

高电荷态离子入射 Al 表面库仑势对靶原子特征谱线强度的影响^{*}

王 立^{1)†} 张小安¹⁾ 杨治虎¹⁾ 陈熙萌³⁾ 张红强³⁾ 崔 莹³⁾ 绍剑雄³⁾ 徐 徐³⁾

1) 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

2) 咸阳师范学院物理系, 咸阳 712000)

3) 兰州大学物理系, 兰州 730000)

(2007 年 1 月 30 日收到, 2007 年 4 月 23 日收到修改稿)

用同一动能(150 keV)而不同电荷态的 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ ($8 \leq q \leq 16$)离子入射金属 Al 表面, 靶原子受激辐射产生特征光谱线. 实验结果表明: 高电荷态离子与金属表面相互作用过程中, 经过与靶原子碰撞(Penning 碰撞)交换动能和共振电子俘获(resonant capture)释放库仑势能, 将携带的能量沉积于靶表面, 使靶原子激发. 这种激发不同于光激发, 它不仅激发了原子复杂电子组态之间的跃迁, 而且跃迁辐射的特征谱线强度增强的趋势与入射粒子的库仑势能随其电荷态增加的趋势一致.

关键词: 高电荷态离子, 库仑势, 特征光谱, 光谱强度

PACC: 3400, 3450D

1. 引言

高电荷态离子与固体相互作用的研究近期非常活跃^[1-5]. 高电荷态离子的能量包括动能和库仑势能, 其中库仑势能是离子离化能的总和. 如 Xe^{54+} 的库仑势能可达到约 202 keV. 一般高电荷态重离子的核电荷数 Z 较大, 因而可以在固体表面产生极强的库仑(Coulomb)场, 如 1s 态的 U^{91+} 其 Coulomb 场强可以达到 2×10^{16} V/cm, 这样强的库仑场和如此大的能量可以产生许多非线性效应和新颖的物理现象. 这个领域目前最关注的问题之一是在高电荷态离子与固体表面相互作用过程中, 离子的能量是如何沉积于固体表面、表面对其能量沉积如何响应以及响应的应用前景.

目前的研究表明, 低速高电荷态离子以小于 Bohr 速度($V_{\text{Bohr}} = 2.19 \times 10^6$ m/s)入射金属表面过程中, 发射大量的电子、X 射线和溅射出粒子. 进一步的研究发现, 这种相互作用过程发射的电子和 X 射线以及溅射出的粒子的能量约占高电荷态离子势能的 10% 左右, 其余的大部分势能在 fs 时间内, 沉积

在靶表面, 使靶原子激发辐射特征光谱线, 甚至复杂电子组态间跃迁的特征光谱线^[6-9].

文献 [10] 用 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 离子轰击金属表面产生的特征光谱线, 发现合适的弹靶组合可以使靶原子激发辐射出较强的特征谱线. 为了进一步研究低速高电荷态离子与金属相互作用过程中, 离子的势能与靶原子受激辐射强度之间的关系, 我们在兰州重离子加速器国家实验室, 应用不同电荷态的 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 离子(其中 q 从 8+ 到 16+)轰击洁净的金属 Al 表面, 观测了 200—1000 nm 波长的特征谱线, 发现低速高电荷态离子携带的库仑势能, 可有效地激发金属 Al 原子的谱线, 特别是复杂电子组态之间的跃迁, 而且靶原子受激辐射的谱线强度随入射离子的电荷态的增加而增强, 即谱线强度随高电荷态离子的库仑势能而增强.

2. 实验装置与实验方法

实验在兰州重离子加速器国家实验室完成, 其装置见图 1. 高电荷态离子 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 由 18 GHz 电子回旋共振离子源(ECRIS)提供. 束流在相同的电压下

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10574132), 陕西省教育厅专项基金(批准号: 104JK300), 咸阳师范学院科研基金(批准号: 105XSYK103)资助的课题.

