

低能电子穿越玻璃直管和锥管动力学研究

万城亮 李鹏飞 钱立冰 靳博 宋光银 高志民 周利华 张琦 宋张勇 杨治虎 邵剑雄 崔莹
Reinhold Schuch 张红强 陈熙萌

Dynamics of slow electrons transmitting through straight glass capillary and tapered glass capillary

Wan Cheng-Liang Li Peng-Fei Qian Li-Bing Jin Bo Song Guang-Yin Gao Zhi-Min Zhou Li-Hua
Zhang Qi Song Zhang-Yong Yang Zhi-Hu Shao Jian-Xiong Cui Ying Reinhold Schuch Zhang
Hong-Qiang Chen Xi-Meng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 204103 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.204103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

轴棱锥对无衍射光束的线聚焦特性

[Line focusing characteristics of axicon illuminated by non-diffracting Bessel beam](#)

物理学报.2013, 62(13): 134103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.134103>

激光加速质子束对电磁孤立子的照相模拟研究

[Simulation of electromagnetic soliton radiography under laser-produced proton beam](#)

物理学报.2013, 62(11): 114103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114103>

永磁体外部磁场的均匀性研究

[Inhomogeneity of external magnetic field for permanent magnet](#)

物理学报.2013, 62(8): 084105 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.084105>

障碍物后周期性 Bottle beam 的自重建

[The self-reconstruction of periodic Bottle beam behind obstacle](#)

物理学报.2012, 61(24): 244104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.244104>

Bessel 光束自重建的模拟仿真与实验验证

[Simulation and experimental confirmation on the reconstruction of Bessel beams](#)

物理学报.2012, 61(16): 164103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.164103>

低能电子穿越玻璃直管和锥管动力学研究^{*}

万城亮¹⁾ 李鹏飞¹⁾ 钱立冰¹⁾ 靳博¹⁾ 宋光银¹⁾ 高志民²⁾ 周利华¹⁾
 张琦¹⁾ 宋张勇³⁾ 杨治虎³⁾ 邵剑雄¹⁾ 崔莹¹⁾ Reinhold Schuch⁴⁾
 张红强^{1)†} 陈熙萌^{1)‡}

1) (兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

2) (甘肃省核与辐射安全中心, 兰州 730000)

3) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

4) (Physics Department, Stockholm University, S-10691 Stockholm, Sweden)

(2016年3月3日收到; 2016年7月22日收到修改稿)

我们通过实验测量 1.5 keV 电子穿越玻璃直管/锥管的二维角分布的时间演化, 研究了低能电子与绝缘玻璃管相互作用的动力学过程. 观察到了低能电子穿越玻璃直管和锥管后其强度随时间呈现振荡. 穿透的强度出现振荡峰结构, 在出现峰的地方, 透射的电子最开始出现微弱的圆点, 随后微弱的圆点变为较明显的亮点, 此后亮点逐渐变大变亮, 接着变暗, 最后亮斑迅速消失, 同时透射电子的角分布中心伴随移动. 这种行为显示了低能电子在玻璃管内的充放电呈现振荡行为, 当入射电荷累积足够大时, 存在一个快速放电的通道, 后迅速充电产生阻止电子穿越的电场. 对比锥管后的角分布和直管的角分布, 我们发现锥管的穿透电子束流密度比直管的大 40%. 锥管的充放电的时间比直管快, 这显示了锥管更容易快速放电, 其由于充电建立的电场也更容易影响传输的电子. 电子在玻璃直管和锥管的快速充放电的动力学过程显示出电子的传输机制与高电荷态离子有很大不同, 其快速充放电过程显示了带负电的电子与绝缘体材料相互作用中的充放电过程与带正电离子的不同.

关键词: 低能电子, 全角分布, 玻璃毛细管, 高电荷态离子

PACS: 41.85.Ja, 41.85.Lc, 41.75.Fr

DOI: 10.7498/aps.65.204103

1 引言

带电粒子穿越绝缘体微孔的导向效应研究始于 Stolterfoht 等^[1]的发现. 当 3 keV 的 Ne^{7+} 离子穿越 PET (聚对苯二甲酸类塑料, polyethylene terephthalate) 毛细管后, 能在毛细管的倾角远大于几何张角处观察到穿透粒子, 而且绝大部分穿透粒子的电荷态和能量没有发生改变, 这种效应为定向效应^[1-4]. 绝缘毛细管的导向效应为新的带电粒子及离子束光学方法的产生带来可能. 国内外研究

组进行了关于导向效应的各种研究^[1-11]. 2007 年 Das 等^[5]做了低能电子穿越 PET 绝缘纳米毛细管的实验. 他们通过穿透电子能谱发现一部分穿透电子有明显的能量损失, 并且这种能量损失随着毛细管倾角的变大而增加. 然而在高电荷态离子与毛细管相互作用的实验中部分穿透粒子发生能量损失的现象并没有被观察到. 2013 年, Wickramarachchi 等^[6]观察了玻璃锥管在固定倾角时的电子穿透率随时间的变化关系, 发现电子穿透率随时间做不稳定的大幅波动, 与离子穿透率为时间的稳定函数有很大区别. 电子在绝缘毛细管中导向效应的

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 11475075, 11104125) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhanghq@lzu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: chenxm@lzu.edu.cn

机理还有待更进一步的研究.

