较差，掺杂有较多电子学噪声。

本实验中，石英管弯曲角 (9°) 大于其孔径与长度比的对应角 (4°)，但仍有相当可观的电子穿越石英管。由管弯曲度、管口直径及管口到探测器底板的距离，计算出电子在管内经过单次反射，从贴近出口管口边缘处出射最大角度为 ±13°。但是图 3 中电子束角分布以 0° 角 (本实验中，出射管口对准探测器中心位置，即探测器的正中间位置) 为中心，呈高斯分布。这与 Stolterfoht 等^[17]的结果一致，表明电子与宏观弯曲石英管相互作用中，存在导向现象。随着入射电子流强的增加，我们观察到传输效率也随之增加 (如图 2 所示)，与 Stolterfoht 等^[5]高

电荷态离子导向的结果相似。

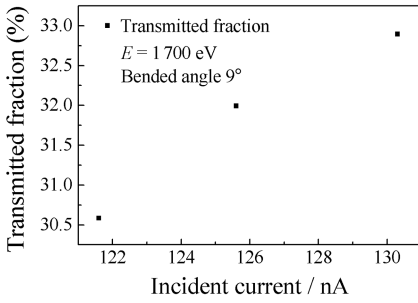


图 2 传输效率与入射流强的关系

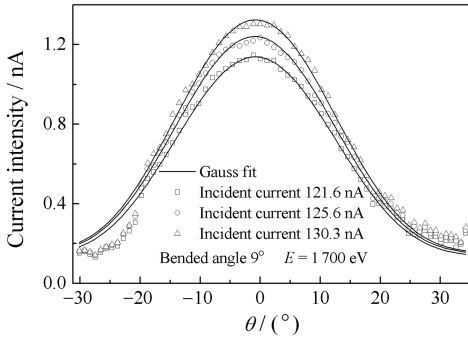


图 3 入射流强对出射电子角分布的影响

方块、星形以及三角形点分别为入射流强为实验值，实线为高斯拟合结果。

图 4 和 5 给出了入射能量对出射电子角分布和传输效率的影响。实验发现，与高电荷态离子的导向情形相反，在相同入射流强下，电子束的传输效率随入射能量的增加而降低，这与前面电子束导

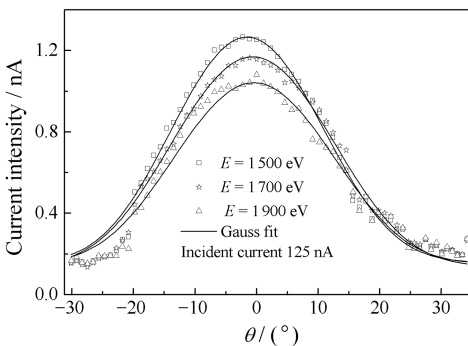


图 4 入射能量对出射电子角分布的影响

方块、星形以及三角形点为实验值，实线是高斯拟合结果。

向^[9, 10, 14-15]的结果一致。但是，实验中没有观察到出射电子角分布随入射能量的显著变化。

Skog 等^[8]发现，在稳定的导向电场建立以前，随着毛细管内壁电荷沉积量的变化，出射粒子的偏

转角发生扰动。本实验中，没有观察到电荷沉积随时间的变化。我们认为是高入射流强淹没了电荷沉积随时间的变化。

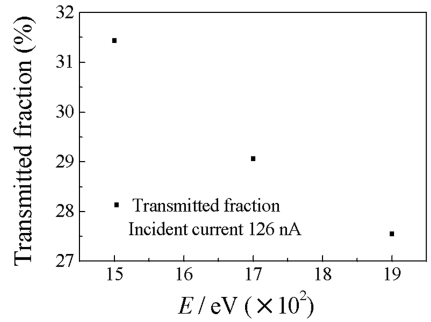


图 5 传输效率与入射能量的关系

本工作中，当入射能量相同，随着入射流强变化，没有观察到出射电子在 0°角位置随时间的移动(图 3 中角分布峰值一致)；但是，当入射流强相同，随着入射能量增大，出射电子束峰值在 0°角位置发生微小偏移(图 4 中峰值位置右移)，这与 Hellhammer 等^[18]的结果相似。在电子束导向实验中，我们认为高能电子束入射石英管内壁时，会增加非弹性散射过程影响(如二次电子发射增加)。在管内壁前端碰撞区域，入射电子束建立更强且整体更加均匀的表面平均吸引势，在这个吸引势的整体作用下，随后入射的电子束被聚焦，将沿着与管轴更为平行的方向导向出射(石英管制备中弯曲弧度并不完全与管轴平行)。漆德君等^[14]发现，经直玻璃管的电子角分布 FWHM 较窄，而弯管的较宽。可以认为，经过直管导向的电子与管壁的直接碰撞作用较弱，导向主要来自弹性散射的贡献；而弯管因入射角度增大，电子和管内壁直接碰撞作用增加，来自非弹性散射贡献增大。