[†] E-mail: xysywl@yahoo.com.cn

引出,经过聚束器、四极透镜和光栏,将离子引入实验平台,进入具有磁屏蔽的金属超高真空(真空度约在 10^{-5} mPa)的靶室与样品表面相互作用。 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 离子束流的束斑直径控制在 10 nm 范围,引出流强为 μA 量级,经过聚焦和准直后作用流强为 nA 量级,束流以 45° 方向入射到经过处理的 Al 金属表面。Al 样品厚度为 50 μm ,表面积为 $19\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ 。入射离子与 Al 靶相互作用激发的光谱,利用美国 ARCA Acton Research corporation)公司生产的单色仪(Spectrapro-500i)进行分析,该单色仪的光栅常数为 1200 g/mm,闪耀波长 435.8 nm,狭缝为 10 μm ,分辨率为 0.05 nm,有效扫描范围 185—1200 nm,色散为 1.7 nm/mm,入射狭缝的宽度设定为 500 μm ,曝光时间设为 10 s。单色仪入射狭缝与束流方向垂直,且与靶表面成 45° 角。整个实验在暗室条件下完成的,以保证光谱测量的本底最小。

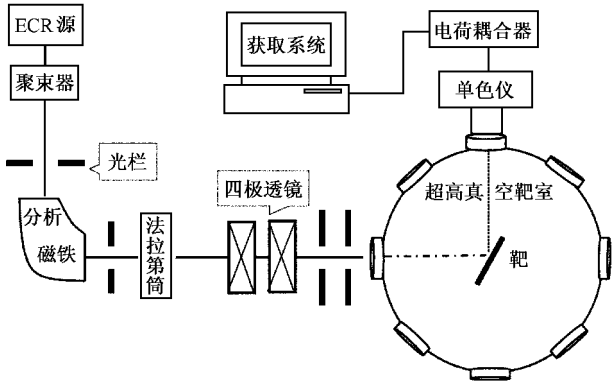


图 1 兰州重离子加速器国家实验室原子物理实验平台

实验中选择 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 离子的动能均为 150 keV,电荷态分别取 8—16 共 9 个,并用离子轰击洁净的金属 Al 样品,测量了在不同电荷态下势能与 Al 靶表

面相互作用时激发的波长在 200—1000 nm 范围内的特征光谱,连续记录了六组数据。波长测量误差小于 0.05 nm,将测量的谱线强度值与 NIST database 谱线数据对比。为使测量谱线在产生的误差范围之内,通过调节 ECR 源的参数,保证束流的稳定性,整个谱线强度测量误差小于 10%。

3. 实验结果

实验中 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 离子的动能不变, q 取不同的 9 个电荷态轰击靶物质,其中最小的 $^{40}\text{Ar}^{8+}$ 库仑势能为 422.45 eV,最大的 $^{40}\text{Ar}^{16+}$ 库仑势能达到 4120.92 eV,前者势能约为后者的 10% 左右,这表明后者在作用固体 Al 表面时沉积的能量应远大于前者。我们给出了在 $^{40}\text{Ar}^{8+}$, $^{40}\text{Ar}^{16+}$ 两个电荷态作用下金属 Al 被激发波长分别为 251.36 nm, 678.38 nm, 877.37 nm 的三条实验谱线图,如图 2, 3, 4 所示。这三条谱线跃迁的原子组态分别为 $3s^2(^1S)nd-3s3p(^3P^o)4d$, $3s^23d-3s^210f$ 和 $3s^23d-3s^25f$; 跃迁角动量均为 $5/2-7/2$, 对应的跃迁能级分别为 $38933.968(\text{ cm}^{-1})-78710.26(\text{ cm}^{-1})$, $32436.796(\text{ cm}^{-1})-47172.77(\text{ cm}^{-1})$ 和 $32436.796(\text{ cm}^{-1})-43831.105(\text{ cm}^{-1})$ 。

