

文章编号: 1007-4627(2008)04-0375-05

# 宏观尺寸弯曲石英管对中低能电子束的导向作用\*

漆德君, 于得洋#, 王 伟, 张明武, 蔡晓红#

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 研究了宏观尺寸的弯曲圆柱形石英管对 1 100, 1 300 和 1 500 eV 3 种能量电子束的导向作用, 并对实验结果与相同材质和尺寸的直管的情形进行了分析对比。实验中利用一个位置灵敏法拉第筒对从石英管出射的电子束进行探测, 获得从管道中出射的电子束流强度在位置灵敏法拉第筒各道上的分布, 其结果显示宏观尺寸石英管对电子束存在导向作用。与慢速高电荷态离子和绝缘毛细管相互作用的物理过程类似, 这种导向效应是由电荷在管壁内表面自组织充电引起的。实验还发现, 入射电子束流的强度越强, 其导向作用越明显, 这与微观尺寸毛细管对慢速高电荷态离子的导向作用不同。石英管导向能力与管的尺寸、形状及材料之间的关系还有待进一步的系统研究。

**关键词:** 导向作用; 自组织充电; 毛细管; 石英管

**中图分类号:** O561.5 **文献标识码:** A

## 1 引言

2002 年, Stolterfoht 等<sup>[1]</sup> 利用 3 keV  $\text{Ne}^{7+}$  离子入射到与束流方向成一定角度的纳米尺寸毛细管(multi-channel capillaries)中, 发现了大量出射的 Ne 离子保持了入射前的电荷态, 说明大量的 Ne 离子在入射以后并没有与管壁发生直接碰撞而出射。他们认为该现象是由于高电荷态离子在绝缘毛细管壁内表面上进行自组织充电(self-organized charged-up)而产生的。电荷的自组织充电使电荷在管壁内表面积累, 并形成有规律分布的电场, 从而阻止了高电荷态离子与管壁直接碰撞并把它们导出管外。他们的研究很快引起了关注, 一系列与之相关的实验与理论工作也随即出现<sup>[2-11]</sup>, 实验中所使用的毛细管的材料有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{SiO}_2$  等。除了可以为研究空心原子提供有效的手段以外<sup>[12]</sup>, 带电粒子束与毛细管的相互作用研究还可以使人们更详细和深入地了解带电粒子的种类和毛细管内壁的物理特性对自组织充电过程的影响。此外, 它还向人们展示出一种远距离高效率传输带电粒子的新方法以及在小尺度内控制束流尺寸, 得到微米束、甚至纳米束的可能途径<sup>[13-19]</sup>。

伴随着毛细管对高电荷态离子束导向作用研究的进展, 人们也开始对带负电的电子束与毛细管的相互作用产生了兴趣。电子带负电, 质量比重离子轻很多, 电子束与毛细管作用是否也存在导向作用? Milosavljevic 等<sup>[20]</sup> 和 Das 等<sup>[21]</sup> 分别在 200-300, 500 和 1 000 eV 的能量下进行了电子束与聚合物毛细管相互作用的实验研究, 其结果证实了绝缘毛细管对低能电子束具有导向的作用。但与高电荷态离子束的导向相比, 绝缘毛细管对电子束的导向作用有其自身的特点: 传输效率比高电荷态离子束的情形低很多, 而且在入射电子能量较高的情况下被传输电子的能量损失很大。

无论是对于高电荷态离子束还是对电子束, 目前这方面的研究有两个特点: 第一, 实验中使用的带电粒子束流强都很弱(一般在皮安量级); 第二, 使用的绝缘管都是小尺寸的毛细管(微米到纳米量级)。长期以来, 人们都在发展各种技术手段和方法来提高远距离传输带电粒子的效率。由于绝缘体管道对带电粒子束有导向作用, 因此具备传输带电粒子的可能性。为此, 本工作分别研究了在束流强度达到纳安量级的情况下, 1 100, 1 300 和 1 500 eV

\* 收稿日期: 2008-03-18; 修改日期: 2008-04-21

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10775160)

