

文章编号: 1007-4627(2022)02-0232-06

质子轰击钨靶表面时的电子发射产额与靶温度的相关性研究

曾利霞^{1,2}, 周贤明^{1,2}, 梅策香¹, 程锐³, 张小安^{1,3}, 徐忠锋²

(1. 咸阳师范学院与中国科学院近代物理研究所联合共建: 离子束与光物理实验室, 陕西 咸阳 712000;

2. 西安交通大学激光和粒子束科学与技术研究所, 西安 710049;

3. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 在中国科学院近代物理研究所兰州重离子加速器国家实验室测量了能量为 50~250 keV 的质子入射不同温度下钨靶表面的电子发射产额。实验结果发现, 不同能量的质子引起的电子发射产额均随着靶温度的升高而降低; 利用功函数对温度的依赖性定性地解释了该结果。在不同靶温度下, 总电子发射产额与电子能损的比值随着质子能量的增加而逐渐变小; 利用靶原子不同壳层中电子之间的电离竞争机制来解释实验结果。

关键词: 质子; 电子发射产额; 阈值速度; 功函数

中图分类号: O562.4

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.39.2022004

1 引言

离子与固体表面相互作用过程是研究天体等离子体、聚变等离子体等极端条件下原子物理过程的重要前沿和热点课题^[1-5]。二者相互作用过程中引起的电子发射可以很好地验证电子发射理论、能损以及能量沉积等物理机制, 并且可以应用到许多领域, 如固体表面分析、粒子探测器、离子在固体中的损伤研究以及径迹蚀刻等^[6-10]。电子发射研究的一个很重要的方法就是统计电子发射产额, 其值为每个入射离子所引起的电子发射数目的统计平均值。到目前为止, 大量的工作研究了入射离子参数(如入射角度、动能、势能、原子序数等)以及靶材料参数(如靶原子序数 Z_T 等)对离子与靶材表面作用过程中的电子发射产额的影响^[6-10]。文献[9]利用入射离子与靶作用过程中的能损分析了实验结果, 当入射离子的能量处于中低能区时, 核能损将会显著地影响离子在靶材表面的能量沉积; 在高中能区时, 随着入射离子能量的增加, 核能损迅速减小, 由核能损引起的电子发射产额将明显减小, 甚至可以忽略, 此时电子能损引起的电子发射产额占主导地位。在过去很长的时间里, 相关的研究主要集中在电子的激发机制和入射离子的转移特性, 而有关靶温度对电子发射产额的影响却只有少数的人在研究。然而靶材温度这一看似与入射离子关系

不太大的参数, 却对电子发射有着一定的影响作用。这是因为靶温度的变化导致靶材料的功函数发生变化, 使靶原子的运动(振动)过程受到影响, 从而导致特征长度发生改变。而且特征长度越长, 电子越容易被传输到表面, 最终逃逸出靶材表面, 成为发射电子^[10]。因此电子产额的温度效应这一长期被忽视的研究内容在近二十年来逐渐受到国际上一些著名的机构和专家的关注^[10-14]。Avilkina等^[10]研究了石墨为代表的碳基材料产额的温度效应, 发现产额会随温度增加表现出阶梯状的增加。Stacey等^[11]研究了不同靶温度下(25~200 °C)二次电子产额与入射电子剂量之间的关系, 还对比了不同温度下单晶金刚石和多晶金刚石的二次电子产额差异。Benka等^[12-13]测量了在 25~450 °C 的靶温度范围内离子轰击 Al、Cu 和 Ag 靶材的电子发射产额, 使用蒙特卡罗方法模拟电子发射的过程, 研究了电子发射产额对温度的依赖性。本论文也是针对这一领域开展的研究。我们选用目前具有应用潜质的钨(W)作为靶材。这是由于钨金属具有高熔点、高热导、低溅射、低氦滞留等优点, 被视为最有前景的等离子体壁候选材料, 例如在国际热核实验反应堆(ITER)中, 它被提议作为第一壁材料^[15]。但核聚变所生成的 α 粒子轰击壁材料时产生的二次电子将会混入聚变装置中的高温等离子体, 从而对其产生影响。因此, 分析离子入射钨靶时的电子发射产额特性对