实验表明,当动能相同、仅改变入射离子的电荷态时,激发能量(动能和势能之和)总体趋势是随电荷态的升高而增加,电荷态 q 达到 15 之前,因为库仑势能增加有限,激发的特征谱线的强度有所增强,但并不十分明显。而电荷态在 $q = 16$ 时,由于库仑势能增加幅度较大,几乎达到原来的 10 倍左右,谱线激发强度的增强较为显著。谱线强度随电荷态的变化规律可由图 5 直观表示。从谱线强度随电荷态变化的实验关系中可以看出,电荷态在 $^{40}\text{Ar}^{8+}$ 至

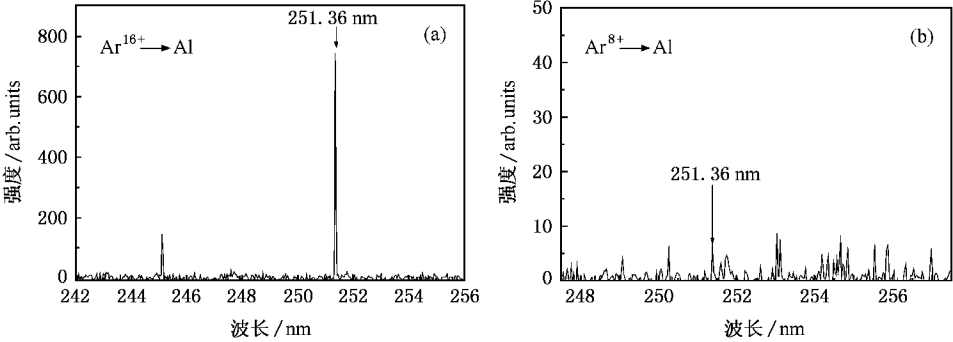


图 2 $^{40}\text{Ar}^{16+}$ (a), $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (b) 入射在 Al 表面所激发的 251.36 nm 波长的谱线强度对比图

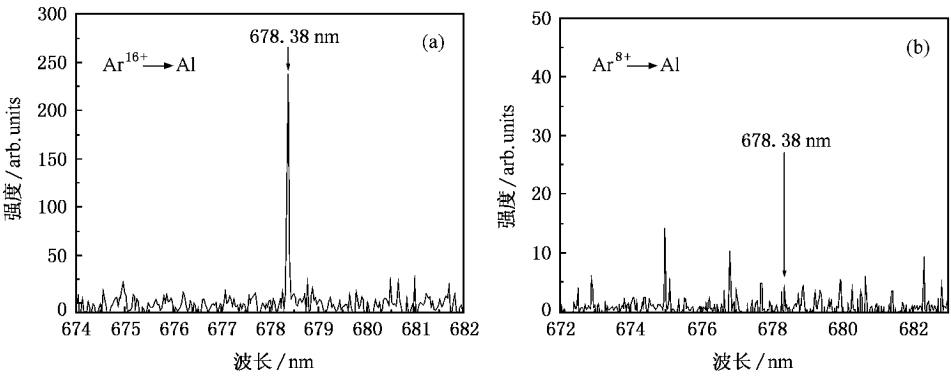


图 3 $^{40}\text{Ar}^{16+}$ (a), $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (b) 入射在 Al 表面所激发的 678.38 nm 波长的谱线强度对比图

