

低速 Xe^{q+} ($4 \leq q \leq 20$) 离子与 Ni 表面碰撞中的光辐射

徐秋梅 杨治虎 郭义盼 刘会平 陈燕红 赵红贇

Visible light emission from surface of nickel bombarded by slow Xe^{q+} ($4 \leq q \leq 20$) ion

Xu Qiu-Mei Yang Zhi-Hu Guo Yi-Pan Liu Hui-Ping Chen Yan-Hong Zhao Hong-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 083201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172570

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172570>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电子碰撞 Ne 和类 Ne 离子电离的三重微分截面理论研究

Theoretical studies of triple differential cross sections for electron impact ionization with neon and neon-like ions

物理学报.2017, 66(20): 203401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.203401>

高能脉冲 C^{6+} 离子束激发 Ni 靶的 K 壳层 X 射线

K-shell X-ray emission from high energy pulsed C^{6+} ion beam impacting on Ni target

物理学报.2017, 66(14): 143401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.143401>

Eu 原子 $4f^7 6s n l$ Rydberg 态的研究

Study of Eu $4f^7 6s n l$ Rydberg states

物理学报.2017, 66(9): 093201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.093201>

He 原子体系中偶极子响应的周期性量子相位调控的理论研究

Theoretical study of the periodic quantum phase modulation of the dipole response in atomic He

物理学报.2015, 64(24): 243201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.243201>

低速 $^{84}Kr^{15+,17+}$ 离子轰击 GaAs 单晶

Slow ions $^{84}Kr^{15+,17+}$ bombardment on GaAs

物理学报.2014, 63(5): 053201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.053201>

低速 Xe^{q+} ($4 \leq q \leq 20$) 离子与 Ni 表面碰撞中的光辐射*

徐秋梅¹⁾²⁾ 杨治虎^{1)†} 郭义盼³⁾ 刘会平¹⁾ 陈燕红¹⁾ 赵红赟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)

3)(南京航空航天大学航天学院, 南京 210016)

(2017年12月2日收到; 2018年2月13日收到修改稿)

实验中测量了 $0.38V_{\text{Bohr}}$ (460 keV) 高电荷态 Xe^{q+} ($4 \leq q \leq 20$) 离子轰击高纯 Ni 表面发射的 400—510 nm 光谱. 实验结果包括 Ni I 原子谱线, Ni II 离子谱线, 以及入射离子中性化发射的 Xe I, Xe II 和 Xe III 谱线. 研究了谱线 Xe II 410.419, Xe III 430.444, Xe II 434.200, Xe II 486.254, Ni I 498.245, Ni I 501.697, Ni I 503.502, Ni I 505.061 和 Ni I 508.293 nm 的光子产额随着入射离子电荷态的变化. 结果表明, 入射离子中性化和溅射 Ni 原子发射谱线的光子产额随着入射离子电荷态的增加而增加, 其趋势与入射离子势能一致.

关键词: 高电荷态离子, 可见光谱, 光子产额, 势能

PACS: 32.30.Jc, 34.80.Dp, 79.20.Rf, 79.60.Bm

DOI: 10.7498/aps.67.20172570

1 引言

由于低速高电荷态的特性, 低速高电荷态离子与固体表面相互作用是一个非常复杂的多体过程^[1,2]. 低速是指入射离子的速度低于第一玻尔速度 ($V_{\text{Bohr}} = 2.16 \times 10^6$ m/s), 靶原子核外电子来得及对入射离子做出响应; 高电荷态离子携带大量的势能, 其势能等于所有剥离掉的电子电离能之和, 例如类氢 Xe 离子的势能为 161 keV; 其空间激发很强的电场, 例如类氢 U 离子, 电子所感受的电场为 10^{16} V/cm, 在宏观条件下这是任何一个实验室都难以达到的静电场. 入射离子大部分势能在飞秒时间内, 沉积在纳米尺度范围的靶内, 沉积能量密度可高达 10^{14} W/cm², 从而使靶原子激发, 受激靶原子退激将发出不同波段的光辐射^[3,4]. 在入射离子电荷态不太高时, 光辐射的跃迁速率比自电离和俄歇过程的速率小 6 个数量级^[5], 因此光辐射退激过程可以忽略. 光辐射速率随入射离子电荷数的 4 次

方增加^[6], 随着入射离子电荷态增高, 光辐射退激成为入射离子释放势能的一个重要过程^[7]. 目前光辐射研究较多集中在 X 射线发射, 关于紫外、可见和红外光辐射的研究较少. 另外, 低速高电荷态离子与固体表面相互作用过程中, 入射离子中性化是一种多电子俘获过程, 中性化原子形成中以及形成后的运动过程中, 通过自电离、俄歇过程和光辐射等方式退激^[8-10]. 低速高电荷态离子与固体表面相互作用过程中的光辐射研究, 对势能转移机制、势能激发靶原子的机理, 以及光谱性质与固体结构的关系十分重要, 而且也为原子复杂光谱线的研究提供了新的手段. 本文报道了低速高电荷态离子轰击金属 Ni 表面可见光发射的实验结果.

