

# 高电荷态离子 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 与 Si 表面作用中的电子发射产额<sup>\*</sup>

赵永涛<sup>1)†</sup> 肖国青<sup>1)</sup> 徐忠锋<sup>1)‡</sup> Abdul Qayyum<sup>3)</sup> 王瑜玉<sup>1)</sup> 张小安<sup>1)‡</sup> 李福利<sup>2)</sup> 詹文龙<sup>1)</sup>

1) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

2) (西安交通大学应用物理系, 西安 710049)

3) (核科学与技术研究所, 伊斯兰堡 44000, 巴基斯坦)

4) (咸阳师范学院物理系, 咸阳 712000)

(2007 年 1 月 10 日收到 2007 年 2 月 9 日收到修改稿)

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原子物理实验平台上, 用高电荷态 $^{40}\text{Ar}^{q+}$  ( $1 \leq q \leq 12$ ) 离子作用于半导体 Si 固体表面时的电子发射产额实验测量. 实验中, 通过改变炮弹离子的电荷态和引出电压选取其不同的势能和动能, 系统地研究了入射离子势能沉积和与其在固体中的电子能损对表面电子发射产额的贡献. 结果表明, 作为引起表面电子发射的两个主要因素, 单离子的电子发射产额与炮弹离子在固体表面的势能沉积和电子能损都有近似的正比关系.

关键词: 高电荷态离子, 势能沉积, 电子能损, 单离子产额

PACC: 3400, 3450D

## 1. 引 言

“高电荷态离子”是指核外电子高度剥离的重离子. 一方面, 高电荷态离子可以产生很强的库仑势场, 例如  $\text{U}^{91+}$  1s 态的库仑场强比氢原子 1s 态的库仑场强高 6 个量级, 为  $2 \times 10^{16}$  V/cm. 另一方面, 高电荷态离子具有非常高的势能, 该势能在数值上等于该离子电离能的总和. 例如,  $\text{Xe}^{54+}$  离子的势能就是将 Xe 原子核外 54 个电子全部电离所需要的总能量, 大约为 202 keV. 因此, 利用高电荷态离子与表面作用, 通过测量作用过程中的离子溅射, 电子发射以及光辐射等物理信息, 对于检验极端条件下量子电动力学, 研究高电荷态离子在固体表面的能损、等离子体物理、原子结构和能级寿命等方面具有重要的意义<sup>[1-6]</sup>.

高电荷态离子作用于固体表面时, 由于其强库仑势场的作用, 炮弹离子可以在 fs 时间尺度和 nm 空间尺度沉积几十甚至上百 keV 的势能, 从而使得作用区域形成瞬间等离子体, 而等离子体的电子阻

止本领要远远大于普通状态下物质的电子阻止本领, 因此高电荷态离子在固体中的能量损失要远大于单电荷态离子<sup>[6,7]</sup>. 研究表明, 与单电荷态离子相比, 高电荷态离子引起的离子溅射产额和电子发射产额分别增加 1 个和 3 个量级<sup>[6]</sup>. 实际上, 离子在固体中的能量损失包括核阻止能损, 电子阻止能损和势能能损等三个重要方面; 其中“电子阻止能损”与离子的势能沉积是诱发表面电子发射两个主要方面, 二者主要是通过对表面电子的俘获、激发、电离以及自身的 Auger 发射等非弹性过程而实现的. 如果用  $\gamma$  表示单离子的电子发射产额(单位: 电子每离子  $e/\text{ion}$ ), 这一论述可以表达为

$$\gamma = \chi(S_e) + \chi(E_p), \quad (1)$$

其中  $S_e$  表示电子阻止能损,  $E_p$  表示炮弹离子的势能. (1) 式中右边两项的物理意义很明确, 分别表示电子能损引起的电子发射和势能沉积所引起的电子发射. 在早期的研究工作中, 入射离子通常是低电荷态的离子, 因此势能沉积引起的电子发射产额经常被忽略, 式中第 1 项(动能项)通常可以由下式给出:

$$\chi(S_e) = BS_e/\cos(\alpha), \quad (2)$$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10405025, 10574132)和中国科学院科研启动专项资金资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zhaoyt@impcas.ac.cn

其中  $\alpha$  是炮弹离子入射角(离子入射方向与靶表面的夹角),系数  $B$  接近于常数(单位:  $\text{e} \cdot \text{atom} \cdot \text{ion}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ )随着原子序数和初动能的增加而略有减小<sup>[8]</sup>.