收稿日期: 2022-01-06; 修改日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11605147, 11375138, 11505248); 陕西省自然科学基金资助项目(2019JQ-493, 2021JQ-812); 陕西省教育厅科研计划资助项目(20JK0975, 16JK1824); 陕西高校青年杰出人才支持计划项目; 咸阳师范学院“中青年拔尖人才”项目(XSYBJ202004); 咸阳师范学院“学术带头人”项目(XSYXSDT202109); 咸阳师范学院专项科研基金资助项目(XSYK19042, XSYK19043); 咸阳师范学院校级金课建设项目; 咸阳师范学院2020年课程思政示范课项目

作者简介: 曾利霞(1982-), 女, 山西大同人, 副教授, 博士, 从事原子与分子物理研究; E-mail: zenglixia1982@126.com

于研究高温等离子体和磁约束聚变壁材料性能具有一定的意义。

本论文将研究能量为 50~250 keV 的质子轰击钨靶表面时靶温度 (300~691 K) 对电子发射产额的影响, 利用温度对功函数的影响分析实验结果。此外, 分析并讨论在恒定的靶温度下, 电子发射产额对入射离子动能的依赖性。

2 实验装置和测量方法

在中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子综合实验平台 1 号终端完成了质子轰击钨靶表面时的电子发射产额测量实验, 该终端的详细介绍见文献 [5], 实验中所使用的质子是由 14.5 GHz 电子回旋共振离子源 (ECRIS) 提供, 束流由不同的引出电压引出, 之后进入 90° 的分析磁铁进行电荷态选择, 具有确定电荷态的离子经过加速管加速、四极铁聚焦和限束光阑准直后进入具有电磁屏蔽的超高真空球形靶室, 与样品表面相互作用, 大量的离子与固体表面的相互作用的实验在这里完成的 [5~9]。常温下离子与固体表面的相互作用过程中的电子发射产额测量的实验设备已经具备, 并被多次用于实验测量 [7~9]。本论文的关键是研究不同的靶温度下的电子发射产额, 结合上述实验平台的特点, 对原有靶架进行改造并安装了加热器, 实验装置如图 1 所示, 它由准直片 (Rejection aperture)、金属罩 (Cage)、靶架和加热器 (Heater) 四个主要部分组成。实验中装置放置在超高真空 (UHV) 球形靶室, 真空度约为 10^{-7} Pa。束流 (约为几十到几百 nA) 进入靶室之后, 经过准直片 (Rejection aperture) 和金属罩 (Cage) 上的孔, 最后垂直入射到靶上。准直片是一个穿透式法拉第筒, 孔径为 3 mm, 金属罩上的孔径为 5 mm, 钨靶表面为 10 mm×10 mm。实验前可以通过调整靶室外部的两个四极光阑使得束斑足够小, 使得未接入偏转电压时金属罩和准直片上的电流为零而靶上的电流最大, 从而保证束流在与靶材表面作用时不与准直片和金属罩发生碰撞。实验过程中, 在准直片上施加 -100 V 的抑制电极, 可以阻止电子从金属罩上的小孔逃逸, 从而进一步提高二次电子的收集效率。金属罩上施加 ±100 V 偏压是为了收集或抑制靶上发射的电子 [7~9]。当金属罩上加 -100 V 电压时, 几乎所有从靶材表面发射出来的电子都被所加的负电压抑制而无法到达金属罩, 此时靶电流 I 近似等于离子束电流 I_i ; 当金属罩上加 +100 V 电压时, 由于正电压的吸引, 金属罩几乎收集所有发射电子, 此时靶电流 I_+ 近似等于入射离子束电流 I_i 与二次电子引起的电流 I_e 之和。靶材的温度是用美国 HeatWave Labs 公司的型号为 101491