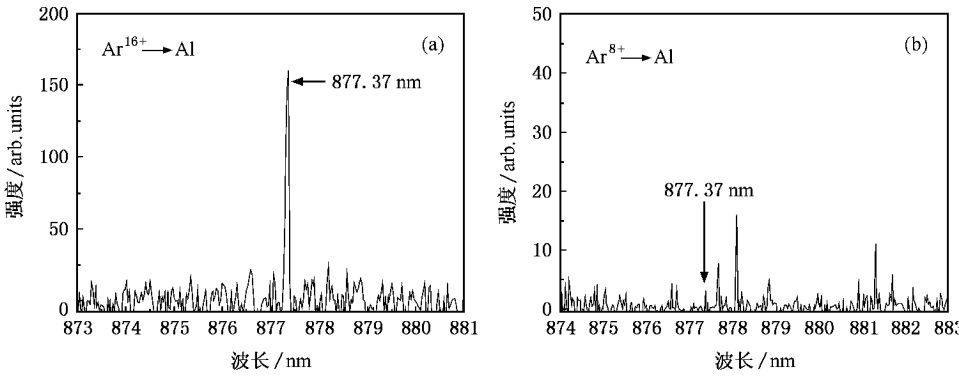


图 4 $^{40}\text{Ar}^{16+}$ (a), $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (b) 入射在 Al 表面所激发的 877.37 nm 波长的谱线强度对比图

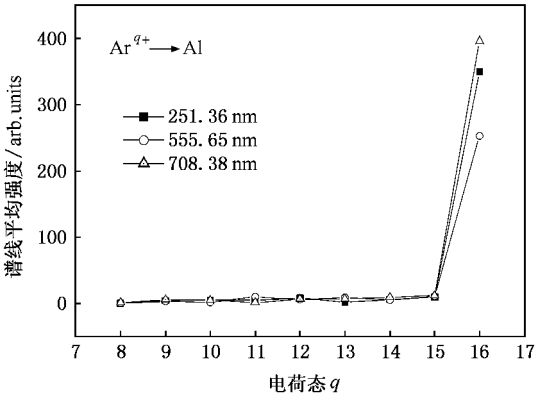


图 5 靶原子受激辐射的特征谱线强度随电荷态变化规律图(横轴为入射离子的电荷态 q , 纵轴为靶物质单离子激发的谱线强度)

$^{40}\text{Ar}^{15+}$ 之间激发的谱线强度增强并不十分明显,但是 $^{40}\text{Ar}^{16+}$ 激发的谱线强度明显比 $^{40}\text{Ar}^{15+}$ 激发的强.

实验中,我们还选择了波长在 200—1000 nm 范围内靶原子(Al)受激辐射的其他特征光谱线,并与 NIST database 数据作对比,结果列于表 1 中,波长的测量误差在 0.06 nm 范围内.

4. 分析和讨论

低速高电荷态离子携带的势能远大于其动能,在入射金属表面的过程中,根据经典过垒模型(classic over-barrier model)^[11],当高电荷态离子运动到距固体表面为

$$R_c = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sqrt{8q+2}}{2W} \tag{1}$$

时(式中 q 为离子的电荷态, W 为金属的功函数, e 为电子电量)开始共振俘获金属导带电子,在入射离子俘获一个靶电子,释放自身携带的势能为^[12]

$$E_p = \frac{eq}{4\pi\epsilon_0 R_c} - W = \frac{2qW}{\sqrt{8q+2}} - W. \tag{2}$$

这些势能将沉积在金属 Al 靶表面,使靶原子激发辐射光谱,沉积的势能越多,靶原子受激辐射的谱线越强.

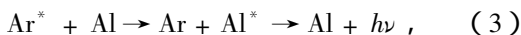
入射粒子俘获电子形成高激发态的空心原子(hollow atom)根据非弹性 Penning 碰撞,高激发态空心原子与靶表面原子碰撞,自身退激而使靶原子激