2 测量装置与方法

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上进行的. 平台上的电子回旋共振离子源^[11] 提供实验所需的 Xe^{q+} 离子,

* 国家自然科学基金联合重点基金 (批准号: U1732269) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: z.yang@impas.ac.cn

利用高压引出和加速, 经过四极磁铁输运到5号实验终端. 终端的测量装置布局如图1所示. 离子束经直径5 mm的光阑限束和准直后进入靶室, 利用靶后法拉第筒测量入射离子束流强度. 靶室真空度保持 5.5×10^{-9} mbar (1 mbar = 100 Pa), 以使得离子与表面干净的固体相互作用. 离子束进入高真空靶室, 以 45° 角(相对靶表面法线方向)入射到高纯Ni(99.995%)靶表面. 离子与固体表面作用产生的可见光经过焦距27 mm的光学透镜组聚焦到光谱仪的入射狭缝. 在与束流垂直的方向, 利用Acton SP-2558光栅光谱仪进行测量. 光谱仪采用1200 L/mm光栅, 其闪耀波长在500 nm. 光谱仪放置在三维可调的高精度支架上, 以便于精确调整光谱仪的位置, 提高光子收集效率. 实验前, 利用标准汞灯对谱仪进行了刻度和校准. 为了降低实验

中的本底噪声, 实验在暗室中进行. 为了降低光电倍增管的热噪声, 将其放在冷却室中, 冷却室的温度保持在 -25°C . 为了对谱线强度进行归一, 设计和加工了同步计数器^[12-14]. 在光谱仪测量光谱时, 计数器与数字电流积分器(ORTEC model 439)连接, 可以同步记录靶上束流强度. 实验中入射离子束流强度为200 nA, 光子产额定义为每入射一个离子发射的光子个数^[15-18], 公式如下:

$$Y_\lambda = N_\lambda / \left(\frac{I_t}{C \times e \times q} \right), \quad (1)$$

式中 Y_λ 和 N_λ 分别表示波长 λ 数据点处的光子产额和光子个数, I_t 是波长 λ 数据点处的靶上束流强度, q 是入射离子电荷数, e 是电子电量, 系数 $C = \bar{I}_t / \bar{I}_f$, \bar{I}_t 和 \bar{I}_f 分别表示相同条件下靶上束流强度的平均值和入射离子束流强度的平均值.

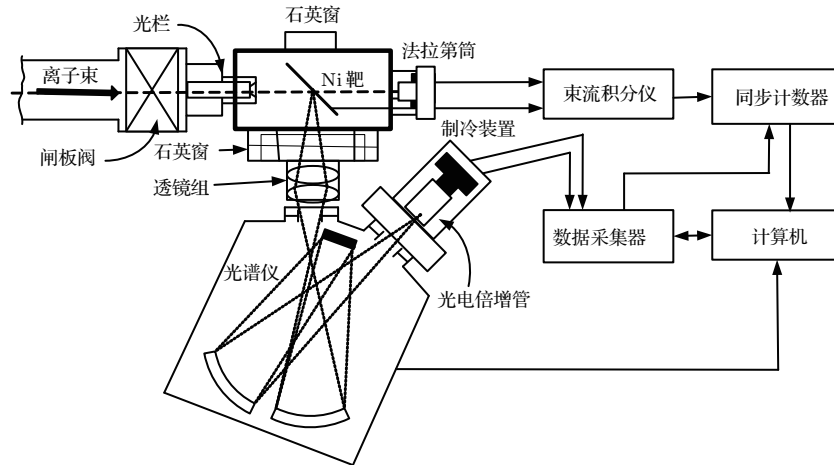


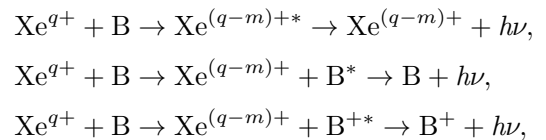
图1 高电荷态离子轰击固体表面发射光谱的测量装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of measurement apparatus for light emission from the solid surface bombarded by highly charged ion.

3 结果与讨论

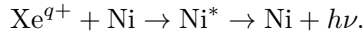
本文是低速高电荷态离子与金属表面相互作用的可见光发射研究, 区别于单电荷态离子与固体作用的光发射. 对于低速单电荷态离子入射, 主要是入射离子与靶原子的直接碰撞; 如果是快离子(能量量级为MeV/amu, 1 amu = 1.66×10^{-27} kg), 离子与固体碰撞的电子能量损失起主导作用, 可导致电子激发和电离. 对于低速高电荷态离子, 除了入射离子的动能外, 其还携带大量势能, 在与固体表面作用过程中势能在很短的时间内沉积在纳米尺度范围, 诱发靶表面原子激发和溅射. 激发态原子辐射退激发射可见光. 随着入射离子电荷态增高, 发射光谱的光子产额增加, 并且伴随入射

离子中性化原子(离子)的形成. 根据经典过垒模型^[8,10], 入射离子俘获电子进入高里德堡态, 随后通过光辐射等方式退激发. 低速高电荷态离子与金属表面碰撞导致光辐射的过程可以表示为:



这里 Xe^{q+} 为入射离子, B表示靶原子, $\text{Xe}^{(q-m)+*}$ 为激发态的Xe离子 ($m \leq q$, 当 $q = m$ 时为原子), B^* 表示激发态的靶原子, 上标*表示激发态, h 为普朗克常量, ν 为光子频率. 高电荷态 Xe^{q+} 离子入射到金属表面, 与靶原子发生碰撞, 通过能量转移使靶原子激发, 然后退激辐射光子. 同时, 高电荷态离子在俘获靶电子形成低价态的离子或原子过

程中, 会释放自身所携带的势能, 这些势能沉积在金属靶表面, 也会使靶原子激发, 然后退激辐射光子. 本实验中, 高电荷态 Xe^{q+} ($4 \leq q \leq 20$) 离子轰击 Ni 表面, 在动能和势能共同作用下由靶表面溅射出大量的处于激发态的 Ni 原子, 它们通过辐射光子退激, 这一过程可表示为