的 UHV 加热器来控制的, 温度的调控通过改变加热电压来实现, 最高加热温度为 800 °C 左右, 温度控制的误差不超过 2%。加热器与靶材之间的绝缘选用的是氧化铝陶瓷垫片来实现的。靶电流由 Keithley 6485 微电流计测量, 最小测量单位为 pA。样品进行机械抛光, 用丙酮和乙醇洗涤, 并在真空靶室加热消除杂质。

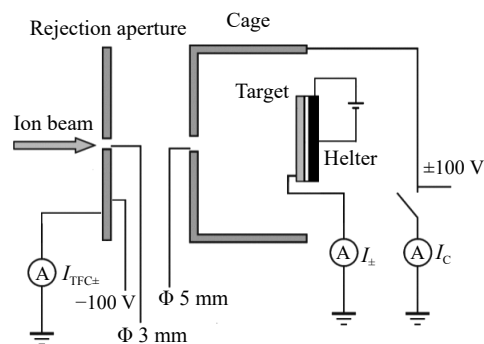


图1 电子发射产额测量实验装置示意图

入射离子与固体表面作用时产生的电子发射产额 γ 可以由下式 [7, 9] 给出

$$\gamma = \frac{I_+ - I_-}{I_-} q, \quad (1)$$

式中: q 为入射离子的电荷态, 在实验中是质子入射, 所以 $q=1$ 。由式 (1) 可知, 通过测量金属罩上分别施加 ±100 V 偏压时的靶电流强度 I_+ 和 I_- , 就可以计算出电子发射产额。测量的误差主要来自电子的反射和散射以及入射离子反射和溅射而产生的电子, 实验过程中可以通过多次测量取平均值降低这部分误差。实验的测量误差可以由下式给出

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

实验误差 ΔI_+ 和 ΔI_- 是多次测量的标准偏差。为了对束流进行实时监测, 在准直片上也连接了电流计, 通过电流计读出穿过法拉第筒的电流值 I_{TFC} , 该值为入射束流的强度。

3 实验结果与讨论

中国科学院近代物理研究所 14.5 GHz 电子回旋共振离子源的性能良好, 可以提供稳定性非常高的束流。在 150 keV 质子入射温度为 612 K 的 W 靶表面时电子发射产额测量的实验过程中, 金属罩上施加 ±100 V 偏压时, 电流计监测的入射束流强度 I_{TFC+} 和靶电流强度 I_+ 几乎为常数, 如图 2 所示。图中 I_{TFC+} 和 I_{TFC-} 分别对应于靶电流为 I_+ 和 I_- 时的入射质子束流强度。且多次测量不

同入射束流强度下的电子产额, 结果发现, 电子发射产额几乎不随着束流强度的变化而变化^[14]。

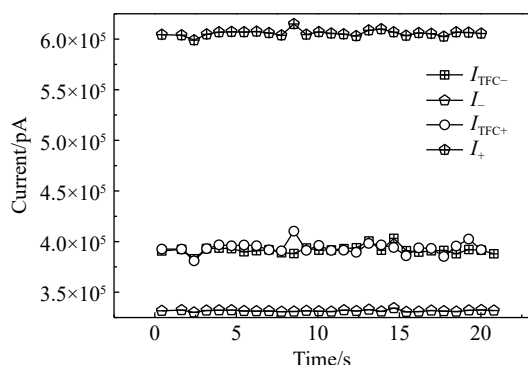


图 2 150 keV 质子入射温度为 612 K 的 W 靶表面时电流强度随时间的变化

图 3 显示了不同能量的质子入射 W 靶表面时电子产额随靶温度的变化关系, 结果显示, 电子发射产额均随着靶温度的升高而降低, 可以认为在测量的温度范围内 (300~691 K), 靶温度对电子发射有抑制作用。在这里, 我们将利用功函数讨论实验结果, 因为功函数这一决定阈值速度的物理量跟温度有关。功函数对温度依赖性是从 Hölzl 等^[16]的研究开始才逐渐被关注的。诸多科学工作者的研究发现, 功函数随温度的升高而升高^[17-18]。