表 1 Al 靶原子特征谱线的测量结果

测量值/nm	NIST 值 ^{a)} /nm	跃迁能级/cm ⁻¹	电子组态	态项	跃迁角动量
208.26	208.254	112.061—48115	3s ² (¹ S)Bp - 3s ² (¹ S)D6d	² P - ² D	3/2—5/2
209.64	209.661	112.061—47793.0	3s ² (¹ S)Bp - 3s ² (¹ S)D5d	² P - ² D	3/2—5/2
210.36	210.369	112.061—47632.6	3s ² (¹ S)Bp - 3s ² (¹ S)D3d	² P - ² D	3/2—5/2
226.92	226.9223	112.061—44166.398	3s ² (¹ S)Bp - 3s ² (¹ S)D	² P - ² D	3/2—5/2
256.78	256.7982	0.000—38929.413	3s ² (¹ S)Bp - 3s ² (¹ S)nd	² P - ² D	1/2—3/2
510.74	510.7517	25347.756—44919.666	3s ² (¹ S)As - 3s ² (¹ S)Dp	² S - ² P	1/2—3/2
555.65	555.7063	25347.756—43 337.889	3s ² (¹ S)As - 3s ² (¹ S)Dp	² S - ² P	1/2—3/2
633.19	633.1874	32435.453—48224.20	3s ² (¹ S)Bd - 3s ² (¹ S)A5f	² D - ² F	3/2—5/2
633.75	633.7674	32435.453—48209.75	3s ² (¹ S)Bd - 3s ² (¹ S)A0f	² D - ² F	3/2—5/2
637.05	637.0918	32435.453—48127.44	3s ² (¹ S)Bd - 3s ² (¹ S)D7f	² D - ² F	3/2—5/2
654.29	654.2666	32436.796—47715.52	3s ² (¹ S)Bd - 3s ² (¹ S)D4f	² D - ² F	3/2—5/2
708.38	708.3968	32 435.453 — 46 547.942	3s ² (¹ S)Bd - 3s ² (¹ S)Bf	² D ² - F	3/2 —5/2
760.62	760.6162	32949.807—46093.424	3s ² (¹ S)Ap - 3s ² (¹ S)Dd	² P - ² D	1/2—3/2
891.24	891.2918	32949.807—44166.398	3s ² (¹ S)Ap - 3s ² (¹ S)Dd	² P - ² D	1/2—3/2
909.03	908.9906	56636.933—67635.128	3s3p ² - 3s3p(³ P)Bd	² P - ² D	1/2—3/2

a) NIST database.

发^[13]. Penning 碰撞过程可表示为



其中,Ar^{*} 为高激发态的 Ar 空心原子,Al^{*} 为靶原子的激发态.

另一方面,金属表面对高电荷态离子也会产生镜像加速,引起离子能量的增加,增益的能量与电荷态的关系式为^[14]

$$\Delta E = \frac{Eq^{3/2}}{4\sqrt{2}}. \quad (4)$$

当该部分能量沉积于靶的表面时,将进一步促使靶原子激发,这也是谱线强度随电荷态增强的一个原因.

不同电荷态的⁴⁰Ar^{q+} 离子所携带的势能如图 6 所示. Ar 离子的电荷态 q = 15 时,库仑势能是 918 eV,而电荷态 q = 16 时,库仑势能突然增大为 4120.92 eV. 库仑势能的突然增加,必然导致沉积于固体表面的能量增多,碰撞过程加剧,退激辐射显著增强.

根据量子理论,电子偶极跃迁选择定则,即 Δπ (宇称)改变,

$$\Delta n \neq 0; \Delta L = \pm 1; \Delta J = 0, \pm 1.$$

从我们测量到的较强谱线的原子组态可以看出,对应跃迁辐射谱线的主量子数 n 相同,但是角量子数 l 不同,能级是按照不同的 L, S 分裂,即属于不同支壳层之间的跃迁. Al 靶原子激发的特点之一就是内

