

文章编号: 1007-4627(2014)01-0092-04

O^{2+} 离子穿过碳膜引起的前后表面电子发射

虞洋^{1, 2}, 赵永涛¹, 王瑜玉¹, 王兴¹, 程锐¹, 周贤明¹,
李永峰^{1, 2}, 刘世东^{1, 2}, 雷瑜¹, 孙渊博¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 测量了入射能为 1.9~11.3 keV/u 的 O^{2+} 离子穿过碳膜诱导的前向、后向(分别对应出射表面和入射表面)电子发射产额。实验中, 通过改变入射离子的能量和流强, 系统地研究了电子能损和离子束流强度对前向、后向电子发射产额的影响。结果表明, 在本实验的能量范围内, 前向、后向电子发射产额与对应表面的电子能损有近似的正比关系, 而与束流强度无关。分析还发现引起后向电子发射的动能阈值约为 0.2 keV/u, 势能电子发射产额约为 $1 e^-/\text{ion}$ 。

关键词: 电子发射; 电子能损; 离子束流强度

中图分类号: O571.33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.01.092

1 引言

当一定能量的离子入射到固体表面时, 其携带的能量会沉积到固体中, 从而引起电子发射、离子溅射、X 射线等过程^[1-3]。这些现象使得离子与固体相互作用的研究在原子结构和能级寿命、离子在固体表面的能损等方面有重要的研究意义^[1,4], 其中对电子发射的研究在表面分析、离子探测器等方面有广泛的应用^[4-5]。

离子在固体中诱导的电子发射主要有 3 个过程^[4,6]: (1) 离子穿过固体的时候通过激发和电离来损失能量, 损失的能量会引起大量的初级电子; (2) 初级电子向固体表面扩散时会通过级联碰撞产生次级电子; (3) 电子克服表面势垒穿出固体表面。虽然这三个过程是总结厚靶的结果, 但是对于薄膜靶依然适用。近几十年来离子穿过薄膜诱导的电子发射的研究得到了广泛的关注并取得了重要的进展^[5,7-9]。这些工作主要集中在入射离子能量为 MeV/u 的量级时诱导的电子发射的研究上, 此时入射离子能量高, 电子发射的速度阈值^[4]并不能体现出来。而本文所用的能

量较低, 可以试图寻找电子发射的速度阈值。

本文报道在中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子综合研究平台上, 用 O^{2+} 离子入射碳膜引起薄膜前后表面电子发射的实验研究。实验中通过改变 O^{2+} 离子的束流强度和能量 (1.9~11.3 keV/u), 系统地研究前向、后向电子发射产额与束流强度、电子能损以及势能沉积的关系。

2 实验装置和测量原理

本实验是在中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子综合研究平台 1 号实验终端上完成的^[10-11], 实验所需的离子束由电子回旋共振 (ECR) 离子源提供。实验装置如图 1 所示, (a), (b) 和 (c) 3 个图分别表示在实验装置上的 3 种不同的连线方式, 整套装置安装在高真空 (约 10^{-5} Pa) 的球形靶室里。沿着束流的方向, 装置中的各个部件分别为: 穿透式法拉第筒、后向抑制电极、后向电子收集罩、靶架、前向抑制电极、前向电子收集罩以及法拉第筒。其中穿透式法拉第筒是为了实时地检测束流的强度和和稳

收稿日期: 2013-03-27; 修改日期: 2013-04-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2010CB832902); 国家自然科学基金资助项目(11075192, 11105192, 11275241, 11275238, 11205225)

作者简介: 虞洋(1987-), 男, 湖北随州人, 在读硕士生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: yuyang@impcas.ac.cn

通信作者: 赵永涛, E-mail: zhaoyt@impcas.ac.cn.