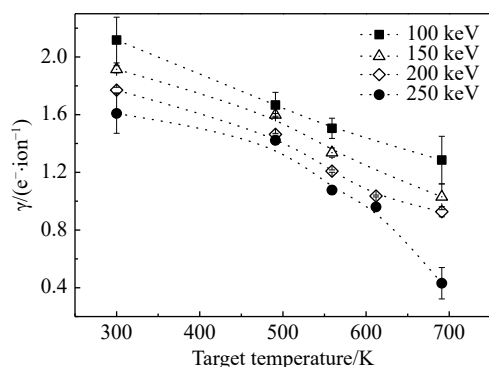


图 3 不同能量的质子入射 W 靶表面时电子产额随靶温度的变化

根据电子被激发的能量来源, 可以将电子发射分为势能电子发射 (Potential Electron Emission, PEE) 和动能电子发射 (Kinetic Electron Emission, KEE)。势能电子发射是由入射离子的势能沉积引起的, 主要是依靠入射离子中和或退激时释放出的势能使固体表面的电子激发并发射的过程。动能电子发射则依靠入射离子与固体表面碰撞过程中入射离子损失的动能来激发靶材中的电子, 而后被激发的二次电子在固体里传输, 一部分电子会传输到表面并越过表面极化势垒, 从而导致电子发射。与势能电子发射不同, 动能电子发射发生在离子与表面碰

撞时或碰撞之后, 且对于一般的动能电子发射, 需要离子碰撞表面时达到一个最小速度, 称之为动能电子发射经典阈值速度 v_{th} ^[19-20]。动能电子发射产额 γ_{KE} 与入射离子速度的关系如下:

$$\gamma_{KE} = k(v - v_{th})\Theta(v - v_{th}), \quad (3)$$

其中 $\Theta(v - v_{th})$ 是一个阶跃函数, 表明当入射离子的速度低于动能电子发射的阈值速度 v_{th} 时, 动能电子发射产额几乎为 0。Baragiola 等^[20]提出了一个被科研工作者广范使用的计算靶材料的动能电子发射阈值速度的公式, 即

$$v_{th} = \frac{v_F}{2}[(1 + W_\phi/E_F)^{1/2} - 1]. \quad (4)$$

它与靶材料的功函数 W_ϕ 、材料表面费米速度 v_F 以及材料表面费米能 E_F 有关。上式表明动能阈值速度 v_{th} 随着功函数 W_ϕ 的增加而增加。由式 (3) 可知, 当 $v > v_{th}$ 时, 动能电子发射产额 γ_{KE} 与 v_{th} 近似呈线性关系, 即

$$\gamma_{KE} = k(v - v_{th}), \quad (5)$$

表明在相同的入射速度 v 下, 动能电子发射产额 γ_{KE} 随着动能阈值 v_{th} 增大而线性减小。由式 (4) 和式 (5) 可知, 动能电子发射产额 γ_{KE} 随着功函数 W_ϕ 的增加而减小, 即 γ_{KE} 随着靶温度的升高而减小。

势能电子发射是入射离子所携带的势能与表面电子通过俄歇过程而产生的, 是由入射离子的势能沉积引起的, 发生在靶材料的表面以上和表面, 它对入射离子的动能没有阈值要求, 但要求携带的势能大于表面功函数的 2 倍^[21]。此处, 质子的第一电离能为 13.6 eV, 是钨的功函数 4.55 eV 的两倍以上。由势能沉积引起的最大可能电子数 n_{max} 可由下式给出

$$n_{max} = E_{pot}/2W_\phi, \quad (6)$$

式中: W_ϕ 是固体的最高占据态的结合能 (对于金属来讲, 该值等于金属的功函数); E_{pot} 是入射离子的势能。此处, n_{max} 约等于 1.5, 几乎等于 50 keV 入射能量时的总产额, 并且大于靶温度为 491 K 时 250 keV 质子入射能时的总产额。但是 n_{max} 只是理论上的势能电子发射产额最大值, 实际过程中不能实现, 只有很少一部分势能沉积用来发射势能电子, 很大一部分势能激发的电子不能逃离靶材表面。根据 Kishinevsky 等^[22]的研究结果, 势能电子发射产额 γ_{PE} 由下式给出