以前的电子导向效应实验是用一维静电能谱仪来测量穿透电子的能谱和角分布^[5,6]. 由于一维静电能谱仪在入口处有一个狭缝, 在每一步测量中只能容许穿透电子角分布的一部分被测量到, 所以只有在穿透电子达到稳定状态时其角分布测量的精确性才能得到保证, 而对于时间依赖的穿透电子的角分布和穿透率是无法进行快速测量的. 利用二维成像探测器直接获得穿透电子全角分布的时间演化和动力学过程, 才能研究穿透电子角分布在充电过程中是否和离子类似沿着轴向做振荡移动^[6]. 为了这个目标, 我们开发了基于Labview的MCP与荧光板二维成像系统. 二维微通道板(microchannel plate, MCP)与荧光板结合的探测方式是单粒子计数与位置灵敏探测的标准探测方式^[12,13]. MCP既可以在粒子进入时产生脉冲电流用于粒子计数, 又可以倍增并加速次级电子成为荧光板的图像增强器. 荧光板的荧光图像可由CCD(电荷耦合器件, charge coupled device)相机读出. 采用这样一个系统我们观测了能量为1.5 keV的低能电子束穿越高硼硅玻璃直管和锥管的透射电子全角分布随时间演化的过程. 我们发现了穿透电子强度随时间呈现振荡行为, 出现一个个持续10 s左右的穿透强度先增加后减小的峰, 在一个穿透强度峰内, 其角分布中心发生移动, 角分布的宽度发生先增大后减小的变化. 这些特征显示了电子在玻璃

管内部发生充放电过程, 且其动力学特征与高电荷态离子导致的充放电过程不同.

2 实验装置

实验装置如图1所示, 由电子枪产生能量为1.5 keV的低能电子束, 通过弧形偏转板做90°偏转(避免电子枪热阴极发出的光被MCP探测到), 并由水平和竖直偏转板微调方向后, 被电透镜聚焦, 经过两个相距220 mm的四级狭缝准直后, 再次被螺线圈准直聚焦, 成为束斑大小为2 mm × 2 mm、发散度为1°、束流强度为400 pA/mm²的电子束. 穿越的电子轰击在MCP板上, 经多次倍增后轰击在荧光板上产生荧光. 荧光板为P43型荧光材料, 发光峰值波长为545 nm绿光. 荧光经45°全反射镜反射进入摄像头成像. 真空隔离窗为石英窗, 对绿光的透射率接近100%. 荧光图像被持续工作的CCD摄像头俘获, 由Labview程序控制, 实时获取并储存在电脑中. 电子探测和获取系统如图2所示. 其中MCP前端接地, 后端接正高压. 在MCP的后面板提取电子打在MCP上产生的正信号, 经过时间快前放和时间滤波放大后进入恒比甄别器(constant fraction discriminator, CFD), 最后进入Labview程序控制的计数器单元, 产生计数被电脑记录.

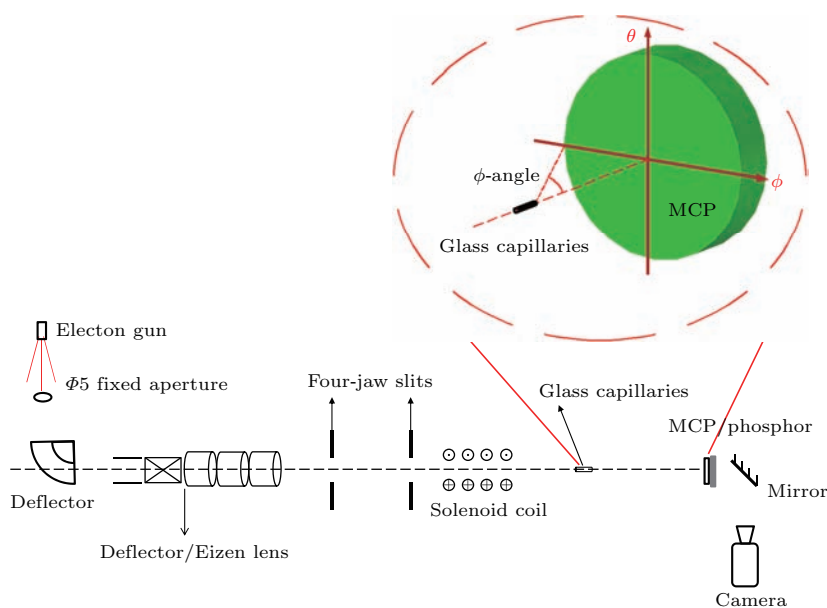


图1 实验装置和探测角几何示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup and the geometry of the observation angles.

