

高电荷态离子 $^{207}\text{Pb}^{q+}$ ($24 \leq q \leq 36$) 与 Si(110) 固体表面作用的电子发射研究*

王瑜玉^{1)†} 赵永涛^{1)‡} 肖国青¹⁾ 房燕^{1)‡} 张小安¹⁾ 王铁山³⁾ 王释伟³⁾ 彭海波³⁾

1) 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100039)

3) 兰州大学物理学院, 兰州 730000)

(2005 年 4 月 22 日收到, 2005 年 7 月 4 日收到修改稿)

报道了利用兰州重离子加速器国家实验室 ECR 源引出的高电荷态离子 $^{207}\text{Pb}^{q+}$ ($24 \leq q \leq 36$) 入射到 Si(110) 表面产生的电子发射的实验测量结果. 结果表明, 高电荷态离子与固体表面相互作用产生的电子发射产额 Y 与入射离子的电荷态 q 、入射角度 ψ 和入射能量 E 都有很强的关联. 首次发现, 电子发射产额 Y 与入射角度 ψ 间有接近 $1/\tan\psi$ 的关系. 理论分析认为, 这些过程与基于经典过垒模型的势能电子发射过程密切相关.

关键词: 高电荷态离子, 经典过垒模型, 电子发射产额

PACC: 3400, 3450D

1. 引 言

高电荷态离子与固体表面相互作用的研究是近年来广受关注的热点研究领域之一, 受到国际上许多著名实验室的高度重视. 根据经典过垒模型 (classical over-barrier model, COBM), 带有较高势能的高电荷态离子在接近固体表面的过程中, 当入射离子运动到某一临界距离时, 固体表面处于导带的电子会共振电离或共振转移到入射离子的高激发态, 形成空心原子. 空心原子通过自电离、俄歇过程等方式退激, 发射大量的电子和特征 X 射线, 并在 f_s 时间内将几十至几百 keV 的势能沉积在 nm 空间尺度范围内, 在固体表面形成 nm 量级蚀坑. 同时, 受入射离子产生的强库仑场势能在表层沉积的作用, 靶表层原子会被大量激发、离化和溅射. 这些研究对半导体芯片、纳米材料、太空耐高温材料、固体结构分析等方面的应用具有重要的意义^[1-5].

目前, 在粒子溅射产额这方面开展的工作涉及的范围很广, 入射离子的电荷态 q 从 1 到 92 (裸铀离子), 而样品材料包括金属、半导体和绝缘体. Delaunay 等^[6]研究了 N^{6+} 、 Ne^{7+} 、 Ar^{12+} 和 Kr^{11+} 入射到金属表面的总电子发射产额随电荷态和入射能量变

化的关系. Sporn 等^[7]利用低速离子 Ar^{q+} ($q < 9$) 入射到 SiO_2 表面, 发现粒子溅射产额与入射离子电荷态有很强的关联但与其动能的关联却很小. Stolterfoht 等^[8]用 Ar^{17+} 入射到 Si 表面, 通过测量 Si 表面发射的电子谱研究空心原子的形成机理和动力学特性.

本文报道了在兰州重离子加速器国家实验室电子回旋共振离子源 (ECRIS) 原子物理平台上, 用高电荷态离子 $^{207}\text{Pb}^{q+}$ ($24 \leq q \leq 36$) 作用于 Si(110) 固体表面产生电子发射的实验测量工作, 对电子发射产额随入射离子的电荷态、入射能量、入射角度变化的关系进行了较为系统深入的分析.

2. 实验装置与测量方法

实验装置示意图如图 1 所示. 高电荷态离子 $^{207}\text{Pb}^{q+}$ 由 14.5GHz 电子共振离子源 (ECRIS) 提供, 束流在不同的电压下引出, 经过螺线管聚束器, 利用 90° 偏转分析磁铁将选定电荷态的离子引入原子物理平台, 然后经过四级透镜和光阑的聚焦准直, 进入内部具有电磁屏蔽的超高真空 (约 10^{-6} Pa) 靶室, 与样品表面相互作用.