$$\gamma_{PE} \approx \frac{0.2}{E_F}(0.8E_{pot} - 2W_\phi), \quad (7)$$

式中 E_F 是材料表面费米能级。由式 (7) 可以看出, 势能电子发射产额 γ_{PE} 随着功函数 W_ϕ 的增加而降低。且根据

式(7)估算, 实验中的 γ_{PE} 大约等于0.08, 它只是总产额的很小一部分, 与 γ_{KE} 相比可以忽略不计。因此, 可以认为实验中的电子发射产额主要是动能电子发射的贡献, 也就是说总电子发射产额可以表示为

$$\gamma \approx \gamma_{KE} \quad (8)$$

表明总电子发射产额 γ 随着靶温度的升高而减小, 换言之, 靶温度对电子发射有抑制作用。

动能电子发射主要来源于价电子和内壳层电子的直接电离, 以及由于俄歇跃迁引起的外层电子的二次电离。直接电离与不同壳层中电子的电离截面直接相关。二次电离取决于内壳层电离截面、俄歇跃迁几率和二次电离截面。显然, 这比内壳层电子的直接电离要小得多。研究表明, 在低能轻离子入射动能电子发射过程中内壳层电离的作用可以忽略不计。这意味着内壳层电子的直接电离和继发的俄歇衰变引起的二次电子发射的贡献可以忽略。本文中, 电子发射主要来源于价电子的直接电离, 而 γ_{KE} 通常由下式给出:

$$\gamma_{KE} = \frac{BS_e}{\sin(\psi)}, \quad (9)$$

式中: S_e 是离子在靶材中的电子能损; 系数 B 一般认为是常数, 后面会分析其变化的原因; ψ 是离子入射角(离子入射方向与靶表面的夹角), 实验中离子垂直入射到靶材表面, 所以 $\sin(\psi) = 1$, 因此式(9)可以简化为

$$\gamma_{KE} = BS_e \quad (10)$$

使用SRIM软件^[23]计算了能损(Energy Loss), 并绘制了质子入射W靶的电子能损(Electronic Energy Loss, S_e)和总能损(Total Energy Loss, S_t)随入射能量的变化关系, 如图4所示。根据图4绘制了不同靶温度下电子发射产额 γ 与电子能损 S_e 之比, 即 B 值, 随入射能量的关系, 如图5所示。图5中 γ 是我们测量的实验值, 从图中可以发现, 随着靶温度的升高, B 值会减小, 通过前面的分析可知, 这是由于温度对电子发射的抑制作用造成的。此外, 在靶温度一定的情况下, 这个比值 B 并不是一个固定值, 它会随着质子能量的增加而略有下降。这里 B 值可以理解为单位电子能损引起的动能电子发射产额。在入射离子与靶原子相互作用的过程中, 入射离子的动能一方面可以传递给价电子而被激发, 产生电子发射; 另一方面, 入射离子的动能可以转移到内壳层电子, 使其电离并留下空穴, 空穴的退激发产生X射线。此时, 内外层电子之间的能量转移可能存在竞争关系^[7]。这里 B 值的变化趋势与单位能损下W原子外壳层(4f, 5d和6s)电子的电离截面 σ_i 随入射能量的变化趋势一致, 这些壳层的电离截面对电子发射产额起决定作用^[7]。

而与X射线产生截面密切相关的是M壳层的电离截面 σ_M , σ_M 随入射能量的变化趋势和 σ_i 随入射能量的变化趋势恰恰相反, 说明电子发射与X射线产生二者之间存在着竞争关系。而X射线的实验结果也证实了这一猜想^[7]。因此, 对于给定的碰撞, 入射离子的动能如果贡献于内壳层电子的电离, 则不会导致激发外层电子的离子, 反之亦然。此外, σ_M 约比 σ_i 小4~8个数量级, 这也验证了在我们研究的情况下, 内壳层电离引起的电子发射可以忽略, 发射的电子主要来自于被激发的价电子。

