

反冲原子对低速离子轰击 Si 表面时电子 发射产额的影响^{*}

王建国¹⁾ 徐忠锋^{1)2)†} 赵永涛²⁾ 王瑜玉²⁾ 李德慧²⁾ 赵迪¹⁾²⁾ 肖国青²⁾

1) (西安交通大学应用物理系, 物质非平衡合成与调控教育部重点实验室, 西安 710049)

2) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2009 年 5 月 17 日收到; 2009 年 12 月 29 日收到修改稿)

在兰州重离子加速器国家实验室电子回旋共振离子源高电荷态原子物理实验平台上, 用低能 ($0.75 \text{ keV/u} \leq E_p/M_p \leq 10.5 \text{ keV/u}$, 即 $3.8 \times 10^5 \text{ m/s} \leq v_p \leq 1.42 \times 10^6 \text{ m/s}$) He^{2+} , O^{2+} 和 Ne^{2+} 离子束正入射到自清洁 Si 表面时二次电子发射产额的实验结果. 结果表明电子发射产额 γ 近似正比于入射离子动能 E_p/M_p . 在相同动能下, $\gamma(\text{O}) > \gamma(\text{Ne}) > \gamma(\text{He})$, 对于原子序数 Z_p 比较大的 O^{2+} 和 Ne^{2+} 离子, Z_p 大者反而 γ 小, 这与较高入射能量时的结果截然不同. 通过计算不同入射能量下入射离子的阻止能损 S , 发现反冲原子对激发二次电子的作用随入射离子能量的降低显著增大, 这正是导致在较低能量范围内二次电子发射产额与较高入射能量时存在差异的主要原因.

关键词: 低速高电荷态离子, 电子发射, 反冲原子, 阻止能损

PACC: 3450D, 7920N

1. 引 言

高电荷态离子 (highly charged ion, HCI) 入射到固体表面引起的电子发射研究具有重要的科学研究价值和广阔的应用前景, 并将服务于航天航空、能源等事业, 因而受到全世界众多著名实验室及科研人员的高度重视^[1-7]. 由于 HCI 入射到靶材料表面时, 在靶电子与入射粒子之间只有很小的动量传输, 入射离子的反向散射可以忽略, 因此研究 HCI 入射引起的电子发射比电子入射引起的电子发射可以更清楚地了解带电粒子与凝聚态物质的相互作用. 同时, 离子引起的电子发射可以很好地验证电子发射理论, 并且可以应用到许多领域, 如扫描电子显微镜, 各种利用俄歇、离子照相、二次电子进行的表面分析等. 因此电子发射的精确数据和简单快速估计电子发射与各参数的关系对于原子物理、核物理等的离子束实验, 特别是对于离子束材料加工和分析非常重要.

电子发射研究的一个很重要的方面就是统计电子发射产额 γ , 其定义为平均每个入射粒子所引

起的发射电子数量. 对于 HCI 与靶材料表面作用时的电子发射研究, 主要是用 HCI 轰击厚度大于离子及相关电子特征长度的靶材料, 并分析作用过程中的电子发射产额 γ 与入射粒子参数 (如入射速度 v_p , 入射角度 θ , 原子序数 Z_p , 电荷态 q 等) 及靶材料参数 (如靶原子的原子序数 Z_T 等) 的关系^[8-14]. 如 Rothard 等人^[8] 在 $15 \text{ keV/u} < E_p/M_p < 600 \text{ keV/u}$ (E_p 为入射离子动能, M_p 为入射离子质量) 的能量范围内研究了电子发射产额 γ 与 Z_p , Z_T 和阻止能损 S 等的依赖关系. 其研究结果称电子发射产额 γ 正比于入射离子动能, 且相同动能下, γ 随着 Z_p 的增加而增加.

本文工作的主要目的在于研究低速高电荷态离子 (SHCI) (入射离子速度 $v_p \leq 1.42 \times 10^6 \text{ m/s}$, 即低于第一玻尔速度 $2.19 \times 10^6 \text{ m/s}$) 正入射到 Si 表面时的电子发射产额, 以期揭示其与较高能量离子入射时的异同.

2. 电子发射产额的测量

实验采用的低速离子束 He^{2+} , O^{2+} 和 Ne^{2+} 由兰

^{*} 国家自然科学基金 (批准号 11075125, 10805063) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zhfxu@mail.xjtu.edu.cn

州重离子加速器国家实验室的 14.5 GHz 电子回旋共振 (ECR) 离子源提供, 许多关于高电荷态离子与表面相互作用方面的实验都是基于该实验平台开展的^[15-18]. 图 1 为实验中测量电子产额的装置示意图. 离子束 (束电流约为几十 nA) 经过狭缝为 20 mm × 3 mm 的准直光栏, 然后穿过口径为 10 mm × 5 mm 的金属罩 (cage), 最后垂直入射到自清洁的 Si 靶表面上, 靶材料表面尺寸为 19 mm × 24 mm.