作者简介: 漆德君(1982-), 男(汉族), 广东广州人, 硕士, 从事原子物理研究; E-mail: qidejun1982@yahoo.com.cn

# 通讯联系人: 于得洋, E-mail: d.yu@impcas.ac.cn; 蔡晓红, E-mail: caixh@impcas.ac.cn

3种能量的电子束在弯曲的圆柱形石英管内的传输特性，并与相同材质和尺寸的圆柱形直管的实验结果进行了对比。为了克服位置灵敏探测器(PSD)无法在强束流的情况下工作的局限性，我们使用一个经过特殊设计的位置灵敏法拉第筒对出射电子束进行探测，获得从管道中出射的电子束流强度在位置灵敏法拉第筒各道上的分布。

## 2 实验设备

实验中所使用的石英管有两种，分别是相同尺寸的圆柱形的直管和弯管，长度都是50 mm，两端内径同为2.3 mm。弯管是利用一根直管经过加热弯曲了15°而制成的。经过弯曲之后，入射电子束将不能沿管轴直接从管中穿出；电子束由一根电子枪提供。通过调节灯丝的电流控制电子枪发射电子束流的强度。

实验中用于探测出射电子束的是一个位置灵敏法拉第筒。该法拉第筒由一块覆铜板和两层铜盒子构成。图1是位置灵敏法拉第筒底部覆铜板正面与反面的示意图，阴影部分为覆盖的铜片，其余部分是中间的绝缘层。正反两面的铜片由金属化孔相

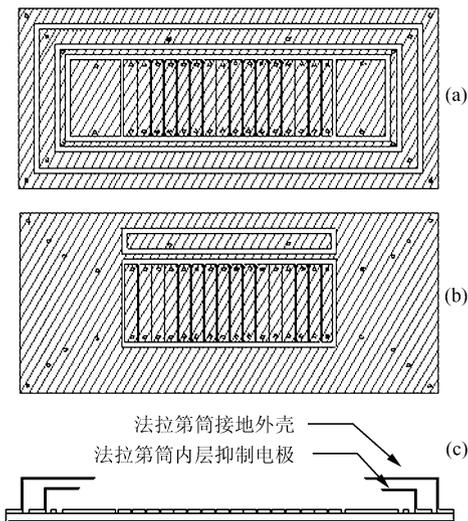


图1 位置灵敏法拉第筒示意图

(a) 底部覆铜板正面，(b) 底部覆铜板反面，(c) 剖面示意图。

连。如图1(a)所示，从外往内数第一环铜片将连接外层铜盒并接地，目的是保证没有进入法拉第筒内部而轰击到外壳上的电子可迅速被释放，从而避免电荷积累；第二环铜片连接内层铜盒并加上一100 V电压作为抑制电极。第三环铜片接地，目的是阻

断从抑制电极到测量电极之间的表面漏电流。用于探测出射电子束位置和强度的是中间被刻分成相同尺寸的16道铜片，每道长15 mm，宽2.3 mm，每两道之间相隔0.2 mm。每一道均通过一根导线从真空中引出并与电流表相连接。图1(c)是法拉第筒的剖面结构示意图。

## 3 电子束的导向作用

图2为使用圆柱形弯曲石英管时的实验装置示意图，石英管出口离法拉第筒底部约30 mm。电子枪发射的电子束经过一个直径为1 mm的光阑后进入弯曲的石英管，从石英管出射的电子束由距离管口30 mm远处的位置灵敏法拉第筒探测。实验中石英管的入口与光阑紧贴，并且光阑的孔径比石英管的内径更小，可以认为穿过光阑的电子束绝大部分直接进入石英管内部而没有在管口外部积累。为了对比，我们在相同的能量下，将电子束同轴地入射到相同尺寸和材料的直石英管中，并观察了电子束出射后在法拉第筒各道上的强流分布。

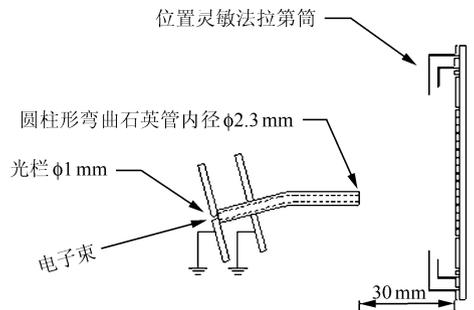


图2 圆柱形弯曲石英管的实验示意图

石英管被弯曲了约15°。

图3给出了能量分别为1 100，1 300和1 500 eV时，电子束从圆柱形弯曲石英管出射后在法拉第筒各道上的流强分布情况， $U_a$ 为电子枪的加速电压。图4给出了能量分别为1 100，1 300和1 500 eV时，电子束直接入射到直石英管并出射后在法拉第筒各道上的分布情况，以示与弯曲石英管情形的对比。图3和4中每条曲线代表某一确定的入射电子束流强，每幅图从下到上各曲线所代表的入射电子束流强度依次增强。受限于现有的实验条件，目前暂无法精确得知每次测量时电子枪发射电子流强的绝对值。