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)原子物理实验平台上,用高电荷态 $^{40}\text{Ar}^{q+}$  ( $1 \leq q \leq 12$ )离子作用于半导体 Si 固体表面时的电子发射产额.实验中,通过选取等动能和等势能的作用离子序列,系统地研究了入射离子动能和势能对表面电子发射的贡献.

## 2. 实验装置和测量方法

高电荷态离子 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 由兰州重离子加速器国家实验室 14.5 GHz 电子回旋共振离子源提供<sup>[9]</sup>.束流在不同的引出电压下引出,经过聚束器聚束,利用 90°分析磁铁将确定电荷态的离子引入到原子物理实验平台,然后经过四极透镜和光阑的聚焦准直,进入内部具有电磁屏蔽功能的超高真空(约  $10^{-6}$  Pa)靶室,以 90°垂直方向与样品表面相互作用.

在本实验中,作用束流的束斑直径可控制在 3 mm 范围以内,束流强度为 nA 量级.样品在实验前经过了表面净化处理,其纯度为 99.99% 以上,实验过程中,样品表面吸附的杂质可以被束流离子自动清除.

实验中,我们选了一个类似法拉第筒的装置,其原理示意图如图 1 所示.

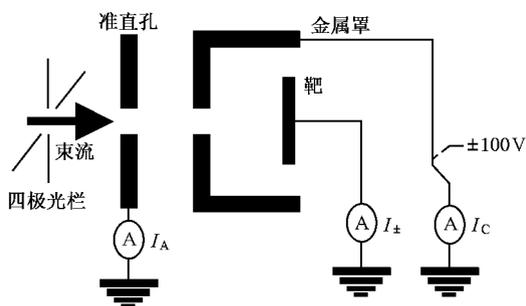


图 1 高电荷态离子与表面作用中电子发射产额测量实验方案示意图

荷能离子与固体表面作用过程中,会有大量的表面电子发射和离子溅射,然而单离子的电子发射产额相对于单离子的离子溅射产额大 2—3 个数量级,所以通常选用能够抑制电子发射的法拉第筒来记录离子束流的强度.当金属罩上加 100 V 左右的

负电压时,靶电流强度  $I_-$  可以近似的等于入射离子的电流强度  $I_i$ ,即

$$I_- = I_i. \quad (3)$$

这是因为离子与固体表面作用时,发射电子的能量只有很低的概率高于 100 eV,也就是说能量大于 100 eV 的电子不会对总的电子发射产额有可观的影响<sup>[7,8]</sup>.

当金属罩上加上正电压时,由于靶的良好接地,在静电场的作用下,发射的低能电子将会“全部”的飞向金属罩的内表面,这样测到的靶电流强度  $I_+$  将近似的等于入射离子的电流强度  $I_i$  与发射电子的电流强度  $I_e$  之和,即

$$I_+ = I_i + I_e = I_i + \gamma(I_i/q), \quad (4)$$

其中  $\gamma$  是单离子电子发射产额, $q$  是入射离子的电荷态.需要补充说明的是,如果不在金属罩上加正电压,发射的低能电子会在靶上瞬间正电累积形成的电场作用下,回到靶表面,从而造成发射电子统计不完全.另一方面,金属罩上也不宜加过高的正电压(如几百或上千伏特),因为高压形成的电场会增加表面电子的发射,从而导致电子产额测量值比实际值高.

根据(3)和(4)式,高电荷态离子作用于固体表面产生的电子用电子的发射产额  $\gamma$  可以由下式给出:

$$\gamma = \frac{I_e}{(I_i/q)} = q \frac{I_+ - I_-}{I_-}. \quad (5)$$

因此,只要我们在实验中测量了两种电压下的靶电流强度,就可以得出高电荷态离子与固体表面作用时的电子发射产额.