在本实验中, 入射束流的束斑面积控制在

* 国家自然科学基金 (批准号: 10405025, 10475035) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wanyuyu@impcas.ac.cn

0.5mm × 1mm 范围,目的是减弱入射束流的强度(epA 量级),束流以入射角度 ψ 作用于固体样品表面,束流方向和探测器接收方向不变,通过转动样品方向来改变入射束流与表面作用的角度,入射角度 ψ 可以从 10° 变化到 90° .

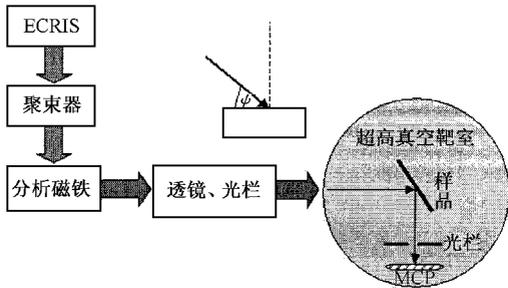


图1 兰州重离子国家实验室(ECRIS)原子物理平台示意图

入射离子 $^{207}\text{Pb}^{q+}$ 与 $\text{Si}(110)$ 固体表面相互作用所产生的电子用微通道板(MCP)探测器进行观测.微通道板接收方向与束流垂直,其中心与束流在同一水平面上.在微通道板前面(接收角方向上)放置一条大小约 1mm 宽的限束光阑,这样就缩小了电子的接收区域,立体角约为 2.5×10^{-5} sr. 接收区域的电子发射产额定义为单个入射离子在有效接收区域上发射的电子产额

$$Y = \frac{N_e}{N_i} \approx \frac{N_e}{Q/q}, \quad (1)$$

其中 N_e 为收集到的电子数, N_i 为入射的离子数, Q 为累积电荷量(束流强度对时间的积分), q 为入射离子的电荷态.

由于全截面的电子电量比入射束流在样品表面累积的电荷量少三个数量级,可以忽略电子发射对入射束流强度的影响.实验测量误差主要为系统误差,大小不超过 5%.

3. 实验结果与讨论

我们观测了入射能量为 $E = 440$ keV,不同电荷态的 $^{207}\text{Pb}^{q+}$ ($q = 24, 27, 33$) 离子作用于 $\text{Si}(110)$ 表面产生的电子发射.实验发现,随着入射离子电荷态升高,接收区域的电子发射产额相应增加,而离子入射角度增大,接收区域的电子发射产额减小.为了更好地了解入射角度与产额的关系,我们作了产额与角度之间 $Y = \frac{A}{\tan\psi}$ (A 为拟合常数, ψ 为离子的入射角度)的拟合曲线,如图 2 所示,图中点为各电荷态的

实验数据点,线为各数据点的拟合曲线,可以看出产额与角度之间服从 $1/\tan\psi$ 的关系.

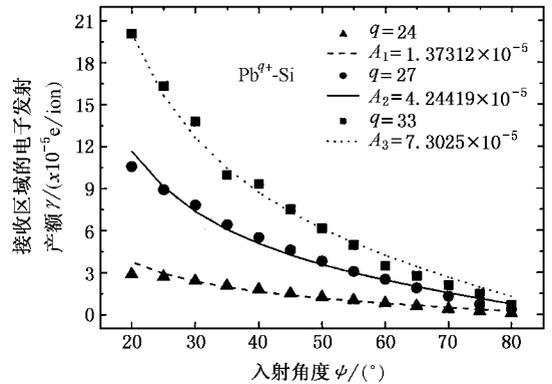


图2 入射角度、电荷态与接收区域的电子发射产额的关系(点为实验数据点,线为拟合曲线 $Y = \frac{A}{\tan\psi}$)

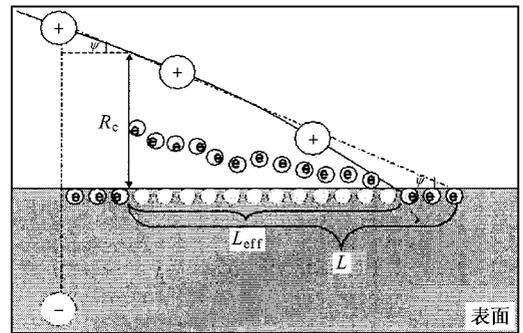


图3 基于经典过垒模型的势能电子发射过程简图

根据经典过垒模型,高电荷态离子趋近表面时,表面受到感应而发生极化,在表面内侧形成入射离子的镜像电荷(电量为 $-q$),镜像电荷加速入射离子向表面方向运动,使入射离子获得动能增益 ΔE .入射离子运动到临界距离 R_c 处时,表面电子开始共振电离.