定性(实时检测其测量值 I_{TFC}^* , I_{TFC} 和 $I_{1\text{TFC}}$ 可以知道束流稳定性), 前向、后向抑制电极是为了抑制由于束流发散而在前向、后向电子收集罩上产生的电子发射, 前向、后向电子收集罩用来收集发射的电子, 最后面的法拉第筒用于监测离子束的中性化程度和薄膜是否破损(通过分析其测量值 $I_{0\text{FC}}^*$, $I_{0\text{TFC}}$ 以及 $I_{10\text{TFC}}$ 可知), 靶架上的薄膜靶是用蒸镀法镀在玻璃上, 再让其剥离制成的自支撑薄膜, 薄膜表面通过溅射去污, 排除表面附着的杂质对实验结果造成的影响。

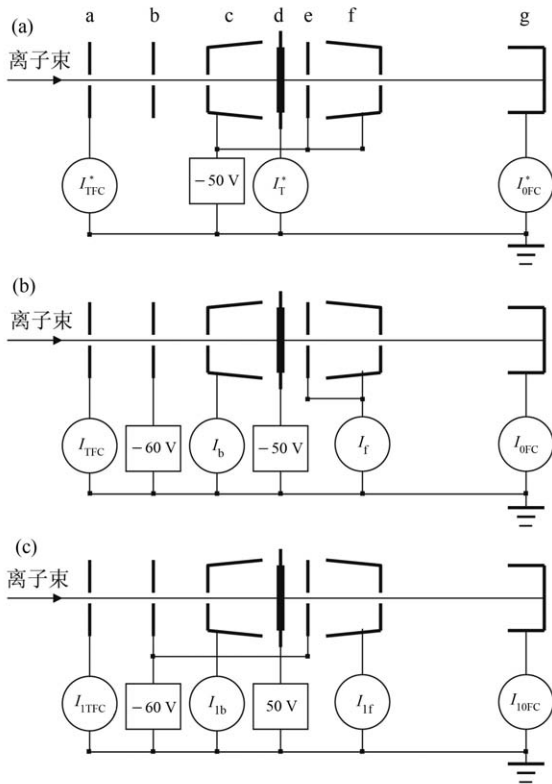


图 1 实验装置及测量方法示意图

a. 穿透式法拉第筒; b. 后向抑制电极; c. 后向电子收集罩; d. 靶架(可放置薄膜靶); e. 前向抑制电极; f. 前向电子收集罩; g. 法拉第筒。

首先, 使用图 1(a) 的连线方式来测量靶电流强度。从图中可知靶和后向、前向电子收集罩之间的电场抑制了靶上的电子发射, 通过测量靶上的电流强度 I_{T}^* (离子束在靶上中性化的离子流强) 以及法拉第筒 g 上的电流强度 $I_{0\text{FC}}^*$ (离子束穿过薄膜靶后没有完全中性化的离子流强) 可以得到入射到靶上的离子流强 I_{T} :

$$I_{\text{T}} = I_{\text{T}}^* + I_{0\text{FC}}^* \quad (1)$$

其次, 使用图 1(b) 的连线方式来测量靶入射、出射表面发射电子的流强。从图中可知前向、后向电子收集罩和靶之间静电场会使得发射的低能电子全部飞向相应的电子收集罩, 此时后向、前向电子收集罩上的电流分别为 I_{b} 和 I_{f} :

$$I_{\text{b}} = -\gamma_{\text{B}} \frac{I_{\text{T}}}{q} + I_{\text{bb}}, \quad (2)$$

$$I_{\text{f}} = -\gamma_{\text{F}} \frac{\alpha I_{\text{T}}}{q} + I_{\text{bf}}, \quad (3)$$

式 (2) 和 (3) 中的第 1 项表示发射电子的流强; 第 2 项 I_{bb} 和 I_{bf} 分别为束流打在后向、前向电子收集罩上收集到的电流强度, 它们主要由束流发散等不可避免的因素引起。 γ_{B} , γ_{F} 分别为后向、前向次级电子发射产额, q 为离子的初始电荷态, α 表示离子束穿过薄膜时剩余的离子数与入射离子数的比例系数, 用 SRIM-2012 计算得到^[12]。