实验中只有  $I_+$  和  $I_-$  两个测量值,该值由束流积分仪读出,本文中其误差用多次测量的标准误差来代替.根据(5)式和误差传递公式,实验的测量误差可以由下式给出:

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\Delta I_+}{I_+} + \frac{\Delta I_-}{I_-}. \quad (6)$$

显然,当束流强度不稳定和流强绝对值较小时,电子发射产额的实验误差较大.

## 3. 实验结果与讨论

实验中我们首先考察了束流强度对单离子的电子发射产额  $\gamma$  的影响,结果发现,在实验所选取的束流强度范围内,测量得到的单离子电子发射产额是

稳定不变的.如图 2 所示,以 189 keV 的  $Ar^{9+}$  作用于 Si 靶表面为例,金属罩上未加电压时的靶电流强度  $I_0$  从 50 pA 至 350 pA 时,单离子的电子发射产额均在 12 e/ion 附近,误差为  $\pm 0.45$ ,相对误差约为 3.7%.

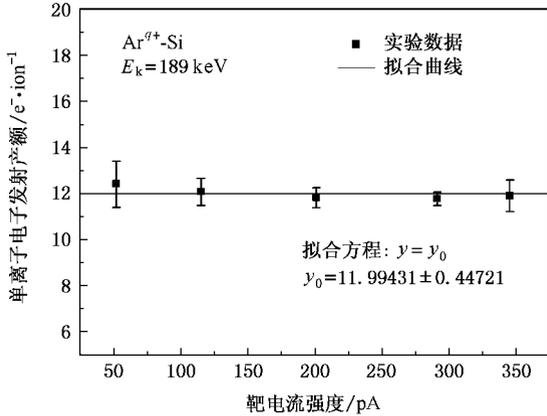


图 2 单离子电子发射产额  $\gamma$  与靶电流强度  $I_0$  的关系

在此基础上,我们测量了能量为 72 keV 电荷态从 3 到 12 的 Ar 离子与 Si 固体表面作用时的单离子电子发射产额,其结果如图 3 所示.图中方形点是实验测量的单离子电子发射产额,可以看出,随着入射离子电荷态的升高,相同能量的入射离子与固体表面作用时电子发射产额明显的增加.

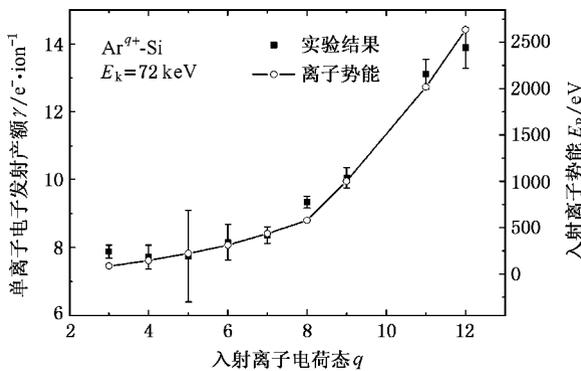


图 3 单离子电子发射产额和入射离子势能与入射离子电荷态的关系曲线

图 3 同时显示了炮弹离子势能和电荷态的关系,可以看出,电子发射产额与炮弹离子势能是直接相关的.为了更好的显示二者之间的关系,我们考察了单离子电子发射产额作为炮弹离子势能的函数,并对其进行了线性拟合,结果如图 4 所示.

对单离子电子发射产额与炮弹离子势能  $E_p$  进行线性拟和的结果是

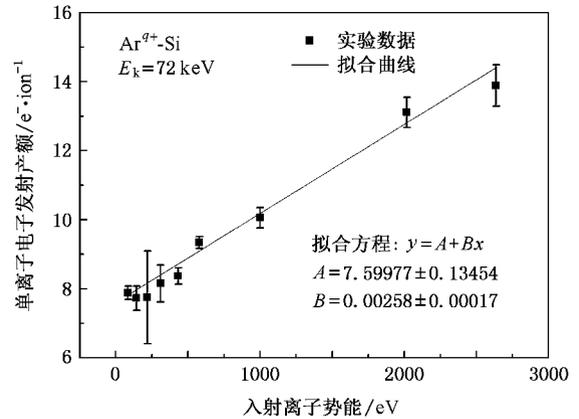


图 4 相同动能下单离子电子发射产额与入射离子势能的关系

$$\gamma = 7.60 + 2.58 \times E_k [\text{keV}]. \quad (7)$$

截距和线性系数的相对误差分别为 1.3% 和 6.6%.