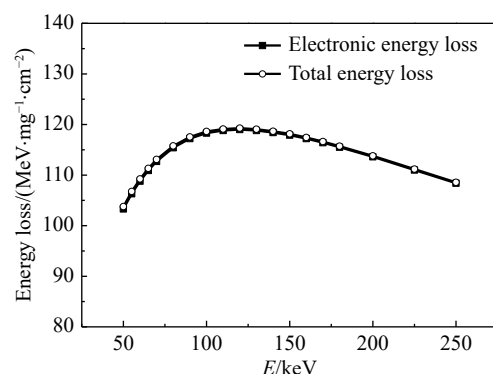


图4 质子入射W靶的电子能损和总能损随入射能量的变化关系

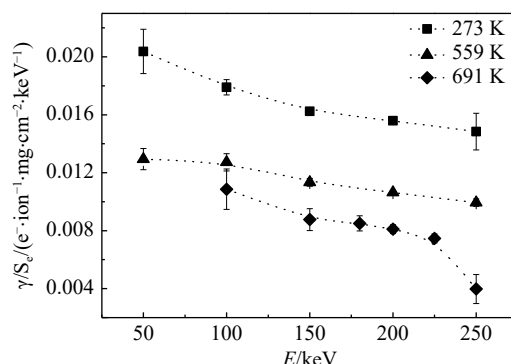


图5 不同靶温度下电子发射产额与电子能损之比随入射能量的变化关系

值得一提的是, 由于靶电子的费米分布对温度依赖性, 在足够高的靶材温度下, 会发生热电子发射, 发射电子流密度 J 的计算公式为

$$J = AT^2 \exp(-W_\phi/k_B T), \quad (11)$$

其中: A 为发射常数; W_ϕ 为功函数; k_B 为玻尔兹曼常数。由式(11)可知, 随着温度的升高热电子发射产额会增加, 这与我们的实验结果随着靶温度升高, 电子发射产额降低的规律恰恰相反, 所以热电子发射并不是造成我们实验结果的主要原因, 实验检测到的发射电子是由入射质子引起的电子发射, 且温度对功函数的影响是造成电子发射产额的温度效应的主要原因。

4 结论

本文利用能量为 50~250 keV 的质子入射不同温度下钨靶表面, 分析了不同能量的质子引起的电子发射产额随靶温度的变化规律, 利用功函数对温度的依赖性定性地解释了靶温度对电子发射的抑制作用。此外, 发现不同靶温度下电子发射产额与电子能损之比随质子能量的增加而逐渐变小, 这是由于内外层电子电离之间的竞争, 导致电子发射和 X 射线发射随入射离子能量的变化呈现相反的变化趋势。研究结果将为电子发射温度效应以及离子与磁约束聚变壁材料作用的电子发射和壁材料特性等研究提供重要的参考数据。