高电荷态离子实现单电子俘获的同时, 还有多电子俘获过程. 在这些过程中, 电子转移越多, 激发的靶原子的特征光谱线越复杂, 而且其强度越强. 另一方面, 高电荷态离子入射到金属表面, 金属表面对离子产生镜像加速, 引起能量增益 ΔE ^[10],

$$\Delta E = \frac{Wq^{3/2}}{4\sqrt{2}}.$$

增益的能量也沉积在靶表面, 加强了靶原子的激发 (W 为 Ni 的功函数), 靶原子的特征光谱线的强度表现为增强趋势. 因此, 入射离子的电荷态越高, 俘获靶表面电子的本领越强, 沉积在固体表面的能量会越高, 靶原子发射光谱强度越强. 也就是说, 低速高电荷态离子与金属表面相互作用过程中, 靶原子辐射光子产额与入射离子电荷态、以及入射离子势能沉积密切相关.

图 2 给出 $0.38V_{Bohr}$ Xe^{20+} 与金属 Ni 表面相互作用发射的在 400—510 nm 范围的光谱分布图, 包括动能和势能共同作用导致溅射 Ni 原子和 Ni 离子发射的谱线, 以及入射离子中性化形成的 Xe 原子或离子发射的谱线. 在实验中, 束流

面密度约为 $1 \mu A/cm^2$, 这足以通过溅射使得靶表面清洁, 同时, 靶室真空为 5.5×10^{-9} mbar, 这样的真空条件足以维持靶表面的干净^[19,20]. 因此, 入射离子与靶表面吸附气体相互作用可以被忽略. 在图 2 中, 溅射 Ni 原子和离子发射的谱线与 White 等^[21-27]的结果一致, 也与 NIST^[28]上报道的结果相符合. Ni 原子的基态为 $3d^8(3F)4s^2$, 本实验中形成的 Ni 原子激发态, 既包括了单电子激发形成的组态 $3d^8(3F)4s(4F)5s$, 也包括两个电子激发形成的组态 $3d^9(2D_{3/2,5/2})4d$, $3d^9(2D_{5/2})5s$, $3d^9(2D_{5/2})5d$ 和 $3d^9(2D_{5/2})6s$. 大多数谱线属于 Ni I $3d^8(3F)4s4p-3d^84s(4F)5s$ 和 Ni I $3d^9(2D)4p-3d^9(2D_{3/2})4d$ 跃迁. 对于 Ni II 402.329, Ni II 429.102 和 Ni II 462.983 的谱线, 属于 $3p^63d^9-3p^63d^8(3P)4s$ 跃迁. 二级谱线 Ni II 217.495, 属于 $3p^63d^8(3F)4s-3p^63d^8(3F)4p$ 跃迁. 激发态 Ni II 的形成是个双电子过程, 一个电子被电离, 同时另一个电子被激发. 与单电子激发过程相比, 这样的双电子过程发生的概率较小, 所以实验中仅测到 4 条 Ni II 谱线, 而测到丰富的 Ni I 谱线. 本文着重讨论低速高电荷态离子与金属 Ni 表面相互作用中溅射原子光谱和入射离子中性化光谱与电荷态(势能)的关联性. 选择图 2 中 Xe II 410.419 nm, Xe III 430.444 nm, Xe II 434.200 nm, Xe II 486.254 nm, Ni I 498.245 nm, Ni I 501.697 nm, Ni I 503.502 nm, Ni I 505.061 nm 和 Ni I 508.293 nm 谱线, 测量不同电荷态离子入射产生的光子产额.

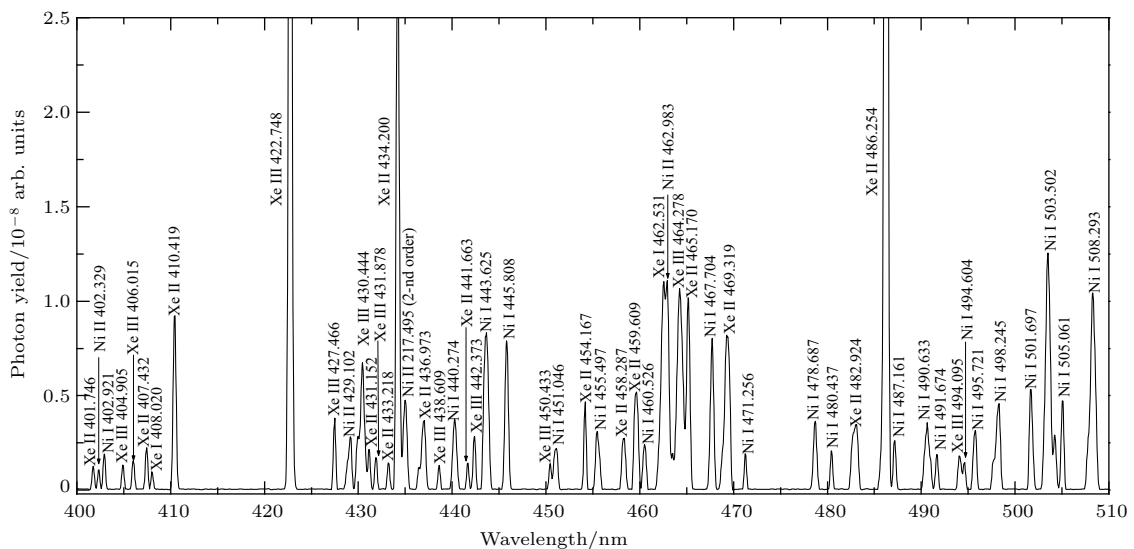


图 2 $0.38V_{Bohr}$ Xe^{20+} 与 Ni 表面相互作用发射的光谱图

Fig. 2. Optical emission from the interaction of $0.38V_{Bohr}$ Xe^{20+} ions with nickel surface.