对照 (1) 和 (5) 式,初步的物理解释是 (7) 式中第 1 项(截距)是电子能损引起的电子发射部分,而第 2 项是势能沉积引起的电子发射部分.可以看出,势能沉积引起的电子发射产额与炮弹离子的势能成正比,每增加 1 keV 势能,单离子电子发射产额增加 2.58 e/ion.

为了更加细致的研究 (7) 式中第 1 项,我们还需要考察同一电荷态不同动能情况下的单离子电子发射产额.然而,由于束流时间的限制,我们没有完成这项内容的研究.目前实验中我们仅考察了同一引出电压下,不同电荷态的 Ar 离子引起的表面电子发射产额,其结果如图 5 所示.

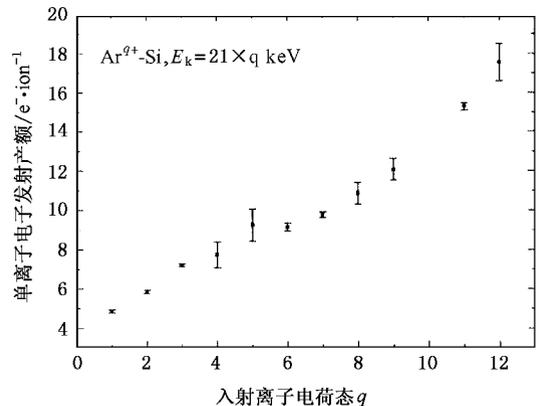


图 5 相同加速电压下单离子电子发射产额与入射离子电荷态的函数关系

依据对 (1) 式的物理分析,我们可以将势能影响扣除,从上述结果中提取出单纯由电子能损引起的

单离子电子发射产额,即

$$\chi(S_e) = \gamma - 2.58 \times E_i [\text{keV}]. \quad (8)$$

另外(2)式中系数  $B$  一直为同类实验研究所关注. 而  $B$  与离子速度相关, 实验中离子的入射角度  $\alpha$  始终不变, 所以, 我们可以用(8)式得到的结果除以对应离子动能下的电子能损来计算出相应的  $B$  值. 图 6 就是系数  $B$ , 即  $\chi(S_e)/S_e$  与炮弹离子动能关系曲线.

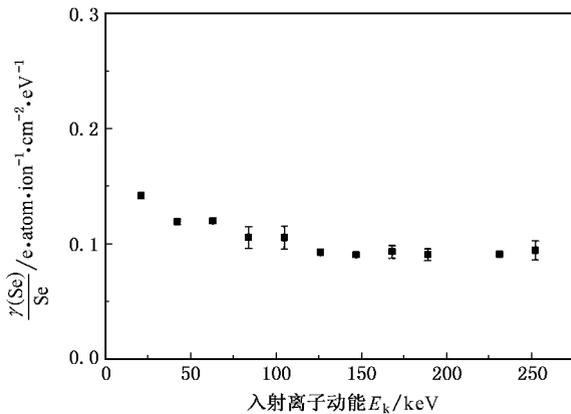


图 6 系数  $B$  与炮弹离子动能的函数关系

研究图 6 不难发现, 系数  $B$  随着入射离子动能的增加而减小, 而且减小的幅度趋向于平缓, 这一点与文献 5 的研究结论是一致的. 此外, 与文献 8 研究得出的  $B$  值相比, 本实验中得到的  $B$  值相近但明显略小一些, 这一结果正好在更大的原子序数范围里验证了  $B$  值随原子序数的增加而略有减小的实验结论.

## 4. 结 论

实验研究发现, 离子的束流强度对单离子电子发射产额几乎没有影响. 影响电子发射的因素主要有两个, 第一是炮弹离子在表面的势能沉积, 第二是炮弹离子在固体中的电子能损.

通过对等动能(等电子能损)炮弹离子序列实验数据的拟合, 得到了电子发射产额与入射离子势能的定量关系. 势能沉积对电子发射产额的贡献是随炮弹离子势能增加而线性增加的, 势能每增加 1 keV, 单离子电子发射产额增加 2.58 e/ion. 随着电荷态的升高, 离子的势能会急剧的增加, 因此对于低速高电荷态离子, 势能沉积引起的电子发射将会远大于电子能损引起的电子发射.