Das 等^[10]发现，随着入射能量增加，电子导向传输效率反而降低；随着偏转角增大，传输效率也降低。这与本实验结果图 4 和图 5 吻合。我们认为，随着入射能量增加，电子与管内壁直接碰撞产生的非弹性过程增多，虽然二次电子发射增多，但入射电子在管材料中损失更多，同时电子能损增加。随着电子束入射偏转角增大，电子将以更大角度与管内壁直接碰撞，导向中弹性碰撞的贡献进一步减弱，从而传输效率降低。高电荷态离子导向中传输效率随入射能量的增加而增加，而电子导向却是随入射能量的增加而减小，其传输效率要比高电荷态

离子小得多。通过图2和图5比较,我们发现,电子导向传输效率随入射能量的变化要比随入射流强的变化大,这与Milosavljević等^[9]观察到的现象相似。我们认为,入射流强的大小决定了管内壁电场分布的均匀性。入射流强越强,管内壁电荷沉积区域的面积越大,形成的导向电场越均匀,从而电子传输效率增加。此时,电子传输效率与管内壁沉积电荷形成的电场成正比关系^[5]。随着入射能量增加,电子与管内壁非弹性效应作用增大,电子在管内壁材料中的损失增加,因此降低了电子传输效率。此时,电子传输效率与入射能量关系较为复杂,电子电离激发管内材料过程中的能量损失与入射能量不是简单的反比关系^[19],其中含有入射能量的对数因子修正。

随着入射电子流强增大,管内壁沉积电荷产生的电场变大并且分布更均匀,入射电子受力增大,与管内壁弹性碰撞增多,从而沿着与管轴平行方向出射。此时,随着入射流强增加,电子传输效率增大,出射电子角分布FWHM减小,如图2所示。而随着入射能量的增加,实验观察到电子传输效率降低,如图5所示。但出射电子角分布FWHM随入射能量和入射流强变化不明显,如图3和图4所示。本实验中,入射流强均大于120 nA,在如此强流入射电子和石英管内壁相互作用中,管内壁表面沉积电荷趋于饱和,形成均匀分布的电场。我们知道,非弹性散射效应主要由入射电子能量决定,入射电子流强对其影响有限^[5, 17]。因为主导导向效应的弹性散射作用变化不大,所以出射电子角分布FWHM随入射流强增加不明显。考虑到本实验使用流强范围较窄(120~130 nA),出射电子角分布FWHM变化可能不明显。目前,对于出射电子角分布随入射流强变化的研究未见报道,应用一系列流强范围宽(0.1~150 nA)的入射电子导向实验有待深入。实验中,电子入射能量都在1.5 keV以上,入射电子与管内壁的相互作用中,主要是非弹性散射过程占主导地位,随着入射能量增加,电子与管材料非弹性过程增多,使得入射电子损失增多,所以传输效率减小。对于如此高能量的电子入射,弹性散射过程变化不大,管内壁电荷沉积产生的电场甚至趋于饱和,所以本实验中没有观察到出射电子角分布FWHM随入射能量的变化关系。

高电荷态离子导向中,出射离子分布随着入射

能量增加存在振荡现象。Kanai等^[20]认为,对较低入射能量,随着入射能量增加,入射区域的电荷沉积增多,产生的反射电场增大。原来经过一次反射就能出射的离子,现在受力增大和反射角增大,在对面内壁又形成电荷沉积区域。经过这第二块沉积电荷反射,出射方向改变,从而减小了同一位置观察到的出射强度。但当入射能量增加到一定程度($(E/q)^{-0.3}$),虽然此时电荷沉积面积有所增大,但是产生的有效反射电势反而微弱地降低了,因而离子束反射角减小,难以形成对面内壁表面的第二个电荷沉积包,也就不能显著改变出射流强分布。Milosavljević等^[9]和Das等^[10]都观察到了导向电子束随入射能量变化发生振荡的情况,并且比高电荷态导向情况更为显著。虽然本实验使用的电子束入射能量更高,但由于入射束流很强,实验中并未观察到出射束流振荡现象。

4 结论

本实验用大流强、高能量的电子束与宏观弯曲石英管为相互作用体系,研究了电子束在管中的导向效应。测量了出射电子角分布随入射电子流强和能量的变化关系。发现电子与宏观弯曲石英管相互作用过程中,存在导向效应。由于采用了较大入射流强,本实验并没有发现出射电子分布随能量扰动的现象。本工作研究了入射电子流强和能量对电子传输效率的影响,相同入射能量下,随着入射流强增加,传输效率随之增加;相同入射流强下,导向效率随入射能量的增加而降低。比较现有导向实验和理论模型,解释了实验观察到的现象。证实电子与大角度弯曲宏观尺寸石英管相互作用过程中,存在导向效应。与高电荷态离子导向机制不同,电子导向是由电子与管内壁表面弹性和非弹性散射共同作用的结果。