利用单电荷态离子入射^[21,22], 几乎没有关于入射离子发射可见光波段的报道. 在高电荷态离子与金属作用过程中, 入射离子在可见光波段发射谱线的报道也很少^[29]. 图2包含了入射离子中性化发射的Xe I, Xe II 和Xe III 谱线. 根据Xe离子和Ni原子的质量比, 这些谱线不能来自于背散射的Xe离子. 根据经典过垒模型^[8,29,30], 当高电荷态Xe^{q+}离子与金属Ni表面的距离达到关键值 $d_c \approx \sqrt{2q}/W$ 时, 靶表面的电子会被共振俘获进入到入射离子的 $n_c \approx q/\sqrt{2W[1+(q-1/2)]/\sqrt{8q}}$ 轨道($q \gg 1$), 形成高激发态. 这里的 q 是入射离子的电荷数. 对于 $0.38 V_{Bohr}$ Xe²⁰⁺离子入射Ni表面($W_{Ni} \approx 5$ eV), d_c 和 n_c 分别为34 a.u.和21. 根据公式 $t = d_c/v$, 入射离子在距离 $d = d_c$ 和 $d = 0$ 的飞行时间间隔大约为1 fs. 对于相同速度的Xe^{4+,6+,15+,17+}离子入射, 其飞行时间间隔均小于1 fs. 对于研究的Xe I—III谱线对应能级

的辐射寿命从几个飞秒到几百个飞秒^[31–35]. 因此, 入射离子辐射可见光不能发生在离子与靶碰撞之前, 可以推测入射离子辐射可见光主要发生在靶的上表面. 另外, 电子被俘获进入第21壳层, 形成高激发态, 其向低能级级联退激的过程中, 可以形成电荷态 $q \leq 19$, 壳层 $n \leq 21$ 的多种跃迁, 由于受探测范围的限制, 实验仅测量400—510 nm波段范围内的谱线, 在这一波段范围主要是Xe原子和低价态Xe⁺和Xe²⁺离子发射的谱线. 为了研究入射离子发射谱线与电荷态(势能)的依赖关系, 利用相同速度、不同电荷态的Xe^{4+,6+,15+,17+,20+}离子分别与Ni表面作用, 研究谱线的光子产额随电荷态的变化. 图3—图6分别给出了谱线Xe II 410.419 nm, Xe III 430.444 nm, Xe II 434.200 nm和Xe II 486.254 nm的光子产额随入射离子电荷态的变化结果.

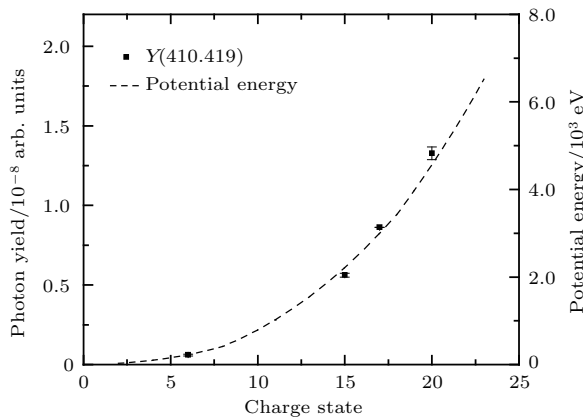


图3 谱线410.419 nm光子产额和势能随电荷态的变化
Fig. 3. Photon yield at 410.419 nm and potential energy vs. charge state of incident ion.

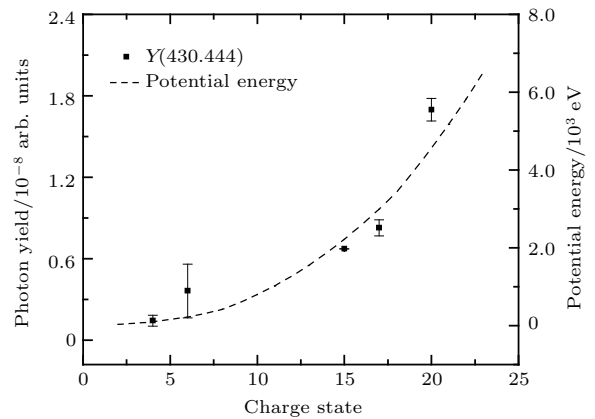


图4 谱线430.444 nm光子产额和势能随电荷态的变化
Fig. 4. Photon yield at 430.444 nm and potential energy vs. charge state of incident ion.

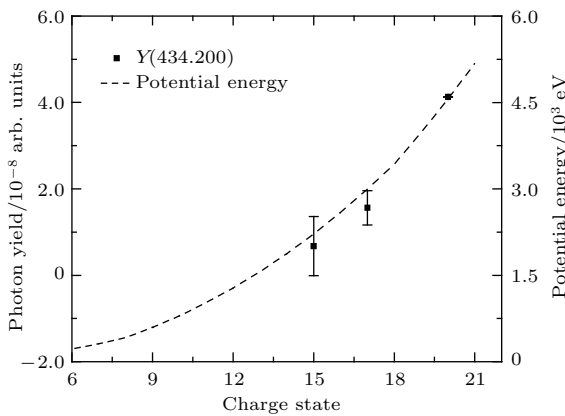


图5 谱线434.200 nm光子产额和势能随电荷态的变化
Fig. 5. Photon yield at 434.200 nm and potential energy vs. charge state of incident ion.