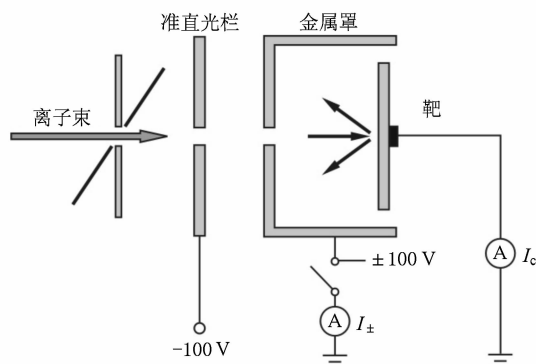


图 1 电子发射产额测量装置示意图

实验中靶室里的真空度保持在 10^{-8} mbar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$) 数量级以上, 离子束通过多个狭缝的校准, 可以使得未接入偏压时 cage 上的电流 I_e 几乎为零, 即离子束可以直接进入 cage 和靶表面作用而不轰击在 cage 上.

我们知道, 低速离子作用在固体表面而发射的二次电子能量几乎都在 15 eV 以下, 高于 50 eV 的二次电子发射截面很低^[12,13]; 另一方面, 平均每个入射的低速离子在固体表面引起的二次离子 (区别于入射离子) 溅射一般在 10^{-3} 数量级, 相比束流自身和发射的二次电子所带的电量可以忽略. 基于以上两点, 可以利用如图 1 所示的装置测量和研究低速离子在固体表面的二次电子发射产额: 当 cage 上加 100 V 负电压时, 几乎所有的发射电子都被所加的负电压抑制并返回到靶材料表面, 靶电流 I_- 近似等于离子束电流 I_{beam} , 即 $I_- = I_{\text{beam}}$; 而当 cage 上加 100 V 正电压时, 几乎所有发射电子都被 cage 收集, 靶电流 I_+ 近似等于离子束电流 I_{beam} 与二次电子引起电流 I_e 之和. 即有

$$I_+ = I_{\text{beam}} + I_e = I_{\text{beam}} + \gamma(I_{\text{beam}}/q), \quad (1)$$

式中 q 是入射离子的电荷态. 因此, 电子发射产额可以表示为

$$\gamma = \frac{I_+ - I_-}{I_-} q, \quad (2)$$

需要指出的是, 在实验测量开始前, 通过测量不同靶电流下的电子产额来确保实验中能够得到稳定的电子产额. 对于同一种类的入射离子, 当靶电流为几百 pA 至 nA 时, 实验中得到的单离子电子发射产额在 4% 的实验误差内是一个常量.

3. 结果与讨论

3.1. 电子发射产额

研究了 He^{2+} , O^{2+} 和 Ne^{2+} 离子正入射到 Si 表面时的电子发射产额 γ 与入射粒子动能 $E_p/M_p = v_p^2/2$ 的关系. 实验中, 入射离子的动能 $0.75 \text{ keV/u} \leq E_p/M_p \leq 10.5 \text{ keV/u}$, 相应的速度 $3.8 \times 10^5 \text{ m/s} \leq v_p \leq 1.42 \times 10^6 \text{ m/s}$, 这一速度低于第一玻尔速度, 但高于 Si 的动能电子发射阈值速度 $v_{\text{th}} = 1.87 \times 10^5 \text{ m/s}$ ^[19,20].

图 2 表明, 在我们实验的能量范围内, 电子发射产额 γ 随着入射离子动能的增加而增加, 且近似正比于 E_p/M_p ; 而在相同入射速度下, 原子序数 Z_p 较大的 Ne^{2+} 和 O^{2+} 离子引起的二次电子发射产额明显大于 Z_p 相比 Ne^{2+} 和 O^{2+} 小很多的 He^{2+} 离子入射时的电子产额. 这些结论与较高入射能量时得到的结论一致^[8].