由图3可见，出射电子束流最强的位置是法拉

第筒的第4和第5道(石英管出口正对着的位置)。对于实验所使用的弯曲石英管,入射电子不可能沿直线通过管道,直观上看电子必然要受阻于管壁某

方式与其在直管内部的方式相似。而且流强越强,两种行进方式的相似度越高,一定程度上表明导向作用越明显。

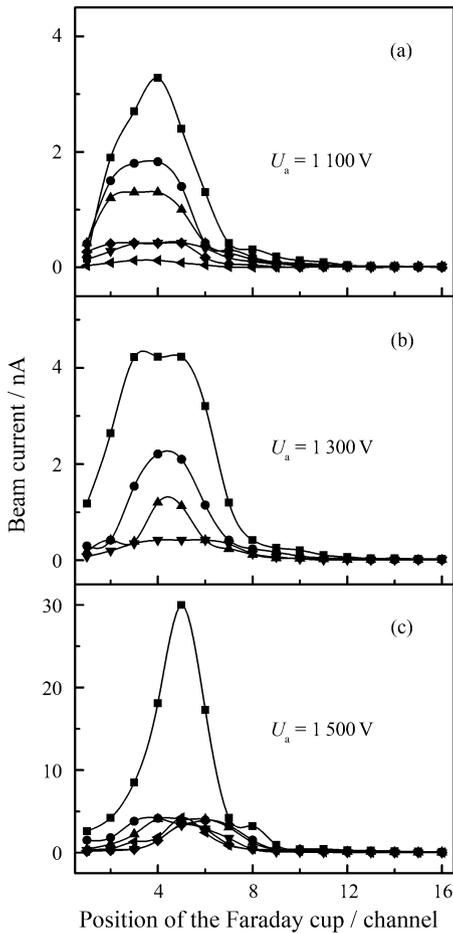


图3 不同能量的电子束从圆柱形弯曲石英管出射后在法拉第筒各道上的流强分布

处。然而,实验显示有电子出射,说明该部分电子入射以后并没有被管壁阻止而最终穿过了管道。正如Stolterfoht等人指出的,这是因为电子在管壁内表面自组织充电所形成的电场使得后来入射的电子发生偏转并被“导引”出了管道。从图3还可以看出,电子束主要分布在第1—7道,考虑到石英管出口到法拉第筒底部的距离为30 mm,以及石英管的内径为2.3 mm,根据几何关系,我们可以粗略地估算出射电子束的发散角约等于 $28^\circ$ 。另外,随着入射电子束流强的增强,峰值有收窄的趋势,形状更加接近于直管的情形,说明在入射电子束流较强的时候,被导向的电子只是在管内沿着弯曲的一段路程改变了前进方向,而在管内的其余地方电子的行进