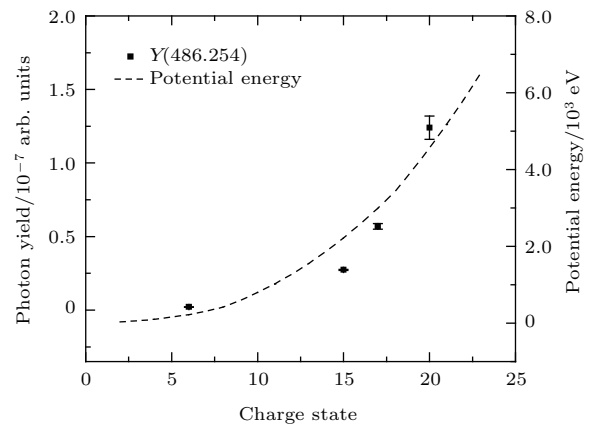


图6 谱线486.254 nm光子产额和势能随电荷态的变化
Fig. 6. Photon yield at 486.254 nm and potential energy vs. charge state of incident ion.

从图3—图6看出,入射离子中性化发射谱线的光子产额随着入射离子电荷态的增加而增加,与势能增加趋势基本一致.根据经典过垒模型^[29,30],相同速度的Xe^{4+,6+,15+,17+,20+}离子与金属Ni作用,入射离子电荷态越高,其作用距离越大,在作用距离 $d = d_c$ 和 $d = 0$ 之间飞行的时间越长,这会增加入射离子中性化辐射光的强度.另外,Xe^{4+,6+,15+,17+,20+}离子俘获Ni表面的电子分别进入 n_c 为5,7,15,17和21高激发态,较高电荷态的入射离子俘获电子进入较高的激发态,俘获较多的电子,这也会导致辐射光子数较多.所以,入射离子发射谱线的光子产额随着入射离子电荷态的增加而增加.在图3中,谱线Xe II 410.419 nm对应跃迁 $5p^4(^3P_2)5d^2[1]_{3/2} - 5p^4(^1D_2)6p^2[1]_{3/2}$,在电荷态4+时,入射离子俘获的第一个电子进入 n_c 为5的壳层,进一步俘获的电子进入更低的壳层,无法形成Xe⁺ $5p^4(^1D_2)6p$ 态,所以没有测量到谱线Xe II 410.419 nm;随着电荷态的增加,当电荷态6+时,谱线出现;随着电荷态进一步增加,光子产额增加.在图4中,谱线Xe III 430.444 nm对应跃迁 $5s^25p^3(^2D)5d^3D_3 - 5s^25p^3(^4S)4f^5F_3$,在电荷态 $4 \leq q \leq 20$ 的范围,都可以形成Xe²⁺ $5p^3(^4S)4f$ 态,均测量到此谱线,其光子产额随着电荷态增加而增加.在图5和图6中,在电荷态($q \leq 4$)较低时,由于Xe⁴⁺俘获的电子进入 $n_c = 5$ 的壳层,谱线Xe II 434.200 nm ($5p^4(^3P_1)6p^2[1]_{3/2} - 5p^4(^3P_2)8s^2[2]_{5/2}$)和Xe II 486.254 nm ($5p^4(^3P_2)6p^2[2]_{5/2} - 5p^4(^3P_2)7s^2[2]_{5/2}$)都没有观测到,当电荷态增加到6+时($n_c = 7$),较低激发态(Xe⁺ $7s$)产生的谱线Xe II 486.254 nm出现,依然没有观测到谱线Xe II 434.200 nm;随着电荷态进一步增加,当电荷态增加到15+时,谱线Xe II 434.200 nm出现,两条谱线均随电荷态的增加而增加.以上分析与经典过垒模型描述的电子俘获过程符合.

在Xe^{q+}离子靠近和进入Ni表面俘获电子的过程中,伴随着各种能量传递过程,这会导致Ni原子的激发和溅射,处于激发态的Ni原子退激辐射出可见光^[36].Tribble等^[37]认为靶原子发射的光子是包括了溅射靶原子和靶表面两个部分发射的.Postawa等^[38]通过电子和离子轰击碱金属卤化物靶的研究表明,重离子轰击固体发射的光子是由溅射原子发射的.如果Ni原子还在靶内,其辐射的光子的频率和离开靶的自由原子发射的光频率是

不同的,这与实验观测不符^[39].由于激发态原子较大,不能长时间存在于靶内,靶内激发态原子退激时,即使有光子发射出来,也会很快被临近的粒子吸收.所以,在Xe^{q+}离子与Ni表面作用过程中,靶原子发射的光子只能来源于溅射原子.当入射离子与靶表面作用时,其动能通过与靶核间的静电相互作用传给靶原子,引起靶原子的溅射,这一过程是动能溅射过程.在入射离子初动能为几百keV时,主要发生的是线性级联碰撞过程^[2].同时,高电荷态离子携带的势能沉积在金属表面,也会引起溅射.另外,研究表明当溅射原子离开靶表面较大距离时,发生电子隧穿(electron tunneling)过程形成靶原子激发态^[40-42],所以,高电荷态离子与金属表面作用过程中,靶原子激发态形成,是动能和势能协同作用的结果.