最后, 使用图 1(c) 的连线方式测量得到的电流值去消除式 (2) 和 (3) 中的第 2 项。从图中可知靶和前向、后向电子收集罩上的电场抑制了靶上的电子发射。如果离子束流绝对准直而且不发散, 前向、后向电子收集罩上测量的流强为零。但是达到上述条件十分困难, 因此测量后向、前向电子收集罩上的电流分别为 $I_{1\text{b}}$, $I_{1\text{f}}$ 。由于用图 1(b) 连接方式测量和图 1(c) 连接方式测量的时间间隔很短, 并且在此期间束流比较稳定, 因此 $I_{1\text{b}} = I_{\text{bb}}$, $I_{1\text{f}} = I_{\text{bf}}$ 。结合式 (2) 和 (3) 可以消除束流未绝对准直和发散引起的影响并得到:

$$\gamma_{\text{B}} = q(I_{1\text{b}} - I_{\text{b}})/I_{\text{T}}, \quad (4)$$

$$\gamma_{\text{F}} = q(I_{1\text{f}} - I_{\text{f}})/\alpha I_{\text{T}}. \quad (5)$$

实验中的误差主要来源于束流不稳定造成的系统误差(大约为 10%) 和 α 的误差(由 SRIM-2012 程序计算得到)。

3 实验结果与讨论

实验中首先用入射能为 5 keV/u 的 O²⁺ 离子穿过 96.5 nm 的碳膜, 通过改变束流强度, 研究前向、后向电子发射产额和束流强度的关系。如图 2 所示, 靶电流强度 I_{T} 从 20 nA 增加至 270 nA 时, 前向、后向电子发射产额 (γ_{F} , γ_{B}) 分别在 1.04 e⁻/ion, 1.69 e⁻/ion 的附近, 其拟合误差分别为 ± 0.06 , ± 0.04 。这

一结果表明, 在实验所选取的束流强度的范围内, 测量得到的前向、后向电子发射产额是稳定不变的, 这和我们之前厚靶电子发射的实验结果相似^[1]。

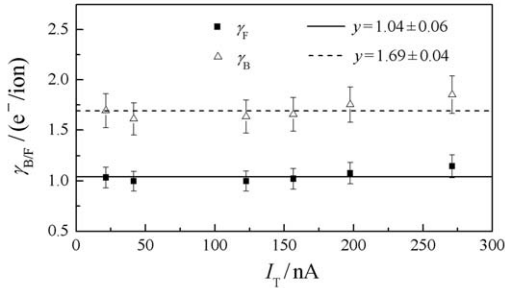


图 2 前向、后向电子发射产额 $\gamma_{F/B}$ 与靶电流强度 I_T 的关系

此外, 通过改变入射离子的能量 (1.9 ~ 11.3 keV/u), 测量 O^{2+} 离子穿过 109.6 nm 的碳膜引起的前向、后向电子发射产额, 其结果如图 3 所示。由于引起前向电子发射产额所对应的能量是离子在薄膜中运动到离出射表面之前几个电子自由程的距离时所对应的离子能量, 这个能量在实验中无法测量, 所以近似地用离子穿出薄膜时的剩余能量来替代, 它由 SRIM-2012 程序计算得到。从图 3 中可以看出, 随着对应离子能量的增加, 前向、后向电子发射产额大体上也相应地增加。

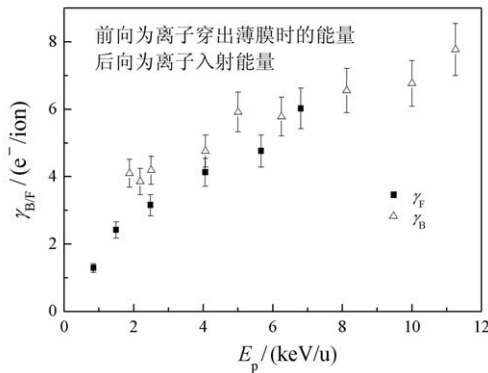


图 3 前向、后向电子发射产额 $\gamma_{F/B}$ 与对应离子能量 E_p 的关系

从电子发射的第 1 个过程可以知道, 最终发射的电子由离子在固体中沉积的能量引起。在本实验所选的能量范围内, 对电子发射贡献最大的为电子能损和入射离子的势能沉积, 而从实验测量时法拉第筒 g 上的电流值为零可知 O^{2+} 的势能全部沉积到固体中。因此, 随着离子能量变化而变化的主要能量沉积为电子能损, 为了研究它与电子发射产额的关系, 把图 3 的