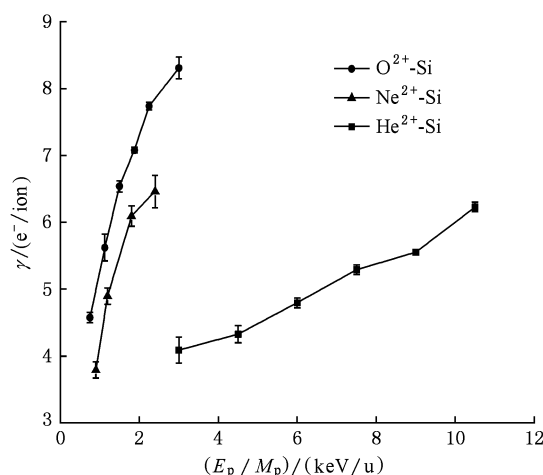


图 2 He^{2+} , O^{2+} 和 Ne^{2+} 正入射到 Si 表面的电子发射产额 γ 与入射离子动能 E_p/M_p 的关系

但是, 图 2 进一步表明, 对于 Ne^{2+} 和 O^{2+} 离子入射 Si 表面时, 有 $\gamma(\text{O}) > \gamma(\text{Ne})$, 这与较高入射能量时的结果截然不同^[8]. Rothard 等人^[8] 在实验上研究了较高能量下 ($E_p/M_p > 15 \text{ keV/u}$) $Z_p = 2$ 至

$Z_p = 54$ 的离子入射到固体表面引起的二次电子发射产额, 并指出: 相同入射速度下电子产额 γ 随着入射离子原子序数 Z_p 的增大而增加. 因为同样速度及相同电荷态下, 较重的离子有更重的原子核和更多的电子参与了碰撞, 对于较高入射能量时其合理性是显而易见的. 然而, 对于低于玻尔速度、原子质量与靶材相差不太远的离子, 反冲原子的作用明显增大, 为此我们同时引入了低速离子在固体表层中的阻止能损和反冲原子作用来研究和分析我们实验中出现的现象.

3.2. 阻止能损与反冲原子对电子发射产额的贡献

研究表明在一级近似的情况下, 对于同一靶材, 电子发射产额 γ 正比于入射粒子的阻止能损 S , 其可近似地表示为^[19,21,22]

$$\gamma = \beta AS, \quad (3)$$

式中 A 是靶材参数, 对于同一靶材近似为一常数; β 是与 M_T/M_p (M_T 为靶原子质量) 相关的无量纲比例系数; 阻止能损 S 包含电子能损 S_e 和核能损 S_n . 当 M_T/M_p 较大时, 计算产额就必须考虑反冲原子的作用^[22], 这时式(3)需改写为

$$\gamma = (\beta_p + \beta_r) AS, \quad (4)$$

式中 $\beta_p AS$ 和 $\beta_r AS$ 分别代表入射离子直接引起的电子发射产额和反冲原子所引起的电子发射产额.

根据文献[22], 低速离子入射到同一靶材料时, β_p 随 Z_p 的增大而增加, 对于 O^{2+} 和 Ne^{2+} 离子有 $\beta_p(Ne)$ 略大于 $\beta_p(O)$; 另一方面, 我们利用 TRIM 2006^[23] 计算了 Ne^{q+} 和 O^{q+} 离子入射到 Si 表面的阻止能损 S , 结果显示 Ne 的总能损 $S(Ne)$ 大于 O 的总能损 $S(O)$, 即 $S(Ne) > S(O)$, 所以有 $\beta_p AS(Ne) > \beta_p AS(O)$. 由式(4)产额的两个组成部分可知, 我们实验得出的 $\gamma(O) > \gamma(Ne)$ 的结果应该是反冲原子部分, 即 $\beta_r AS$ 所引起的.

考虑炮弹离子 O^{2+} 和 Ne^{2+} 的原子质量与 Si 原子质量的比值, O^{2+} 和 Ne^{2+} 入射到 Si 表面时, $\beta_r(O)$ 和 $\beta_r(Ne)$ 分别近似地取 0.3 和 0.25^[24]. 我们计算了阻止能损 S 随入射离子动能的变化关系, 图 3 所示为 $\beta_r S$ 的计算结果. 从图 3 中可以看到, 在我们研究的能量范围内, 尽管 $S(O) < S(Ne)$, 但 $\beta_r S(O) > \beta_r S(Ne)$, 即由反冲原子引起的二次电子发射产额有如下关系: $\beta_r AS(O) > \beta_r AS(Ne)$ (因 A 是靶材参数). 这正是导致我们测量结果中 $\gamma(O) > \gamma(Ne)$ 的原因, 同时也表明此时反冲原子所引起的电子发

射是二次电子发射的主要因素.