图2包括了丰富的Ni原子谱线.为了研究势能对溅射原子可见光发射的影响,利用相同速度,不同电荷态的Xe^{4+,6+,15+,17+,20+}离子分别与Ni表面作用,研究了溅射原子光子产额随入射离子电荷态的变化,图7—图11分别给出了谱线Ni I 498.245 nm, Ni I 501.697 nm, Ni I 503.502 nm, Ni I 505.061 nm和Ni I 508.293 nm的光子产额随入射离子电荷态变化的结果.

从图7—图11可见,溅射靶原子发射谱线的光子产额随着入射离子电荷态的增加而增加,与入射离子势能增加趋势一致.0.38 V_{Bohr} Xe^{4+,6+,15+,17+,20+}离子与Ni作用,入射Xe^{q+}离子的势能和动能都会导致靶原子的溅射和激发.在本次实验中,入射离子动能不变,入射离子势能从104 eV(对于Xe⁴⁺)增加到4561 eV(对于Xe²⁰⁺),

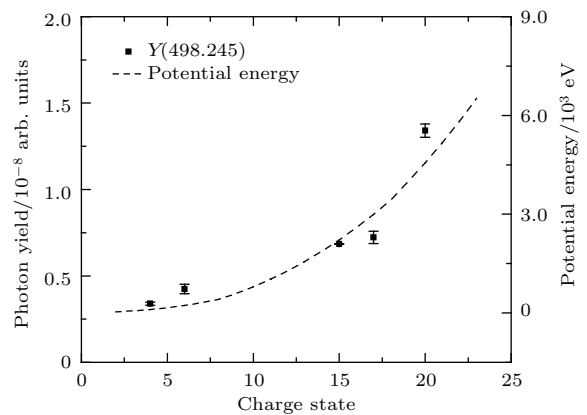


图7 谱线498.245 nm光子产额和势能随电荷态的变化
Fig. 7. Photon yield at 498.245 nm and potential energy vs. charge state of incident ion.

所以光子产额的增加是势能增加造成的 [43,44]. 在图3—图11中, 不同电荷态的离子入射时, 谱线的光子产额偏离势能曲线, 这是由于入射离子能量一定, 炮弹与靶材之间能量竞争, 以及靶材各个过

程, 包括形成不同激发态、靶原子溅射、二次离子发射、电子发射、X射线辐射等各个过程之间存在能量竞争导致的. 例如在电荷态20+时, 形成较少的激发态 Ni I 5s, 导致谱线 Ni I 501.697 nm (Ni I $3d^8(^3F)4s4p \rightarrow 3d^84s(^4F)5s$) 的光子产额低于势能曲线; 同时形成较多的激发态 Ni I 4d, 导致谱线 Ni I 503.502 nm (Ni I $3d^9(^2D)4p \rightarrow 3d^9(^2D_{3/2})4d$) 的光子产额高于势能曲线. 关于高电荷态 Xe^{q+} 离子与金属 Ni 表面之间复杂相互作用更加详尽的描述, 有待于进一步的研究.

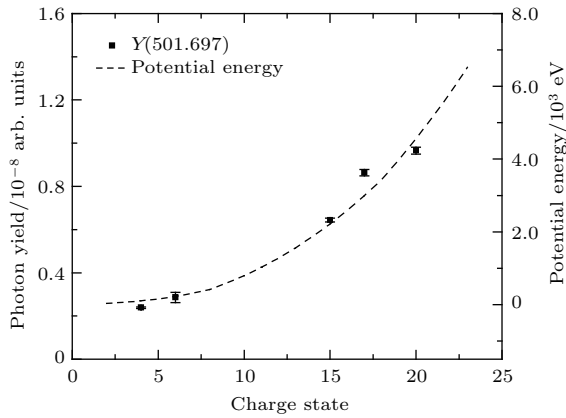


图8 谱线 501.697 nm 光子产额和势能随电荷态的变化
Fig. 8. Photon yield at 501.697 nm and potential energy vs. charge state of incident ion.

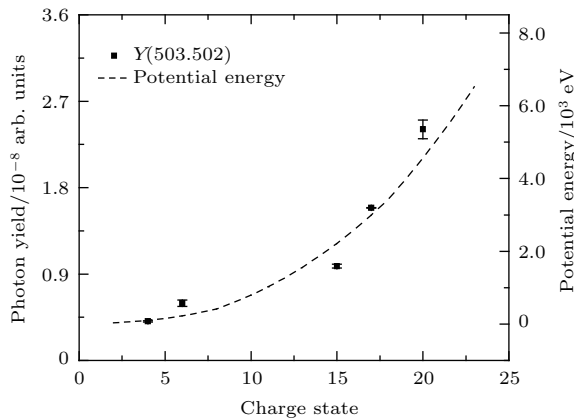


图9 谱线 503.502 nm 光子产额和势能随电荷态的变化
Fig. 9. Photon yield at 503.502 nm and potential energy vs. charge state of incident ion.

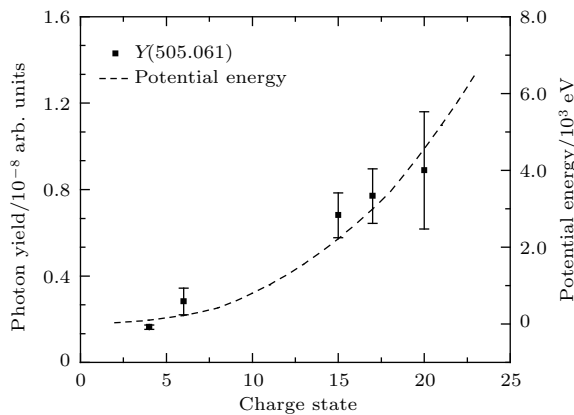


图10 谱线 505.061 nm 光子产额和势能随电荷态的变化
Fig. 10. Photon yield at 505.061 nm and potential energy vs. charge state of incident ion.