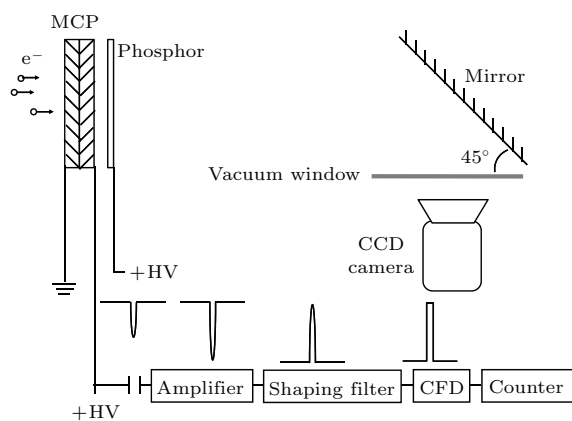


图2 电子探测和成像系统

Fig. 2. Schematic diagram of electrons detection and imaging system.

实验中直玻璃管内径0.5 mm, 长28.5 mm, 几何张角 1° . 锥形玻璃管入口内径为0.5 mm, 出口直径为 $87.5\ \mu\text{m}$, 其中直管端长为46.3 mm, 尖端长为2.7 mm, 锥管的几何张角 0.34° . 玻璃管安装在一个5维调角器上, 可以在三个方向(前后、左右、上下)独立移动并沿着水平面(倾角)和竖直平面(仰角)内独立转动. 探测系统可以在水平面内以靶室中心竖直轴为轴转动.

我们搭建了基于Labview的二维成像系统. Labview中的图像处理工具包具有强大的图像采集与处理能力, 同时图形化语言降低了编程的繁琐程度. 图像的获取采用的是通用CCD摄像头, 需要运用Labview提供的动态链接库来实现软件与摄像头之间的通讯. 图像获取过程程序有三个不同的事件分支, 使用事件结构对不同情况进行图形语言编写. 程序的设计思路如图3所示.

基于Labview平台调用CCD摄像头获取的图像存储在指定的AVI文件中, 每份AVI文件的播放帧率为30 帧/s. 但实际上, 摄像头被程序控制的过程需要一定运行时间, 其图像俘获速率达不到30 帧/s, 所以必须对每一帧获取的图像进行时间刻度. 在程序中, 将每一帧图像对应的时间以时间文本形式写入AVI图像文件中, 该时间既可用于图像俘获速率的计算, 又可与计数文件中记录的时间对比用于计数和图像的比对分析.

设置图像叠加速率5 帧/s, 获取的图像帧数与时间的关系如图4所示. 对实验点做拟合, 拟合方程被标示在图4上. 可见在图像获取过程中, 获取帧数与时间为线性关系. 改变图像的叠加帧数, 测量得到的帧数与时间的关系仍为线性, 其拟合直线斜率与叠加帧数相关. 所以在同一叠加帧数下, 获

取1 帧所需要的时间是定值, 等于拟合直线斜率的倒数.

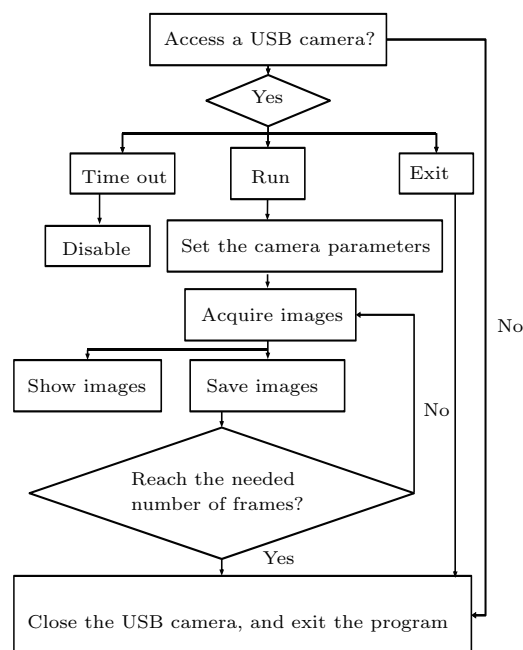


图3 获取系统Labview程序流程图

Fig. 3. Labview program logical flow diagram.

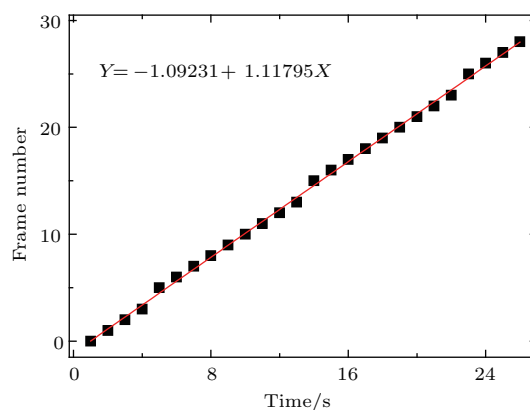


图4 获取图像帧数与时间关系

Fig. 4. The relationship between the image frame number and time.