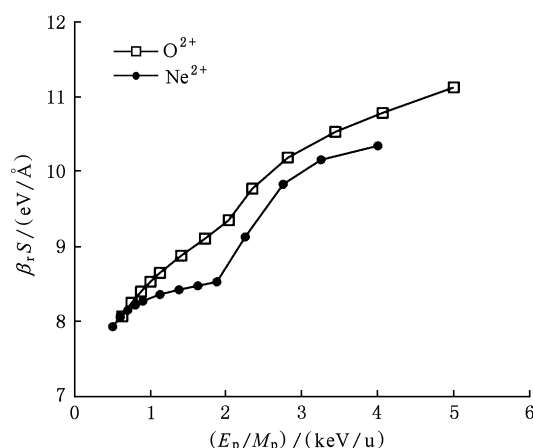


图 3 O^{2+} 和 Ne^{2+} 入射到 Si 表面时 $\beta_r S$ 与入射粒子动能 E_p/M_p 的关系

另一方面, 荷电离子与材料表面作用时, 二次电子发射产额随表面能量沉积的增加而增大. 我们利用 Schou 等人^[22] 对入射离子及反冲原子能量沉积的讨论, 并结合 Edgeworth 展开^[25] 计算了不同入射能量情况下, 反冲原子引起的能量沉积占总能量沉积的比重. 计算结果表明其随入射能量的增大而迅速减小, 在我们的能量范围内, 其值在 66% 至 35% 之间, 而当入射能量增大至 15 keV/u (Rothard 等人^[8] 研究的能量范围最小值) 时该比重就已减小至 10%^[22,25]. 因此, 在我们的入射能量范围内, 反冲原子的能量沉积较大, 相应的对二次电子发射产额的贡献也大. 这与我们的实验结果相符合.

随着入射能量增大, 离子在固体中的穿透深度也将迅速增加^[23], 而能够逃逸的二次电子几乎都集中在距靶表面约为 10 Å 的原子层内^[13]. 穿透深度的增加极大地抑制了反冲原子所激发的二次电子传输到表面并最终逃逸成为发射电子的概率. 因此, 在入射粒子能量较高时, $\beta_r S$ 的作用明显减小, 甚至可以忽略, $\beta_p S$ 将起主要作用. 如前所述, 由于 $\beta_p S(Ne) > \beta_p S(O)$, 所以, 能量较高时有 $\gamma(Ne) > \gamma(O)$, 这正是文献[8]中的结果.

4. 结 论

研究了低速 He^{2+} , O^{2+} 和 Ne^{2+} 离子束正入射到自清洁的 Si 表面时, 电子发射产额 γ 与入射离子动能 E_p/M_p , 原子序数 Z_p 和阻止能损 S 之间的关系.

研究发现 γ 随着入射离子动能的增大而增加,且近似正比于入射离子动能. γ 对 Z_p 的依赖关系为: O^{2+} 和 Ne^{2+} 离子入射时的电子产额比 He^{2+} 入射时的大得多,这与较高入射能量时所得到的结果一致^[8]. 但在我们的能量范围内,即 $E_p/M_p < 3$ keV/u 时,对于 O^{2+} 和 Ne^{2+} 离子, Z_p 大者电子产额 γ 反而小,即 $\gamma(O) > \gamma(Ne)$,表现出了与较高入射能量时截然不

同的变化趋势^[8]. 我们考虑了反冲原子对激发电子的作用,并计算了不同入射能量下相应入射离子的阻止能损,发现反冲原子对激发二次电子的作用随入射离子能量的降低显著增大,这正是导致低能和较高能量时, O^{2+} 和 Ne^{2+} 电子产额表现不同的主要原因.