致谢 本实验是在兰州重离子加速器国家实验室等离子体小组的成员和 320 kV 实验平台的研究人员的鼎力相助下完成的, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] UHM H S, CHOI E H, CHO G S. *Applied Physics Letters*, 2009, 94: 031501.
- [2] WINTER H P, BURGDÖRFER J. *Slow Heavy-Particle Induced Electron Emission from Solid Surfaces*[M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 39.
- [3] ZHOU X M, WEI J, CHENG R, et al. *Chinese Physics B*, 2021, 30: 083201.
- [4] EDER H, MESSERSCHMIDT W, WINTER HP, et al. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87: 8198.
- [5] ZHOU X M, CHENG R, LEI Y, et al. *Nucl Instrs and Meth B*, 2015, 342: 133.
- [6] WANG Y Y, SUN J R, ZHAO Y T, et al. *Nucl Instrs and Meth B*, 2013, 317: 33.
- [7] ZHOU X M, ZENG L X, CHENG R, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2017, 406: 491.
- [8] XU Z F, ZENG L X, ZHAO Y T, et al. *Laser and Particle Beams*, 2012, 30: 319.
- [9] ZENG L X, XU Z F, ZHAO Y T, et al. *Laser and Particle Beams*, 2012, 30: 707.
- [10] AVILKINA V S, ANDRIANOVA N N, BORISOV A M, et al. *Nucl Instrs and Meth B*, 2011, 269: 995.
- [11] STACEY A, PRAWER S, RUBANOV S, et al. *Applied Physics Letters*, 2009, 95: 1860.
- [12] BENKA O, STEINBATZ M. *Nucl Instrs and Meth B*, 2003, 201: 396.
- [13] BENKA O, STEINBATZ M, SCHINNER A, et al. *Nucl Instrs and Meth B*, 2000, 164: 910.
- [14] ZENG L X, ZHOU X M, CHENG R, et al. *Scientific Reports*, 2017, 7: 6482.
- [15] GUO Shuangquan, GE Changchun, ZHOU Zhangjian, et al. *Materials Review*, 2010, 24: 93. (in Chinese)
(郭双全, 葛昌纯, 周张健, 等. *材料导报*, 2010, 24: 93.)
- [16] HÖLZL J, SCHULTE F K. *Springer Tracts in Modern Physics*, 1979, 85: 1.
- [17] KIM S K, KIM J S, HAN JY, et al. *Surface Science*, 2000, 453: 47.
- [18] SAITO S, MAEDA T, SOUMURA T. *Surface Science Letters*, 1984, 143: L421.
- [19] WINTER H, AUMAYR F, LEMELL C, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2007, 256: 455.
- [20] BARAGIOLA R A, ALONSO E V, FLORIO A O. *Physical Review B*, 1979, 19: 121.
- [21] STÖCKL J, SUTA T, DITROI F, et al. *Physical Review Letters*, 2004, 93: 263201.
- [22] KISHINEVSKY L M. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 1973, 19: 23.
- [23] SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter[EB/OL]. [2022-02-15]. <http://www.srim.org>.

Study on the Correlation Between Electron Emission Yield and Temperature of Tungsten Target Bombarded by H^+ Ion

ZENG Lixia^{1,2,1)}, ZHOU Xianming^{1,2}, MEI Cexiang¹, CHENG Rui³, ZHANG Xiaolan^{1,3}, XU Zhongfeng²

(1. Ion Beam and Optical Physical Joint Laboratory of Xianyang Normal University and Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Xianyang 712000, Shaanxi, China;

2. Institute of Science and Technology for Laser and Particle Beams, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The electron emission yield of protons with an energy range of 50~250 keV incident on tungsten surface of a target at different temperatures are measured on the 320 kV electron cyclotron resonance ion source(ECRIS) platform of the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science(IMP, CAS) in Lanzhou. It is shown that the electron emission yield induced by protons with different energies decreases with the increase of target temperature. The results were qualitatively explained by the temperature dependence of the work function. At different target temperatures, the ratio of total electron emission yield to electronic stopping power decreases with the increase of incident ion energy. The ionization competition between electrons in different shells of the target atom is used to explain the experimental results.

Key words: proton; electron emission yield; threshold velocity; work function

Received date: 06 Jan. 2022; **Revised date:** 14 Mar. 2022

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11605147, 11375138, 11505248); Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China(2019JQ-493, 2021JQ-812); Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (20JK0975, 16JK1824); Shaanxi University Young Outstanding Talents Support Program, the Xianyang Normal University Young and Middle-aged Top-notch Talents Project(XSYBJ202004); Academic Leader Project of Xianyang Normal University (XSYXSDT202109); Special Scientific Research Fund of Xianyang Normal University(XSYK19042, XSYK19043); Golden Class Construction Project of Xianyang Normal University, Xianyang Normal University 2020 Course Ideological and Political Demonstration Course Project

1) E-mail: zenglixia1982@126.com