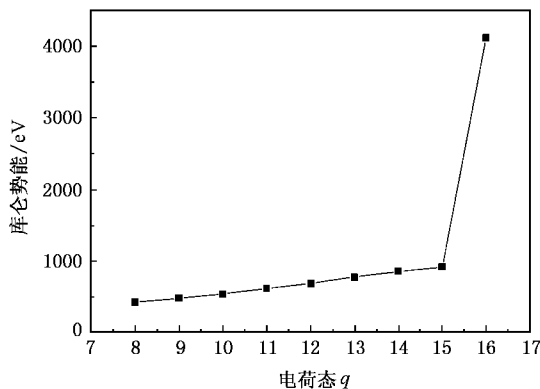


图 6 不同电荷态对应的库仑势能值

价壳层激发电子组态 nsnp² 的跃迁是允许,且跃迁概率很大,但是激发能并不高^[15]. 这个电子组态是电子在同一主壳层内跃迁 ns→np,其能级能量与电子组态 ns²(n+1)s, ns²(n+1)d 能量相近,形成低能态激发. 因此,当电荷态 q 从 15 变为 16 时,入射势能突然增加,有可能把 Al 原子中一些低能量的电子激发,形成较强的谱线.

Al 原子属于 III A 族原子,电子组态为 3s²3p,原子的价电子是一个 p 电子,内层有两个满壳层 s 电子,基态和激发态都决定于价电子所处的能级. 原子实对价电子的屏蔽效应不彻底,价电子会在离核较近处有一定的概率分布. 高电荷态离子携带的库仑势能使价电子云对原子实形成轨道贯穿效应和原

子实的极化效应. 这两个作用虽然仍属中心力场, 但原子实有效的静电作用正电荷大于 1, 不会使能级发生新的分裂, 只能使不同的 n 量子数的能级和同一 n 量子数不同 l 量子数的能级下降不同, 反映在能量公式中, 若用有效的核电荷数 Z^* 代替 Z , 即有^[15]

$$E = - \frac{Z^* R h c}{n^2}, \quad (5)$$

高电荷态携带的势能越大, 电子云贯穿效应越显著, 则 Z^* 越大, 电子自旋轨道耦合作用越强.

又因为满支壳层的电子对自旋轨道耦合为零, 只需考虑价电子的作用, 考虑角量子数 l 引起电子云贯穿对能级的影响, 能量与角量子数 l 的关系可以表示为^[15]

$$E_{nl} = - \frac{R h c}{(n - \Delta_{nl})^2}, \quad (6)$$

式中 Δ_{nl} 既表示量子数的亏损, 也可表示能级的移动. Δ_{nl} 与角量子数 l 的关系最大, 与主量子数 n 的关系较小. 电子云贯穿效应可能造成 S, P, D, ... 分裂, p 电子的 l 最小, 分裂最大的是 3p, 其次是 4p, 5p

等, 我们实验测出谱线的跃迁能级都是在 $P \rightarrow D, D \rightarrow F$ 之间, 这说明当高电荷态离子携带较大的势能造成的电子云穿效应和极化效应使自旋轨道耦合增强, 不仅激发了金属 Al 中的较强的谱线, 而且激发出了较为复杂的谱线.

5. 结 论

高电荷态离子在与金属表面相互作用的过程中, 由于选择了较为合适的弹靶组合, 通过⁴⁰Ar⁺q 离子携带不同势能值与靶原子碰撞交换能量, 经过共振电子俘获释放库仑势能, 这些能量沉积于靶表面, 使靶原子激发, 这种激发不同于光激发, 它激发了原子复杂电子组态之间的跃迁. 实验结果表明, 用高电荷态离子的库仑势能可有效激发靶原子, 从而受激辐射发出的 200—1000 nm 波段的特征谱线. 电荷态越高, 库仑势能越大, 能使轰击离子获得较大的能量, 谱线强度的增强越明显. 而且跃迁辐射的特征谱线随电荷态势能的增强的趋势与入射粒子的势能随其电荷态增加的趋势一致.