我们采用脉冲电子束, 让其穿越直径0.5 mm的金属圆孔测试了二维成像系统. 脉冲电子束通过在水平偏转板上加脉冲电压得到, 偏转板脉冲电压由脉冲发生器产生控制脉冲, 频率为2 Hz、脉冲宽度20 μs 、幅度2 V, 进入脉冲电压源得到一个频率2 Hz、高电平20 V、低电平为0 V的电压信号(如图5所示). 低电平持续时间为20 μs . 在偏转板电压为0 V时, 电子束能穿过小孔到达探测系统, 当电压处于20 V时电子束会偏向管道消失. 每隔500 ms, 电子束穿过小孔打在探测器上, 持续20 μs .

设置摄像头每 200 ms 俘获一帧图像. 图像上有无亮斑即显示了俘获该图像的 200 ms 内有无电子束穿过. 第 1 帧出现的电子亮斑是第一个 500 ms 周期内的脉冲电子成像, 而第 3 帧出现的亮斑是下一个 500 ms 周期内电子束脉冲成像, 这与实验设置的时间序列相符合.

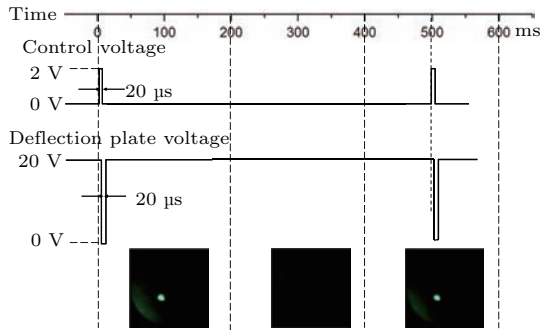


图 5 脉冲电子束成像和电压波形

Fig. 5. The images of pulsed electron beams and voltage waveforms for pulsed beams.

3 实验结果与讨论

为研究电子与玻璃管相互作用中的充电过程, 我们首先将实验用玻璃管和锥管完全放电. 然后采用 1.5 keV 电子, 测量其穿越完全放电后的玻璃管在 0° 倾角下的二维角分布的时间演化, 从而研究其充放电动力学过程.

图 6(a) 显示的电子穿越玻璃直管的强度随时间的演化, 图 6(b) 是图 6(a) 中的一个时间段内出现的穿透强度峰, 可以看到出射电子的强度呈现规律性的振荡. 这种行为同样存在于电子与玻璃锥管相互作用时, 如图 6(c) 所示, 同样图 6(d) 是图 6(c) 中的一个时间段内出现的穿透强度峰. 图中横坐标下部以时间标记, 横坐标上部表示与时间相对应的电荷累积量. 由图 6 可以看到穿越玻璃直管/锥管时, 穿透电子的计数率在 10 s 左右快速上升下降, 这显示存在剧烈的充放电的现象.