$$R_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sqrt{8q+2}}{2W} \approx \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sqrt{2q}}{W}, \quad (2)$$

式中 q 是入射离子的电荷态, W 是靶材料的逸出功, e 是基本电荷电量, ϵ_0 是真空介电常数.

作为近似,我们把离子向表面垂直方向的加速运动当作匀速运动处理,垂直方向的速度增益由动能增益 ΔE 给出,可以得到

$$L_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2E}{m}} \cos\psi \frac{R_c}{\sqrt{\frac{2E}{m} \sin\psi + \sqrt{\frac{2\Delta E}{m}}}} \approx \frac{R_c}{\tan\psi} - \sqrt{\frac{\Delta E}{E}} \frac{1}{\tan\psi} \frac{1}{\sin\psi}, \quad (3)$$

上式的左边是对无穷小量 $\sqrt{\frac{\Delta E}{E}}$ 作展开,只取一阶近似.因为镜像电荷引起的动能增益($\Delta E \approx 10^2 \text{ eV}$)^[9]比入射离子的动能($E \approx 10^5 \text{ eV}$)小三个数量级. m 是入射离子的质量, ψ 是离子的入射角度.

在高电荷态离子与表面相互作用中,一般认为势能的影响远大于动能的影响.势能电子发射产额远大于其他过程(如俄歇电子发射过程、二次离子溅射过程等)所发射的粒子产额^[10];我们可以认为总的粒子发射产额近似等于势能电子发射产额,而正比于势能电子发射的有效距离,即

$$Y \propto \frac{R_c}{\tan \psi} - \sqrt{\frac{\Delta E}{E}} \frac{1}{\tan \psi} \frac{1}{\sin \psi}. \quad (4)$$

对同一电荷态的入射离子,临界距离 R_c 是常数, $\sqrt{\frac{\Delta E}{E}}$ 是个无穷小量,我们可以把(4)式中的第二项忽略,即 L 与 L_{eff} 之间的差异可忽略(图3),因此电子发射产额 Y 与入射角度 ψ 间有 $1/\tan \psi$ 的关系.此理论结果与实验结果符合得很好.

随着入射离子电荷态的升高,临界距离 R_c 增加,势能电子发射的有效距离 L_{eff} 增加;另外,随着入射离子的电荷态的升高,库仑势场急剧增强,发生多电子发射的概率也随之增加.因此,随着电荷态的升高,电子发射产额也会急剧增加.

图4给出了在同一电荷态($q=36$),不同入射能量($E=216, 288, 360 \text{ keV}$)下接收区域的电子发射产额与入射能量的关系.结果显示,在不同的入射角度($20^\circ \leq \psi \leq 40^\circ$)下,接收区域的电子发射产额与入射能量都有近似线性的关系,入射能量增大,产额增大.另一方面,随着入射角度的增大,产额增大的幅度趋缓.这一结果与 Lemell 等^[11]的实验结果是基本一致的.

我们分析认为,接收区域的电子发射产额随入射能量增加而增加主要是因为入射能量增加使入射轨迹更趋近于直线运动,相当于加长了势能电子发射的有效距离,使势能电子发射增加;此外,入射能