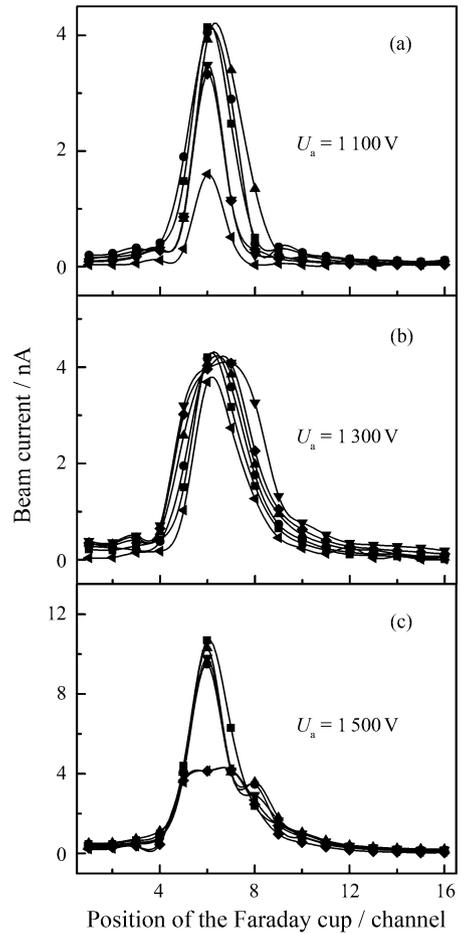


图4 不同能量的电子束从圆柱形直石英管出射后在法拉第筒各道上的流强分布

## 4 讨论

导向作用是由入射的带电粒子在管壁内表面自组织充电引起的:当束流开始入射到毛细管内部,一部分带电粒子直接轰击到毛细管管壁内表面上,粒子电荷开始在管壁上累积(这个过程称为充电),积累的电荷将会在管壁内表面附近形成一个空间电场;另一部分被电场偏转导向而穿越管道。绝缘体也有一定的导电性,积累在表面的电荷会缓慢释放,必须有一部分束流不断地轰击到其表面才能维持足够的电场强度。因此,只有在管道的绝缘性能足够好且入射粒子束流足够强时才能产生稳定的导向作用。对于特定的管道(确定的几何形状和材质)和特定的离子束(确定的粒子种类和能量),维

持稳定导向作用的电场强度是相同的,因此漏电流也是相同的,所以入射离子束越强,传输效率越高。

与 Stolterfoht 等人所使用的圆柱形纳米毛细管(内径为 100 nm)相比,本实验所用的圆柱形管的尺寸内径要大很多( $2.3 \text{ mm}/100 \text{ nm} = 2.3 \times 10^4$ ),从而整个管壁内表面的面积也大很多。形成导向作用所需要积累的电荷量必然更多。因此,当入射电子束流强较弱的时候放电比充电快,因此无法产生一个足够强的电场形成稳定的导向作用。随着入射电子流强的增强,单位时间内入射到管内的电子数目增多,管壁内表面上释放的电荷得到及时的补充并累积增多,最终达到了形成导向的条件。注意,这里所说的流强“强”和“弱”是相对而言的。定义一个相对束流强度 $\sigma$ ,它等于入射束流强度与管壁内表面面积的比值: $\sigma = I/S$ ,只有 $\sigma$ 足够大,相对流强才足够强。这说明了为什么对于纳米尺寸的毛细管,束流强度在皮安量级就能形成导向。

结合我们的实验结果以及目前已有的研究结果,我们认为绝缘管道对带电粒子的传输能力产生影响的主要因素包括材料的性质、带电粒子的种类和能量、绝缘管道的长度和尺寸。材料的电阻性能以及带电粒子的种类直接影响到自组织充电过程,而电荷在自组织充电过程中必然要损失一定量的电荷(这个电荷量取决于材料的电阻性能),因而直接关系到传输效率。而带电粒子的种类则决定了其自身对电场的敏感性,而这种敏感性决定了其运动轨迹被电场偏转的程度。因此直接影响导向的效果,从而对传输性能产生影响。另外,带电粒子的能量将会影响粒子与管壁内表面相互作用的程度并因此影响到导向效果。如果入射粒子的能量过高,则很可能克服自组织充电形成的电场对其的作用力直接轰击到管壁内表面上损失掉并产生二次电子,这些二次电子可能会和入射粒子发生库仑相互作用而影响导向效果。例如,图3(c)显示出在入射电子能量为 1 500 eV 时,导向效果显得不太稳定,有可能是上述原因引起的。目前,对于绝缘管道的长度以及尺寸对导向和传输能力的影响还不太清楚,有待日后进一步地系统研究。

## 5 总结

我们进行了宏观尺寸石英管对中低能电子束导向作用的实验研究,结果证实了宏观尺寸石英管对

电子束存在导向作用。通过分析得知,类似于毛细管对高电荷态离子的导向作用,电子束被石英管壁内表面自组织充电形成的电场所偏转并被导出石英管。本实验还发现,对于粗口径的圆柱形石英管,随着入射电子束流强度的增加,这种导向作用明显地增强,这个结果有别于小尺寸毛细管(微米到纳米量级)对高电荷态离子束的导向实验结果,揭示了采用宏观尺寸的导管进行强流带电粒子束传输和导向是可能的。