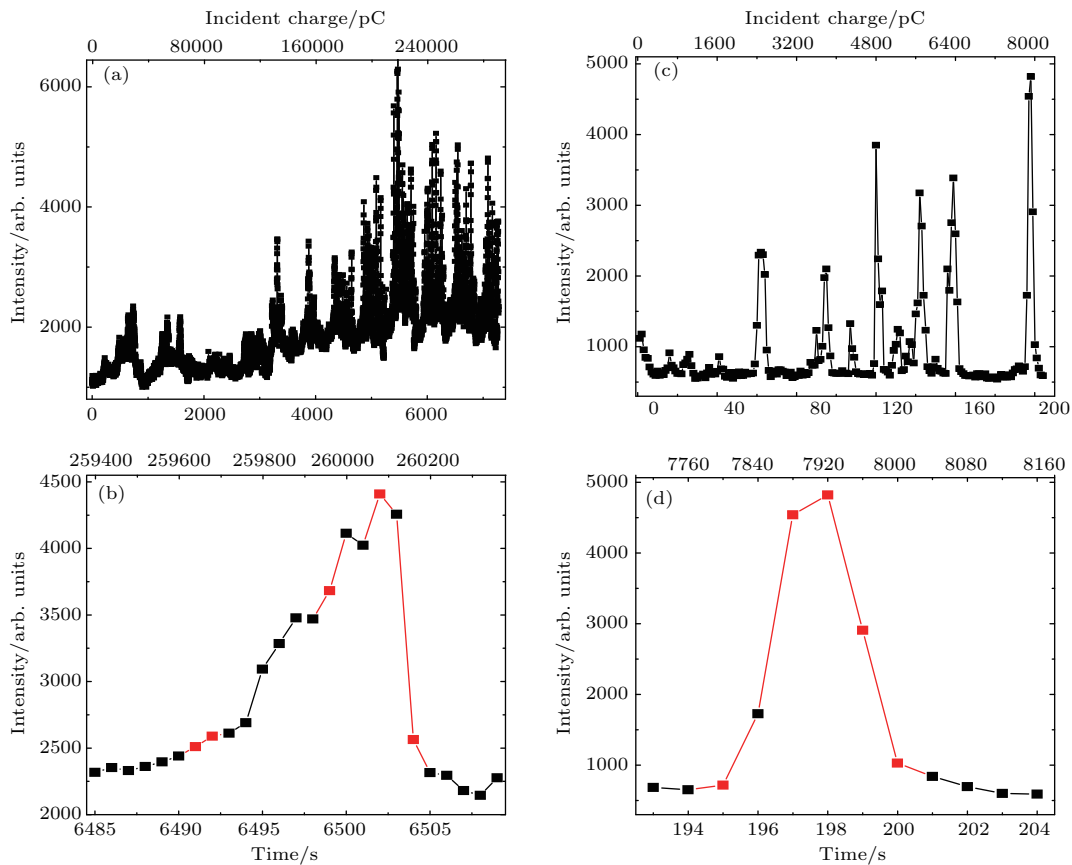


图 6 (网刊彩色) 1.5 keV 电子穿越玻璃管的透射强度随时间的演化 ((a), (b) 为直管, (c), (d) 为锥管), 其中 (b) 和 (d) 分别是 (a) 和 (c) 的一部分放大显示; 横坐标下部以时间标记, 横坐标上部表示与时间相对应的电荷累积量 (pC/capillary); (c) 和 (d) 中的红色的点对应图 7 所呈现二维穿透电子角分布 (见文中)

Fig. 6. (color online) The transmitted intensity of 1.5 keV electrons through glass capillaries as a function of time ((a), (b), the straight capillary; (c), (d), the taper glass capillary). (b) and (d) is a part of (a) and (c), respectively. In the lower of the abscissa, the unit is time, and the upper of abscissa showed the accumulation of charge (pC/capillary), corresponding to time.