横坐标换成对应能量下 O^{2+} 离子在碳膜出射表面、入射表面的电子能损 (其对应能损由 SRIM-2012 计算得到), 并对其进行线性拟合, 结果如图 4 所示。其拟合结果为:

$$\gamma_F = -1.6 + 14.3 \times S_e, \quad (6)$$

$$\gamma_B = 0.2 + 11.7 \times S_e, \quad (7)$$

式 (6) 和 (7) 中的 S_e 分别表示 O^{2+} 离子在碳膜出射表面、入射表面的电子能损, 单位为 keV/nm, S_e 前面的系数的误差分别为 0.6, 0.9(nm/keV)(e^- /ion), 截距的误差分别为 0.2, 0.1 e^- /ion。由于势能沉积主要发生在入射表面^[13], 使得势能电子发射主要发生在入射表面, 而出射表面忽略势能电子发射的贡献。式 (6) 的第 1 项为负值, 说明只有在能损大于某一个阈值的时候才能在出射表面发射电子, 计算可知阈值约为 0.1 keV/nm, 对应的 O^{2+} 离子能量为 0.2 keV/u。在此近似认为前向、后向电子发射的电子能损阈值相同, 结合之前得到的电子能损阈值和式 (7) 粗略地估计 O^{2+} 离子在入射表面的势能电子发射产额大约为 1 e^- /ion。文献 [14] 中讨论了势能对电子发射的贡献, 从其中的结论可以估计势能电子发射的值大约为 0.9 e^- /ion, 和本文粗略估计的值相近。拟合式 (6) 中 S_e 前面的比例系数大于式 (7) 中的系数, 说明了同样的电子能损引起的电子发射在前向较多, 这主要是由于引起电子发射的离子的动量分布是集中在前向的。

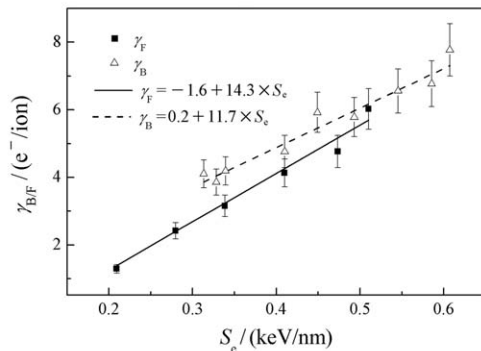


图 4 前向、后向电子发射产额 $\gamma_{F/B}$ 分别和 O^{2+} 离子在碳膜出射、入射表面的电子能损 S_e 的关系

4 结论

实验研究发现, 离子束流强度对前向、后向电子发射产额几乎没有影响。通过对 O^{2+} 入射 109.6 nm 碳膜实验数据的拟合, 得到了前向、后向电子

发射产额分别和离子在出射表面、入射表面的电子能损的线性比例关系, 其比例系数分别为 14.3 ± 0.6 (nm/keV) (e^- /ion), 11.7 ± 0.9 (nm/keV) (e^- /ion)。进一步分析发现引起后向电子发射的动能阈值大约为 0.2 keV/u, 在此基础上粗略估计了势能电子发射产额约为 $1 e^-$ /ion。