参考文献 (References):

- [1] STOLTERFOHT N, BREMER J H, HOFFMANN V, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **88**: 133201.
- [2] YAMAZAKI Y, NINOIMYA S, KOIKE F, *et al.* J Phys Soc Jpn, 1996, **65**: 1199.
- [3] SAHANA M B, SKOG P, VIKOR G, *et al.* Phys Rev A, 2006, **73**: 040901.
- [4] MÁTÉFI-TEMPFLI S, MÁTÉFI-TEMPFLI M, PRIAUX L, *et al.* Nanotechnology, 2006, **17**: 3915.
- [5] STOLTERFOHT N, HELLHAMMER R, BUNDESMANN

- J, *et al.* Phys Rev A, 2007, **76**: 022712.
- [6] SCHIESSL K, PALFINGER W, LEMELL C, *et al.* Phys Rev A, 2005, **72**: 062902.
- [7] SCHIESSL K, PALFINGER W, LEMELL C, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2005, **232**: 228.
- [8] SKOG P, ZHANG H Q, SCHUCH R. Phys Rev Lett, 2008, **101**: 223202.
- [9] MILOSAVLJEVIĆ A R, VIKOR G, PEŠIĆ Z D, *et al.* Phys Rev A, 2007, **75**: 030901.
- [10] DAS S, DASSANAYAKE B S, WINKWORTH M, *et al.* Phys Rev A, 2007, **76**: 042716.
- [11] SCHIESSLÖK, TKÉSI K, SOLLEDER B, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **102**: 163201.
- [12] BURGDÖRFER J, GIBBONS J. Phys Rev A, 1990, **42**: 1206.
- [13] DEISS C, ROHRINGER N, BURGDÖRFER J, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, **96**: 013203.
- [14] QI Dejun, YU Deyang, WANG Wei, *et al.*, Nuclear Physics Review, 2008, **25**(4): 375(in Chinese).
- (漆德君, 于得洋, 王伟, 等. 原子核物理评论, 2008, **25**(4): 375.)
- [15] DASSANAYAKE B S, DAS S, BERECZKY R J, *et al.* Phys Rev A, 2010, **81**: 020701.
- [16] WANG Wei, YU Deyang, SHE Qianshun, *et al.*, Nuclear Physics Review, 2010, **27**(2): 174(in Chinese). (王伟, 于得洋, 余乾顺, 等. 原子核物理评论, 2010, **27**(2): 174.)
- [17] STOLTERFOHT N, HELLHAMMER R, PEŠIĆ Z D, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2004, **225**: 169.
- [18] HELLHAMMER R, SOBOCINSKI P, PEŠIĆ Z D, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2005, **232**: 235.
- [19] YANG Chaowen. Protection and Security of Ionizing Radiation(in Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 2009, 31—33. (杨朝文. 电离辐射防护与安全基础. 北京: 原子能出版社, 2009, 31—33.)
- [20] KANAI Y, HOSHINO M, KAMBARA T, *et al.* Phys Rev A, 2009, **79**: 012711.

Guiding Effect of Bended Macroscopic Quartz Tube for High Current Electron Beam

ZHANG Ming-wu^{1, 2}, WANG Wei^{1, 2, 3}, XUE Ying-li¹, YU De-yang¹,
CHEN Jing^{1, 2}, WU Ye-hong^{1, 2}, YANG Bian^{1, 2}, CAI Xiao-hong¹

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

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

3. *School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: By using an incident electron beam with the high current and high energy, the guiding effect of the bended macroscopic quartz tube for the electron beam has been investigated. The angular distributions of outgoing electrons depending on the current and energy of incident electrons were measured. The dependences of electron transmitted fraction on energy and current of incident electrons are also shown. As the incident electron energy increasing, the electron transmitted fraction increases, but it decreases while the incident electron current increasing. The results have been compared with the present data. This work presents, the process of guiding electrons is essentially different from that of guiding highly charged ions, the guiding electron beam was caused by both elastic and inelastic collisions between electrons and inner walls of quartz tube, rather than self-organized charging effect on the surface of inner wall of quartz tube.

Key words: electron beam; bended quartz tube; angular distribution; transmitted fraction

Received date: 22 Sep. 2011; **Revised date:** 29 Sep. 2011

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10775160); National Basic Research Program of China(973 Program) (2010CB832900)

Corresponding author: CAI Xiao-hong, E-mail: caixh@impcas.ac.cn