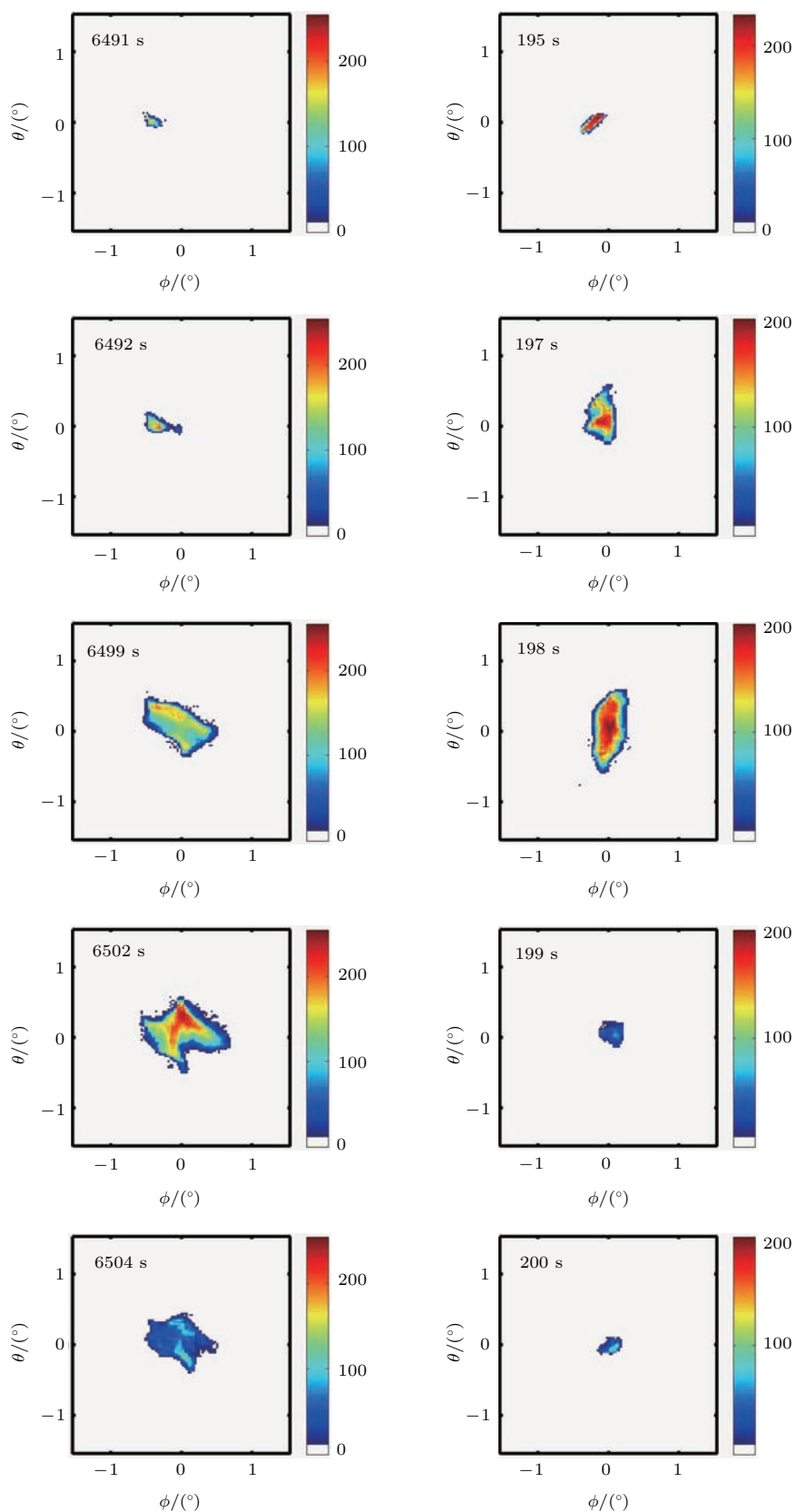


图7 (网刊彩色) 1.5 keV 电子穿越玻璃管的二维角分布随时间的演化 (左边为直管, 右边为锥管), 图中截取的是图6(b)和(d)中红圈标记的时间下获取的图像

Fig. 7. (color online) The two dimensional angle distributions of 1.5 keV electrons transmitted through glass capillaries for various time (left, the straight capillary; right, the taper glass capillary). The times are marked by red circles in figure 6(b) and (d) for the straight capillary and the taper glass capillary, respectively.

图7是穿透电子的二维角分布, 其中 ϕ 和 θ 为水平方向和竖直方向探测角度, 沿着玻璃管轴向方向为 0° 方向(如图1所示). 每幅图像左边所标示的时间与图6中用红色的点对应的的时间相对应. 最开始出现微弱的圆点, 随后微弱的小圆点变为较明显的亮点. 此后小亮点逐渐变大变亮, 接着变暗, 最后亮斑迅速消失. 为了清楚地研究角分布的变化情况, 我们将二维角分布在 ϕ 方向投影, 图8是充放电过程中 ϕ 方向的投影随入射电荷量的演化, 其中红色的实线为高斯拟合曲线. 可以看出对玻璃直管, 穿透电子首先出现在与 0° 成负方向的地方, 然后向 0° 移动, 其强度最大时候, 峰位中心在 0° , 最

后穿透强度减弱, 在 0° 附近消失. 对于玻璃锥管也有类似的特征. 为了便于定量比较这种角分布的时间演化, 我们在图9中显示了图6(b)和图6(d)充放电过程中 ϕ 方向角分布中心位置随时间的演化, 图9中的左图, 明显显示了对于玻璃直管, 穿透角分布中心最先出现角分布从 -0.4° 位置出现后移动到 0° 附近直到消失. 而对玻璃锥管, 电子穿透的角分布在 -0.3° 出现, 后移动到 0° 附近并迅速消失. 整个角分布的宽度是先增大后减小, 对于直管, 穿透电子角分布的半高宽在穿透强度最大时为 0.6° , 而锥管略小, 为 0.3° .

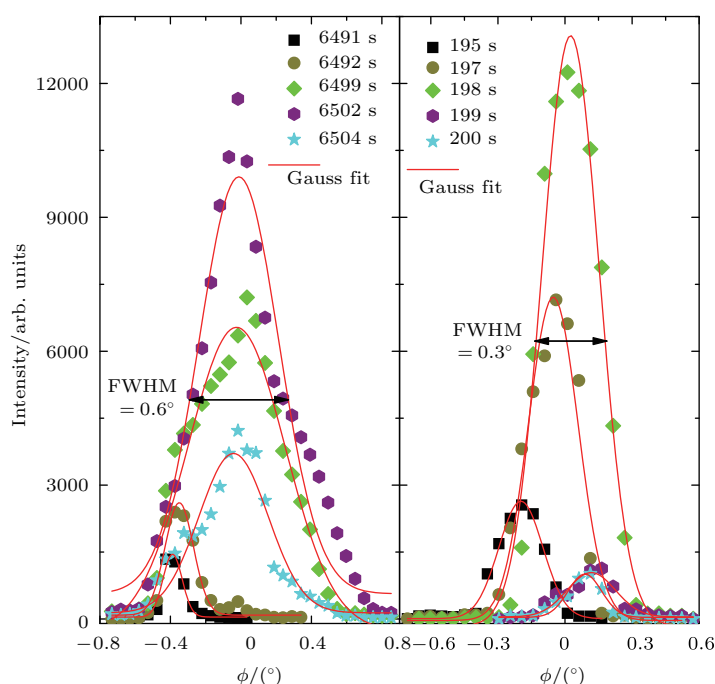


图8 (网刊彩色) 二维角分布在 ϕ 方向的投影分布随时间的演化(左边为直管, 右边为锥管)

Fig. 8. (color online) The transmitted angular distributions projected onto the ϕ plane for various time (left, the straight capillary; right, the taper glass capillary).