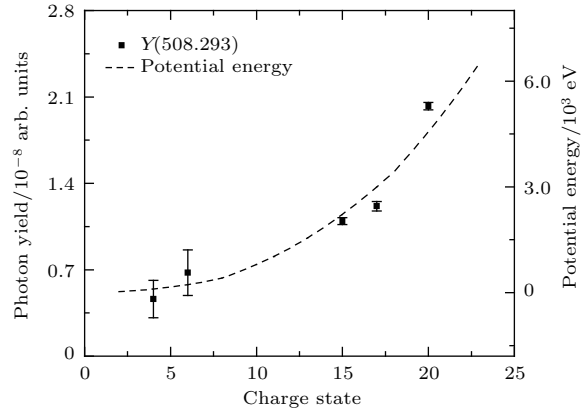


图11 谱线 508.293 nm 光子产额和势能随电荷态的变化
Fig. 11. Photon yield at 508.293 nm and potential energy vs. charge state of incident ion.

4 结 论

利用 $0.38 V_{Bohr}$ 高电荷态 $Xe^{4+,6+,15+,17+,20+}$ 离子与金属 Ni 表面相互作用, 研究了作用过程中溅射靶原子和离子谱线, 以及入射离子中性化后发射的谱线. 结果表明, 光子产额随着入射离子电荷态的增加而增加, 与势能增加趋势一致. 此结果有助于探究高电荷态离子在金属表面的电子俘获和势能沉积过程, 以及金属靶材对高电荷态离子入射的响应机制.

感谢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的运行人员提供束流.

参考文献

- [1] Schneider D H G, Briere M A 1996 *Phys. Scr.* **53** 228
- [2] Wang G H 1988 *Physics of Particle Interactions with Solids* (Part 1) (Beijing: Scientific Press) pp267–346 (in Chinese) [王广厚 1988 粒子同固体相互作用物理学(上册) (北京: 科学出版社) 第 267—346 页]
- [3] Burgdorfer J, Morgenstern R, Niehaus A 1986 *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **19** L507

- [4] Burgdorfer J, Reinhold C, Hagg L, Meyer F 1996 *Aust. J. Phys.* **49** 527
- [5] Winter H, Aumayr F 1999 *J. Phys. B* **32** R39
- [6] Bethe H A, Salpeter E E 1957 *Encyclopedia of Physics (Handbuch der Physik)* (Berlin, Heidelberg: Springer) pp334–409
- [7] Schenkel T, Barnes A V, Niedermayr T R, Hattass M, Newman M W, Machicoane G A, McDonald J W, Hamza A V, Schneider D H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4273
- [8] Burgdorfer J, Lerner P, Meyer F W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5674
- [9] Schenkel T, Hamza A V, Barnes A V, Schneider D H 1999 *Prog. Surf. Sci.* **61** 23
- [10] Lemell C, Winter H P, Aumayr F, Burgdorfer J, Meyer F 1996 *Phys. Rev. A* **53** 880
- [11] Sun L T, Zhao H W, Li J Y, Wang H, Ma B H, Zhang Z M, Zhang X Z, Guo X H, Shang Y, Li X X, Feng Y C, Zhu Y H, Wang P Z, Liu H P, Song M T, Ma X W, Zhan W L 2007 *Nucl. Instrum. Methods B* **263** 503
- [12] Zhao H, Su H, Xu Q, Guo Y, Kong J, Qian Y, Yang Z 2014 *J. Phys.: Conf. Ser.* **488** 142012
- [13] Roger K, Kerkdijk C B 1974 *Surf. Sci.* **46** 537
- [14] Wright R B, Gruen D M 1980 *Nucl. Instrum. Methods* **170** 577
- [15] Delaunay M, Fehring M, Geller R, Hitz D, Varga P, Winter H 1987 *Phys. Rev. B* **35** 4232
- [16] Della-Negra S, Depauw J, Joret H, Le Beyec Y, Schweikert E A 1988 *Phys. Rev. Lett.* **60** 948
- [17] Aumayr F, Kurz H, Schneider D, Briere M, McDonald J, Cunningham C, Winter H P 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1943
- [18] Krása J, Láska L, Stöckli M P, Fehrenbach C W 2002 *Nucl. Instrum. Methods B* **196** 61
- [19] Andersen N, Andersen B, Veje E 1982 *Radiat. Eff.* **60** 119
- [20] Braun M 1979 *Phys. Scr.* **19** 33
- [21] White C W, Tolk N H 1971 *Phys. Rev. Lett.* **26** 486
- [22] Ryabchikova T A, Landstreet J D, Gelbmann M J, Bolgova G T, Tsybmal V V, Weiss W W 1997 *Astron. Astrophys.* **327** 1137
- [23] Cowley C R, Mathys G 1998 *Astron. Astrophys.* **339** 165
- [24] Cowley C R, Hubrig S 2012 *Astron. Nachr. AN* **333** 34
- [25] Yong D, Brito A A, Costa G S D, Alonso-García J, Karakas A I, Pignatari M, Roederer I U, Aoki W, Fishlock C K, Grundahl F, Norris J E 2014 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **439** 2638
- [26] Carraro G, Villanova S, Monaco L, Beccari G, Ahumada J A, Boffin H M J 2014 *Astron. Astrophys.* **562** A39
- [27] Fuhr J R, Martin G A, Wlese W L, Younger S M 1981 *J. Phys. Chem. Ref.* **10** 305
- [28] <http://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD/lines1.pl>. [2018-1-20]
- [29] Morishita Y, Kanai Y, Ando K, Hutton R, Brage T, Torii H A, Komaki K, Masuda H, Ishii K, Rosmej F B, Yamazaki Y 2003 *Nucl. Instrum. Methods B* **205** 758
- [30] Lake R E, Pomeroy J M, Sosolik C E 2011 *Nucl. Instrum. Methods B* **269** 1199
- [31] Miller M H, Roig R A, Bengtson R D 1973 *Phys. Rev. A* **8** 480
- [32] Jimenez E, Campos J, Sanchezdel R C 1974 *J. Opt. Soc. Am.* **64** 1009
- [33] Coetzer F J, Westhuizen P 1980 *Z. Physik A* **294** 199
- [34] Pegg D J, Gaillard M L, Bingham C R, Carter H K, Mlekodaj R L 1982 *Nucl. Instrum. Methods* **202** 153
- [35] Das M B, Karmakar S 2005 *Eur. Phys. J. D* **32** 285
- [36] Suchanska M 1997 *Prog. Surf. Sci.* **54** 165
- [37] Tribble R E, Prior M H, Stokstad R G 1990 *Nucl. Instrum. Methods B* **44** 412
- [38] Postawa Z, Rutkowski J, Poradzisz A, Czuba P, Szymonski M 1986 *Nucl. Instrum. Methods B* **18** 574
- [39] Assad C, Liu W, Tribble R E 1991 *Nucl. Instrum. Methods B* **62** 201
- [40] Veje E 1983 *Phys. Rev. B* **28** 88
- [41] Veje E 1983 *Phys. Rev. B* **28** 5029
- [42] Veje E 1988 *Z. Phys. B: Condens. Matter* **70** 55
- [43] Takahashi S, Nagata K, Tona M, Sakurai M, Nakamura N, Yamada C, Ohtani S 2005 *Surf. Sci.* **593** 318
- [44] Makoto S, Kouji S, Takahiro M 2016 *J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **14** 1