此外, 根据得到的上述定量关系, 扣除了入射离子势能对电子发射的贡献, 从而得到了单纯由动能引起的单离子电子发射产额与入射离子速度及入射离子在材料表面的电子能损的关系. 在电子能损引起的电子发射研究方面, 扩充了目前国际同行专家所取得的实验数据, 进一步验证了前人的推论, 即单电荷态离子的电子发射产额近似地正比于离子在固体中的电子能损. 随着炮弹离子原子序数和初动能的增加, 比例系数  $B$  有缓慢降低的趋势.

本实验是在兰州重离子加速器国家实验室 ECR 离子源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.

[1] Gillaspay J D 2001 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **34** R93  
 [2] Winter H, Aumayr F 1999 *J. Phys. B* **32** R39  
 [3] Zhao Y T, Li F L, Xiao G Q, Zhan W L, Yang Z H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2768 (in Chinese) [赵永涛、李福利、肖国青、詹文龙、杨治虎 2003 物理学报 **52** 2768]  
 [4] Zhao Y T, Xiao G Q, Zhang X A, Yang Z H, Chen X M, Li F L, Zhang Y P, Zhang H Q, Cui Y, Shao J X, Xu X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 85 (in Chinese) [赵永涛、肖国青、张小安、杨治虎、陈熙萌、李福利、张艳萍、张红强、崔莹、绍剑雄、徐徐 2005 物理学报 **54** 85]  
 [5] Zhao Y T, X G Q, Zhang X A 2006 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **245** 72

[6] Hoffmann D H, Weyrich K, Wahl H, Gardes D, Bimbot R, Fleurier C, 1999 *Phys. Rev. A* **42** 2313  
 [7] Aumayr F, Winter H P 2005 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **233** 111  
 [8] Ritzau S M, Baragiola R A 1998 *Phys. Res. B* **58** 2529  
 [9] Zhang Z M, Zhao H W, Zhang X Z, Guo X H, Li X X, Li J Y, Feng Y C, Wang H, Ma B H, Gao J Y, Cao Y, Sun L T, Ma L 2003 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **27** 914 (in Chinese) [张子民、赵红卫、张雪珍、郭小红、李锡霞、李锦宇、冯玉成、王辉、马保华、高级元、曹云、孙良亭、马雷 2003 高能物理与核物理 **27** 914]

# The electron emission yield induced by the interaction of highly charged argon ions with silicon surface<sup>\*</sup>

Zhao Yong-Tao<sup>1)†</sup> Xiao Guo-Qing<sup>1)</sup> Xu Zhong-Feng<sup>1)2)</sup> Abdul Qayyum<sup>3)</sup> Wang Yu-Yu<sup>1)</sup>  
Zhang Xiao-An<sup>1)4)</sup> Li Fu-Li<sup>2)</sup> Zhan Wen-Long<sup>1)</sup>

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

2) ( *Department of Applied Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China* )

3) ( *Institute of Nuclear Science and Technology, Islamabad 44000, Pakistan* )

4) ( *Department of Modern Physics, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China* )

( Received 10 January 2007 ; revised manuscript received 9 February 2007 )

## Abstract

The electron emission yield of the interaction of highly charged argon ions with silicon surface is reported. The experiment was done at the Atomic Physics Research Platform on the Electron Cyclotron Resonance ( ECR ) Ion Source of the National Laboratory HIRFL ( Heavy Ion Research Facility in Lanzhou ). In the experiment , the potential energy and kinetic energy was selected by varying the projectile charge states and extracting voltage , thus the contributions of the projectile potential energy deposition and electronic energy loss in the solid are extensively investigated. The results show that , the two main factors leading to surface electron emission , namely the potential energy deposition and the electronic energy loss , are both approximately proportional to the electron emission yield per ion.

**Keywords** : highly charged ions ( HCI ) , potential energy deposition , electronic energy loss , the electron yield per ion

**PACC** : 3400 , 3450D

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10405025 , 10574132 ) and the Special Foundation of Chinese Academy of Science for the Starting of Scientific Research.

<sup>†</sup> E-mail : zhaoyt@impcas.ac.cn