对于玻璃直管, 穿透电子的角分布最先出现的角度和半高宽都在其由纵横比决定的几何张角内(玻璃直管几何张角为 1° , 锥管的几何张角为 0.34°), 这种微小的移动特征和采用正离子观测的结果是一致的, 是入射电子使玻璃管内表面带电的动力学过程的反应. 由于玻璃的二次电子发射系数在实验能量 1.5 keV 下大于1, 因此, 玻璃管内部被充了正电形成的电场, 这种电场将阻止后续入射的电子穿越, 因此这种振荡的穿透强度增加阶段, 是对应正电荷沉积形成的电场的减弱过程, 即放电过程, 而穿透强度减小则对应着充电过程, 即入射电

子与玻璃管内表面碰撞, 使其表面带正电, 从而建立起对入射电子穿透起阻止作用的电场的过程. 由于实验中玻璃管除开口处接地外其他部分绝缘, 这种构型极易形成快速充放电过程, 而导致穿透强度的剧烈振荡过程. 我们最近也进行了控制这种快速充放电过程的实验, 实现了随时间变化而稳定的穿透强度.

在整个演化过程中, 电子在玻璃直管中的最大穿透率为 0.000049 , 透射电子的束流密度为 120 个/mm^2 , 而电子在玻璃锥管中的最大穿透率为 0.000054 , 透射电子的束流密度为 267 个/mm^2 ,

是直管的2.2倍. 这个穿透率的增加和锥管的几何构型有关, 其渐变缩小的锥形出口将增加入射电子与表面的碰撞, 从而增加二次电子出射的概率, 由于入射电子碰撞产生的二次电子能量很小(小于50 eV), 在这个能区的电子与表面相互碰撞时其二次电子发射系数将小于1, 从而可能构建一个负电荷沉积的电场, 这对于带负电的电子将起到聚焦作用而增加穿越锥管电子的束流密度, 这与正的离子入射时导向效应的物理图像是一致的.

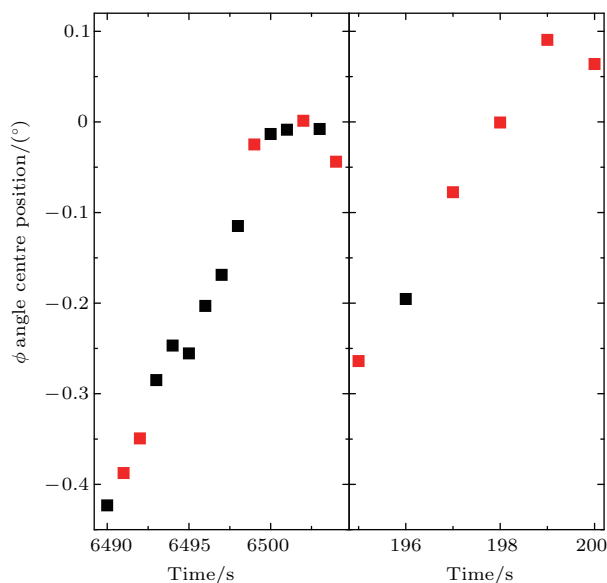


图9 (网刊彩色) ϕ 方向角分布中心位置随时间的变化 (左边为直管, 右边为锥管)

Fig. 9. (color online) The center position of the transmitted angular distributions in the ϕ plane for various time (left, the straight capillary; right, the taper glass capillary).

4 结 论

我们采用自主研发的基于MCP的二维成像系统对电子穿越玻璃管的动力学过程进行了研究. 我们通过实验测量了穿透电子按时间演化的全角分布二维图像, 发现了低能电子在玻璃直管和锥管中存在多次快速充放电的振荡行为: 在每次充放电时, 穿透强度在10 s左右时间内先增大后减小, 整个过程伴随着角分布中心的移动, 以及角分布宽度的先增大减小. 这显示了电子充放电速度非常快,

而低能电子在玻璃管中的快速充放电过程, 与高电荷态离子充电在小量级而放电时间以天计算的充放电过程有很大不同, 显示了带负电的电子与绝缘体材料的相互作用过程, 与带正电的离子入射时的电荷沉积过程的速度和方式的不同. 我们也发现电子穿越锥管后的角分布比直管的小、充放电的时间比直管短, 并且发现锥管的穿透电子束流密度比直管的大40%, 即产生对电子的聚焦效应. 这是由于锥管的构型造成的, 锥管更利于形成带有聚焦性质的电场, 从而聚焦电子.