通过对电子束与绝缘管道相互作用的研究及其与高电荷态离子束的情形的对比,可以使人们能够更深入地了解正、负两类带电粒子在绝缘管道内壁上自组织充电的物理过程。目前,该研究还处于初始阶段,但已经获得了很有趣的新实验结果。管的尺寸、管径/长度比等因素对导向和传输能力的影响均需要进行进一步的实验研究。

## 参考文献(References):

- [1] Stolterfoht N, Bremer J H, Hoffmann R, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, 88: 133 201.
- [2] Schiessl K, Palfinger W, Lemell C, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2005, B232: 228.
- [3] Lemell C, Schiessl K, Nowotny H, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2007, B256: 66.
- [4] Schiessl K, Palfinger W, Tokési K, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2007, B258: 150.
- [5] Schiessl K, Palfinger W, Tokési K, *et al.* Phys Rev, 2005, A72: 062 902.
- [6] Stolterfoht N, Hellhammer R, Bundesmann J, *et al.* Phys Rev, 2007, A76: 022 712.
- [7] Stolterfoht N, Hellhammer R, Pesic Z D, *et al.* Vacuum, 2004, 73: 31.
- [8] Viktor Gy, Rajendra Kumar R D, Pesic Z D, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2005, B233: 218.
- [9] Skog P, Soroka I L, Johansson A, *et al.* Nucl Instr And Meth, 2007, B258: 145.
- [10] Vokhmyanina K A, Zhilyakov L A, Kostanovsky A V, *et al.* J Phys: Meth Gen, 2006, A39: 4 775.
- [11] Sahana M B, Skog P, Viktor Gy, *et al.* Phys Rev, 2006, A73: 040 901 (R).
- [12] Ninomiya S, Yamazaki Y, Koike F, *et al.* Phys Rev Lett, 1997, 78: 4 557.
- [13] Nebiki T, Yamamoto T, Narusawa T, *et al.* J Vac Sci Tech, 2003, A21: 1 671.
- [14] Kanai Y, Hoshino M, Kambara T, *et al.* Nucl Instr and

- Meth, 2007, B258; 155.
- [15] Skog P, Soroka I L, Johansson A, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2007, B258; 145.
- [16] Nebiki T, Kabir M H, Narusawa T, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2006, B249; 226.
- [17] Ikeda T, Kanai Y, Kojima T M, *et al.* Appl Phys Lett, 2006, 89; 062 508.
- [18] Ikeda T, Kojima T M, Iwai Y, *et al.* J Phys: Conference Series, 2007, 58; 68.
- [19] Iwai Y, Ikeda T, Kojima T M, *et al.* Appl Phys Lett, 2008, 92; 023 509.
- [20] Milosavljevic A R, Viktor Gy, Pesic Z D, *et al.* Phys Rev, 2007, A75; 030 901 (R).
- [21] Das S, Dassanayake B S, Winkworth M, *et al.* Phys Rev, 2007, A76; 042 716.

## Guiding Effect of Mediate and Low Energy Electron-beam by Macro-sized Bended Quartz Tube \*

QI De-jun, YU De-yang<sup>#</sup>, WANG Wei, ZHANG Ming-wu, CAI Xiao-hong<sup>#</sup>

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** It was investigated in the experiment that the guiding effect of electron beam with energy of 1 100, 1 300 and 1 500 eV through a bended cylindrical quartz tube with macro-sized. A position sensitive Faraday cup was developed and used to detect the electron beam transmitted through the quartz tube, and the distribution of transmitted beam current on each channel of the Faraday cup was acquired. Results indicate the existence of guiding effect which is due to the self-organized charge-up in the inner wall of the quartz tube similar to that of the highly charged ions. We also found that the guiding ability of the tube is related to the incident beam intensity. The relationship between the guiding ability and the material as well as the size of the tube is to be studied in the near future.

**Key words:** guiding effect; self-organized charge-up effect; capillary; quartz tube

\* Received date: 18 Mar. 2008; Revised date: 21 Apr. 2008

\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10775160)

# Corresponding author: Yu De-yang, E-mail: d.yu@impcas.ac.cn; Cai Xiao-hong, E-mail: caixh@impcas.ac.cn