Visible light emission from surface of nickel bombarded by slow Xe^{q+} ($4 \leq q \leq 20$) ion*

Xu Qiu-Mei¹⁾²⁾ Yang Zhi-Hu^{1)†} Guo Yi-Pan³⁾ Liu Hui-Ping¹⁾
Chen Yan-Hong¹⁾ Zhao Hong-Yun¹⁾

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

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(Received 2 December 2017; revised manuscript received 13 February 2018)

Abstract

Bombarded by slow highly charged ion (SHCI), particles including ions and atoms of metal are excited and ejected from the sample. Optical emission can be observed for the radiative de-excitation of some excited atomic particles. The important information about particle ejection and incident ion neutralization, as well as the nature, the kinetic energy, and the number of the sputtered excited particles can be obtained by studying the optical emission process. The optical emission from the collisions between slow ($V \sim 0.38V_{\text{Bohr}}$) highly charged Xe^{q+} ($4 \leq q \leq 20$) ions and high purity Ni (99.995%) surface is studied. The experiment is carried out at the 320 kV for multi-discipline research with HCIs in the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences. The spectral lines are analyzed by using an Sp-2558 spectrometer equipped with a pattern of 1200 groves/mm blazed at 500 nm and an R955 photomultiplier tube at the exit slit. The target beam current corresponding to the dwell time is recorded, which can be translated into the incident ion current. Based on the formula of $Y_{\lambda} = N_{\lambda} / \left(\frac{I_t}{C \times e \times q} \right)$, the spectral line intensity is normalized.

The normalized spectrum can be obtained from the interaction of $0.38V_{\text{Bohr}}$ Xe^{20+} ions with Ni surface in a wavelength range of 400–510 nm. The species at excited state can be identified by comparing the wavelengths of spectral lines with those in the standard spectroscopic table. Most of the observed spectral lines are identified as being from the electron transitions of Ni I $3d^9(^2D)4p-3d^9(^2D_{5/2})4d$, Ni I $3d^8(^3F)4s4p(^3P^{\circ})-3d^84s(^4F)5s$ and Ni II $3p^63d^9-3p^63d^8(^3P)4s$, as well as Xe I $5p^5(^2P^{\circ}_{3/2})6s-5p^5(^2P^{\circ}_{3/2})8p$, Xe II $5p^4(^3P_2)6p-5p^4(^3P_2)6d$ and Xe III $5s^25p^3(^2D)6s-5s^25p^3(^2D)6p$. Compared with the single charged ion, some neutralized incident ions yield Xe I, Xe II, Xe III spectral lines. The photon yields of spectral lines, such as Xe II 410.419, Xe III 430.444, Xe II 434.200, Xe II 486.254, Ni I 498.245, Ni I 501.697, Ni I 503.502, Ni I 505.061 and Ni I 508.293 nm, are presented each as a function of charge state of incident ion. The results show that the photon yield increases with the increase of the charge state, which is consistent with the potential energy of the incident ion. The potential energy is the driving force for photon emission of excited Ni atom. The neutralization of Xe^{q+} is in good agreement with that indicated by the classical over-the-barrier model.

Keywords: highly charged ion, visible light, photon yield, potential energy

PACS: 32.30.Jc, 34.80.Dp, 79.20.Rf, 79.60.Bm

DOI: 10.7498/aps.67.20172570

* Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1732269).

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