-
- [1] Lucio O G, Gavin J, DuBois R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 243201
 - [2] Baragiola R A, Dukes C A 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 2547
 - [3] Kovacs D A, Peters T, Haake C, Schleberger M, Wucher A, Golczewski A, Aumayr F, Diesing D, 2008 *Phys. Rev. B* **77** 245432
 - [4] Bajales N, Cristina L, Mendoza S, Baragiola R A, Goldberg E C, Ferrón J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 227604
 - [5] Kudo M, Sakai Y 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3475
 - [6] Hu B T, Zhang H J, Zhang J, Song Y S, Wang L L, Chen C H, Gu J G 2007 *Chin. Phys.* **16** 2918
 - [7] Chen X M, Xi F Y, Qiu X Y, Shao J X, Xiao G Q, Cui Y, Sun G Z, Wang J, Chen Y F, Liu H P, Yin Y Z, Wang Y Y, Li D H, Lou F J, Wang X A, Xu J K, Zhou C L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1955
 - [8] Rothard H, Kroneberger K, Clouvas A, Veje E, Lorenzen P, Keller N, Kemmler J, Meckbach W, Groeneveld K O 1990 *Phys. Rev. A* **41** 2521
 - [9] Markin S N, Primetzhofner D, Prusa S, Brunmayr M, Kowarik G, Aumayr F, Bauer P 2008 *Phys. Rev. B* **78** 195122
 - [10] Stefanović I, Berndt J, Marić D, Šamara V, Radmilović-Radjenović M, Petrović Z L, Kovačević E, Winter J 2006 *Phys. Rev. E* **74** 026406
 - [11] Lederer S, Winter H, Lemell C, J. Burgdörfer 2005 *Phys. Rev. B* **72** 161402
 - [12] Linford L H 1935 *Phys. Rev.* **47** 279
 - [13] Hill A G, Buechner W W, Clark J S, Fisk J B 1939 *Phys. Rev.* **55** 463
 - [14] Bernhard T, Winter H 2009 *Phys. Rev. B* **79** 033411
 - [15] Xu Z F, Zhao Y T, Wang Y Y, Zhao D, Wang J G, Li D H, Qayyum A, Li F L, Xiao G Q 2008 *Chin. Phys. C* **32** 247
 - [16] Zhao Y T, Xiao G Q, Zhang X A, Yang Z H, Zhang Y P, Zhan W L, Chen X M, Li F L 2007 *Nucl. Instr. and Meth. B* **258** 121
 - [17] Zhao Y T, Xiao G Q, Xu Z F, Qayyum A, Wang Y Y, Zhang X A, Li F L, Zhan W L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5734 (in Chinese) [赵永涛、肖国青、徐忠锋、Abdul Qayyum、王瑜玉、张小安、李福利、詹文龙 2007 物理学报 **56** 5734]
 - [18] Wang Y Y, Zhao Y T, Xiao G Q, Fang Y, Zhang X A, Wang T S, Wang S W and Peng H B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 673 (in Chinese) [王瑜玉、赵永涛、肖国青、房燕、张小安、王铁山、王释伟、彭海波 2006 物理学报 **55** 673]
 - [19] Baragiola R A, Alonso E V, Florio A O 1979 *Phys. Rev. B* **19** 121
 - [20] Michaelson H B 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 4729
 - [21] Sternglass E J 1957 *Phys. Rev.* **108** 1
 - [22] Schou J 1980 *Phys. Rev. B* **22** 2141
 - [23] As determined with the simulation program package SRIM 2006 taken from <http://www.srim.org>
 - [24] Holmén G, Svensson B, Schou J, Sigmund P 1979 *Phys. Rev. B* **20** 2247
 - [25] Peter Sigmund 1969 *Phys. Rev.* **184** 383

Slow highly charged ions induced electron emission from clean Si surfaces^{*}

Wang Jian-Guo¹⁾ Xu Zhong-Feng^{1)2)†} Zhao Yong-Tao²⁾ Wang Yu-Yu²⁾ Li De-Hui²⁾
Zhao Di¹⁾²⁾ Xiao Guo-Qing²⁾

1) (Department of Applied Physics, MOE Key Laboratory for Non-equilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

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

(Received 17 May 2009; revised manuscript received 29 December 2009)

Abstract

The electron emission yields from the interaction of slow highly charged ions (SHCI) He^{2+} , O^{2+} and Ne^{2+} with clean Si surface are measured separately. It is found that electron emission yield γ increases proportionally to projectile kinetic energy E_p/M_p ranging from 0.75 keV/u to 10.5 keV/u (i. e. $3.8 \times 10^5 \text{ m/s} \leq v_p \leq 1.42 \times 10^6 \text{ m/s}$), and it is higher for heavy ions (O^{2+} and Ne^{2+}) than for light ion (He^{2+}). For O^{2+} and Ne^{2+} , γ increases with Z_p decreasing in our energy range, and it shows quite different from the result for higher projectile kinetic energy. After calculating the stopping power by using TRIM 2006, it is found that the fraction of secondary electrons induced by recoil atoms increases significantly at lower projectile energy, thereby leads to the differences in γ for heavy ions O^{2+} and Ne^{2+} between lower and higher projectile kinetic energy.

Keywords: slow highly charged ions, electron emission, recoil atom, stopping power

PACC: 3450D, 7920N

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11075125, 10805063).

[†] E-mail: zhfxu@mail.xjtu.edu.cn