参考文献

- [1] Stoltterfoht N, Bremer J H, Hoffmann V, Hellhammer R, Fink D, Petrov A, Sulik B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 133201
- [2] Stoltterfoht N, Hellhammer R, Bundesmann J, Fink D, Kanai Y, Hoshino M, Kambara T, Ikeda T, Yamazaki Y P 2007 *Phys. Rev. A* **76** 022712
- [3] Schiessl K, Palfinger W, Tökési K, Nowotny H, Lemell C, Burgdörfer J 2005 *Phys. Rev. A* **72** 062902
- [4] Skog P, Zhang H Q, Schuch R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 223202
- [5] Das S, Dassanayake B S, Winkworth M, Baran J L, Stoltterfoht N, Tanis J A 2007 *Phys. Rev. A* **76** 042716
- [6] Wickramarachchi S J, Dassanayake B S, Keerthisinghe D, Ikeda T, Tanis J A 2013 *Phys. Scr.* **T156** 014057
- [7] Schiessl K, Tökési K, Solleder B, Lemell C, Burgdörfer J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 163201
- [8] Zhang H Q, Akram N, Skog P, Soroka I L, Trautmann C, Schuch R 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 193202
- [9] Christoph L, Joachim B, Friedrich A 2013 *Prog. Surf. Sci.* **88** 237
- [10] Wang W, Chen J, Yu D Y, Wu Y H, Zhang M W, Cai X H 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 1065 (in Chinese) [王伟, 陈婧, 于得洋, 武晔虹, 张明武, 蔡晓红 2011 强激光与粒子束 **23** 1065]
- [11] Chen Y F, Chen X M, Lou F J, Xu J Z, Shao J X, Sun G Z, Wang J, Xi F Y, Yin Y Z, Wang X A, Xu J K, Cui Y, Ding B W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 222 (in Chinese) [陈益峰, 陈熙萌, 娄凤君, 徐进章, 邵剑雄, 孙光智, 王俊, 席发元, 尹永智, 王兴安, 徐俊奎, 崔莹, 丁宝卫 2010 物理学报 **59** 222]
- [12] ALPHA Collaboration, Andresen G B, et al. 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 123701
- [13] Variale V 2015 *Physics Procedia* **66** 242

Dynamics of slow electrons transmitting through straight glass capillary and tapered glass capillary*

Wan Cheng-Liang¹⁾ Li Peng-Fei¹⁾ Qian Li-Bing¹⁾ Jin Bo¹⁾ Song Guang-Yin¹⁾
 Gao Zhi-Min²⁾ Zhou Li-Hua¹⁾ Zhang Qi¹⁾ Song Zhang-Yong³⁾ Yang Zhi-Hu³⁾
 Shao Jian-Xiong¹⁾ Cui Ying¹⁾ Reinhold Schuch⁴⁾ Zhang Hong-Qiang^{1)†} Chen Xi-Meng^{1)‡}

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

2) (Nuclear and Radiation Safety Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

3) (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

4) (Physics Department, Stockholm University, S-10691 Stockholm, Sweden)

(Received 3 March 2016; revised manuscript received 22 July 2016)

Abstract

It has been found that the transmission rate of the electrons through insulating capillaries as a function of time/incident charge is not the same as that of the ions. The question arises that by using the electrons, if the negative charge patches can be formed to facilitate the transmission of the following electrons, thereby substantiating that the so-called guiding effect works also for electrons. This study aims to observe the time evolutions of the transmission of electrons through a straight glass tube and a tapered glass capillary. This will reveal the details of how and (or) if the negative charge patches can be formed when the electrons transport through them. In this work, a set of MCP/phosphor two-dimensional detection system based on Labview platform is developed to obtain the time evolution of the angular distribution of the transmitted electrons. The pulsed electron beams are obtained to test our detection system. The time evolution of the angular profile of 1.5 keV electrons transmitting through the glass tube/capillary is observed. The transmitted electrons are observed on the detector for a very short time and disappear for a time and then appear again for both the glass tube and tapered glass capillary, leading to an oscillation. The positive charge patches are formed in the insulating glass tube and tapered glass capillary since the secondary electron emission coefficient for the incident energy is larger than 1. It is due to the fact that fast discharge of the deposited charge leads to the increase of the transmission rate, while the fast blocking of the incident electrons due to the deposited positive charge leads to the decrease of the transmission rate. The geometrical configuration of the taper glass capillary tends to make the secondary electrons deposited at the exit part to form the negative patches that facilitate the transmission of electrons. This suggests that if the stable transmission needs to be reached for producing the electron micro-beam by using tapered glass capillaries, the steps must be taken to have the proper grounding and shielding of the glass capillaries and tubes. Our results show a difference in transmission through the insulating capillary between electrons and highly charged ions.

Keywords: low energy electron, the full angular distribution of the transmitted electrons, glass capillaries, highly charged ions

PACS: 41.85.Ja, 41.85.Lc, 41.75.Fr

DOI: 10.7498/aps.65.204103

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11475075, 11104125).

† Corresponding author. E-mail: zhanghq@lzu.edu.cn

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