致谢 本实验是在中国科学院近代物理研究所 320 kV-ECR 离子源的全体工作人员的大力协助下完成的, 特此向他们表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] ZHAO Yongtao, XIAO Guoqing, XU Zhongfeng, *et al.* Acta Phys Sin, 2007, **56**(10): 5734. (in Chinese)
(赵永涛, 肖国青, 徐忠锋, 等. 物理学报, 2007, **56**(10): 5734)
- [2] WANG Yuyu, SUN Jianrong, ZHAO Yongtao, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2013, **317**: 33.
- [3] WANG Xing, ZHAO Yongtao, CHENG Rui, *et al.* Acta Phys Sin, 2012, **61**(19): 193201.
- [4] LI Dehui, ZHAO Yongtao, WANG Yuyu, *et al.* J Atom Mole Phys, 2008, **25**(4): 777. (in Chinese)
(李德慧, 赵永涛, 王瑜玉, 等. 原子与分子物理学报, 2008, **25**(4): 777.)
- [5] RITZAU S M, BARAGIOLA R A. Phys Rev B, 1998, **58**(5): 2529.
- [6] XIAO Guoqing. Nuclear Physics Review, 2000, **17**(3): 159. (in Chinese)
(肖国青. 原子核物理评论, 2000, **17**(3): 159.)
- [7] CLOUVAS A, POTIRIADIS C, ROTHARD H, *et al.* Phys Rev B, 1997, **55**(18): 12086.
- [8] JUNG M, ROTHARD H, GERVAIS B, *et al.* Phys Rev A, 1996, **54**(5): 4153.
- [9] ROTHARD H, CARABY C, CASSIMI A, *et al.* Phys Rev A, 1995, **51**(4): 3066.
- [10] ZHAO Yongtao, XIAO Guoqing, ZHANG Xiaohan, *et al.* J Atom Mole Phys, 2006, **23**(1): 23. (in Chinese)
(赵永涛, 肖国青, 张小安, 等. 原子与分子物理学报, 2006, **23**(1): 23.)
- [11] XIAO Guoqing, ZHAO Yongtao, ZHANG Xiaohan, *et al.* J Atom Mole Phys, 2006(Sup1): 176. (in Chinese)
(肖国青, 赵永涛, 张小安, 等. 原子与分子物理学报, 2006(增刊1): 176.)
- [12] ZIEGLER J F, ZIEGLER M D, BIRSACK J P. SRIM. [EB/OL]. [2012-08-01]. <http://www.srim.org>.
- [13] SCHOU J. Phys Rev B, 1980, **22**(5): 2141.
- [14] WANG Yuyu, ZHAO Yongtao, SUN Jianrong, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2011, **269**: 977.

Forward and Backward Secondary Electron Emission from Carbon Foils by O^{2+} Ion

YU Yang^{1, 2}, ZHAO Yongtao¹, WANG Yuyu¹, WANG Xing¹, CHENG Rui¹, ZHOU Xianming¹,
LI Yongfeng^{1, 2}, LIU Shidong^{1, 2}, LEI Yu¹, SUN Yuanbo¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We have measured the secondary electron emission yields in forward and backward directions from the carbon foils, which are penetrated by O^{2+} ion of the energy form 1.9 to 11.3 keV/u. In the experiment, the role of electronic energy loss and ion beam intensity in forward and backward electron emission yields have been systematically studied by changing the projectile ion energy and ion beam intensity. The results show that, forward and backward electron emission yields are approximately proportional to the electron energy loss at the exit surfaces and entrance surfaces respectively, and they are independent of the ion beam intensity. Further analyses show that, the kinetic energy threshold for the backward electron emission is about 0.2 keV/u, where the electron emission yield due to the potential energy deposition was roughly $1 e^-$ /ion in the experiment.

Key words: electron emission; electronic energy loss; ion beam intensity

Received date: 27 Mar. 2013; **Revised date:** 18 Apr. 2013

Foundation item: National Basic Research Program of China(973 Program) (2010CB832902); National Natural Science Foundation of China(11075192, 11105192, 11275241, 11275238, 11205225)

Corresponding author: ZHAO Yongtao, E-mail: zhaoyt@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>