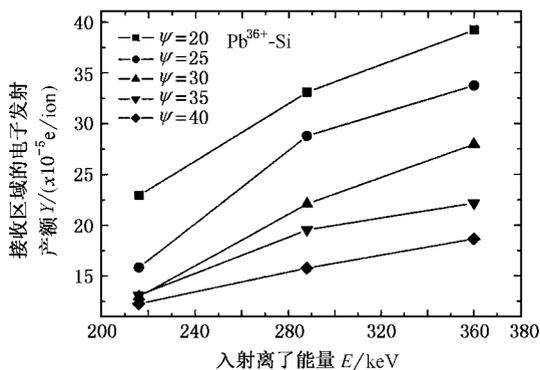


图4 入射能量与接收区域的电子发射产额的关系

量增加使入射离子与表面碰撞得更加剧烈从而可能发射出更多的电子.同时,小角度下,镜像加速对速度垂直分量的影响更大,因此小角度产额的变化更强烈.由(4)式也可以看出,随入射能量 E 的增加,产额 Y 增加.而入射角度 ψ 较小时,产额 Y 随能量 E 的变化幅度较大.这一理论结果与本实验以及相关实验结果相当符合.

4. 结 论

我们首次观测和分析了利用兰州重离子加速器国家实验室 ECR 源提供的高电荷态 $^{207}\text{Pb}^{q+}$ 离子与 Si(110)表面作用产生的电子发射.实验上,第一次发现了电子发射产额 Y 与入射角度 ψ 之间有接近 $1/\tan \psi$ 的关系;实验结果还表明,电子发射产额随入射离子动能和势能(电荷态)的增加而增加.理论上,第一次引入了基于经典过垒模型的势能电子发射机制,对上述实验结果进行较为深入细致的分析,并给出了理论公式,该公式与本次以及相关实验结果相当符合.

本实验是在兰州重离子加速器国家实验室 ECR 源全体工作人员和兰州大学部分学生的协助下完成的,特此向他们表示衷心的感谢.

- [1] Burgdorfer J, Lerner P, Meyer F W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5674
 [2] Zhao Y T, Zhang X A, Li F L et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2768 (in Chinese) 赵永涛、张小安、李福利等 2003 物理学报 **52** 2768
 [3] Zhang X A, Zhao Y T, Li F L et al 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1372

- [4] Aumayr F, Kurz H, Schneider D et al 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1943
 [5] Zhao Y T, Xiao G Q, Zhang X A et al 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 85 (in Chinese) 赵永涛、肖国青、张小安等 2005 物理学报 **54** 85

- [6] Delaunay M ,Fehringer M ,Geller R *et al* 1987 *Phys. Rev. B* **35** 4232
- [7] Spom M ,Libiseller G ,Neidhart T *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 9454
- [8] Stolterfoht N ,Bremer J H ,Muino R *et al* 1999 *Int. J. Mass Spectrom* **192** 425
- [9] Ducree J ,Casali F ,Thumm U *et al* 1998 *Phys. Rev. A* **57** 338
- [10] Winter H ,Aumayr F 1999 *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* **32** 70039
- [11] Lemell C ,Stockl J ,Burgdorfer J *et al* 1999 *Phys. Rev. A* **61** 012902

Electron emission induced by the interaction of highly charged ions $^{207}\text{Pb}^{q+}$ ($24 \leq q \leq 36$) with solid surface of $\text{Si}(110)^*$

Wang Yu-Yu^{1,2,†} Zhao Yong-Tao^{1,2)} Xiao Guo-Qing¹⁾ Fang Yan^{1,2)} Zhang Xiao-An¹⁾
Wang Tie-Shan³⁾ Wang Shi-Wei³⁾ Peng Hai-Bo³⁾

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

2) (*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences , Beijing 100039 , China*)

3) (*School of Physical Science and Technology , Lanzhou University , Lanzhou 730000 , China*)

(Received 22 April 2005 ; revised manuscript received 4 July 2005)

Abstract

The electron emission induced by highly charged ions $^{207}\text{Pb}^{q+}$ ($24 \leq q \leq 36$) interacting with $\text{Si}(110)$ surface is reported. The result shows that the electron emission yield Y has a strong dependence on the projectile charge state q , incidence angle ψ and impact energy E . In fitting the experimental data we found a nearly $1/\tan\psi$ dependence of Y . Theoretical analysis shows that these processes are closely related to the process of potential electron emission based on the classical over-the-barrier model.

Keywords : highly charged ion (HCl), classical over barrier mode (COBM), electron emission yield

PACC : 3400 , 3450D

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10405025 and 10475035).

† Corresponding author. E-mail : wangyuyu@impcas.ac.cn