- [1] Träbert E, Beiersdorfer P, Brown G V, Chen H, Pinnington E H, Thorn D B 2001 *Phys. Rev. A* **64** 34501
- [2] Hattass M, Schenkel T, Hamza A V, Barnes A V, Newman M W, McDonald J W, Niedermayr T R, Machicoane G A, Schneider D H 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4795
- [3] Schenkel T, Barnes A V, Hamza A V, Schneider D H 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 4325
- [4] Yang Z H, Song Z Y, Chen X M, Zhang X A, Zhang Y P, Zhao Y T, Cui Y, Zhang H Q, Xu X, Shao J X, Yu D Y, Cai X H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2221 (in Chinese) [杨治虎、宋张勇、陈熙萌、张小安、张艳萍、赵永涛、崔莹、张洪强、徐徐、邵建雄、于得洋、蔡晓红 2006 物理学报 **55** 2221]
- [5] Zhang X A, Zhao Y T, Li F L, Yang Z H, Xiao G Q, Zhan W L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3341 (in Chinese) [张小安、赵永涛、李福利、杨治虎、肖国青、詹文龙 2004 物理学报 **53** 3341]
- [6] Köhrbrück R, Grether M, Spieler A, Stolterfoht N 1994 *Phys. Rev. A* **50** 1429
- [7] Grether M, Niemann D, Spieler A, Stolterfoht N 1997 *Phys. Rev. A* **56** 3794

- [8] Thomaschewski J, Bleck-Neuhaus J, Grether M, Spieler A, Stolterfoht N 1998 *Phys. Rev. A* **57** 3665
- [9] Niemann D, Grether M, Rösler M, Stolterfoht N 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3328
- [10] Zhang X A, Zhao Y T, Li F L, Yang Z H, Xiao G Q, Zhan W L 2004 *Science in China G* **34** 414 (in Chinese) [张小安、赵永涛、李福利、杨治虎、肖国青、詹文龙 2004 中国科学(G 辑) **34** 414]
- [11] Burgdlörfer J, Lerner P, Meyer F W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5674
- [12] Zhao Y T, Zhang X A, Li F L, Xiao G Q, Zhan W L, Yang Z H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2768 (in Chinese) [赵永涛、张小安、李福利、肖国青、詹文龙、杨治虎 2003 物理学报 **52** 2768]
- [13] Qiu D R 2002 *Atomic Spectra* (Shanghai: Fudan University Press) p24—29 (in Chinese) [邱德仁 2002 原子光谱分析(上海: 复旦大学出版社) p24—29]
- [14] Duerée J J, Casali F, Thumm U 1998 *Phys. Rev. A* **57** 338
- [15] Xu K Z 2006 *Advanced Atomic and Molecular Physics* (Beijing: Science Press) p83—141 (in Chinese) [徐克尊 2006 高等原子分子物理学(第二版)(北京: 科学出版社) 第 83—141 页]

The coulomb potential energy effect on the intensity of the characteristic lines at highly charged ion incidence on Al surface^{*}

Wang Li^{1,2,†} Zhang Xiao-An¹⁾ Yang Zhi-Hu¹⁾ Chen Xi-Meng³⁾
Zhang Hong-Qiang³⁾ Cui Ying³⁾ Shao Jian-Xiong³⁾ Xu Xu³⁾

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

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

3) (*Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

(Received 30 January 2007 ; revised manuscript received 23 April 2007)

Abstract

The Al atomic characteristic spectral lines were induced by the impact of $^{40}\text{Ar}^{q+}$ ions ($8 \leq q \leq 16$; kinetic energy 150 keV) on Al surface. The result shows that by Penning impinging and resonant capture, the ion energy is deposited on the Al surface to excite the target atom, which is different from light excitation. Not only are the transitions between electronic configurations of the atomic complex excited, but the enhancing tendency of the characteristic spectral line intensity is consistent with the enhancing tendency of the coulomb potential energy of the incident ions with increasing charged states.

Keywords : highly charged ion, coulomb potential energy, characteristic lines, spectra intensity

PACC : 3400, 3450D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10574132), the Special Fund of Education Department of Shaanxi Province, China (Grant No. 04JK300), and the Xianyang Normal University Foundation, China (Grant No. 05XSYK103).

[†] E-mail: xysywl@yahoo.com.cn