

文章编号: 0253-2239(2004)05-713-5

## $^{126}\text{Xe}^{q+}$ 轰击 Al 表面产生的原子和离子光谱线\*

张小安<sup>1,2</sup> 赵永涛<sup>1,2</sup> 李福利<sup>1</sup> 肖国青<sup>2</sup> 詹文龙<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西安交通大学应用物理系, 西安 710049  
<sup>2</sup> 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

**摘要:** 报道了高电荷态离子 $^{126}\text{Xe}^{q+}$  ( $6 \leq q \leq 30$ )入射到固体 Al 表面产生的 200~1000 nm 波段的发射光谱的实验结果。实验表明,在弱束流(nA 量级)高电荷态的情况下,通过入射离子与固体靶的相互作用可有效地产生原子和离子的复杂组态间跃迁所形成的可见光波段的特征谱线,而且当入射离子的电荷剥离数超过一临界值后(对 Al,  $q = 26$ ),谱线相对强度突然显著增强。根据经典过垒模型 COB(The classic over-barrier model),在入射离子的动能较小( $\sim 1$  keV/u)的条件下,高电荷态离子与表面相互作用过程中电子的俘获或转移起着非常重要的作用,通过提高入射离子的电荷态可增强入射离子俘获电子的能力,显著增强激发粒子的光谱线的强度。

**关键词:** 光谱; 相对强度; 高电荷态离子; 空心原子

中图分类号: O571.33 文献标识码: A

## Atomic and Ion's Light Emission Spectra Induced by the Impact of $^{126}\text{Xe}^{q+}$ on Al Solid Surface

Zhang Xia'an<sup>1,2</sup> Zhao Yongtao<sup>1,2</sup> Li Fuli<sup>1</sup> Xiao Guoqing<sup>2</sup> Zhan Wenlong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Applied Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049  
<sup>2</sup> Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

(Received 21 January 2003; revised 22 May 2003)

**Abstract:** The measurement of light spectrum with wavelength from 200 nm to 1000 nm emitted from solid surface of Al which is excited by slow highly charged ions  $^{126}\text{Xe}^{q+}$  ( $6 \leq q \leq 30$ ) is reported. The result shows that the characteristic spectral lines from transitions between complex configurations of atoms and ions can be effectively excited by the impact of highly charged ions on a solid surface even though the ionic beam is very weak. The relative intensity of those spectra can be enhanced sharply and greatly if the stripped charge  $q$  of incident ions ( $q$ ) is beyond a critical value ( $q = 26$  for Al). According to the classic over-barrier model, electrons captured and transferred play key roles in interaction between highly charged ions and solid surfaces if the kinetic energy of the incident ions is small ( $\sim 1$  keV/u). The ability of ions capturing electrons can be intensified by increasing charged states of the incident ions, therefore, the light spectra intensity of excited particles can be enhanced significantly.

**Key words:** spectrum; relative intensity; highly charged ion; hollow atom

### 1 引 言

电子共振回旋离子源(ECR)可提供元素周期表

\* 国家自然科学基金(10134010)、国家自然科学基金(19804012、10274058)资助课题。

E-mail: zhangxiaoan2000@yahoo.com.cn

收稿日期:2003-01-21;收到修改稿日期:2003-05-22

中几乎所有元素的各种电荷剥离态的离子,这些离子的动能可远小于其剥离电荷后所携带的势能,利用这些低速高电荷态离子轰击金属、半导体和绝缘材料靶表面发现了许多新奇的物理现象,引起了国际上许多著名实验室的高度重视<sup>[1~5]</sup>。

在高电荷态离子逼近金属表面过程中,当入射离子与金属表面间的势垒高度低于费米面时,金属

表面处于导带的电子会大量共振转移到入射离子的高激发空态上,形成空心原子<sup>[6]</sup>。与所对应的处于基态的原子相比,空心原子的激发能远高于电离能,它主要通过自电离和俄歇(Auger)方式退激,在此过程中发射出大量电子。当入射离子进入靶表面后,它在约 100 fs 时间尺度内俘获大量表面电子而被屏闭,将其势能沉积在  $1 \text{ nm}^2$  尺度的空间范围,引起电子、离子以及原子的溅射和 X 射线的产生。在入射粒子的电荷态不太高时,在表面内外被俘获电子的光辐射跃迁速率比自电离和俄歇过程的速率小约 6 个量级<sup>[7]</sup>,光辐射退激过程可不予考虑,因而目前包括高、低电荷态与固体表面相互作用的研究大都集中于经自电离和俄歇过程发射的电子上<sup>[7~10]</sup>,有关光辐射过程的研究工作非常少。文献<sup>[10]</sup>将 Ni 靶设计成微毛细管状(Microcapillary)研究了在慢速高电荷离子的作用下 300~600 nm 可见光的辐射。

注意到,在原子或离子中处于高激发态的电子通过光辐射退激的速率随核电荷数的 4 次方增加,而自电离和俄歇过程与入射粒子的核电荷数无强关联<sup>[11]</sup>。另外,随着入射离子的电荷态的增加,入射离子有可能一次性俘获电子被中性化<sup>[12]</sup>,这可使被俘获电子进入较低的能态而使通过光辐射过程退激的可能性随之增加。因此,通过提高入射离子电荷态有可能会大大提高光辐射的产额,而通过对相关光谱线的测量可以深入研究高电荷态离子与固体表面相互作用过程中能量转移的机理。与光激发相比,在空心原子中首先有大量电子处于高激发态,这些电子通过光辐射退激可形成多电子复杂组态间的跃迁光谱线,甚至电偶极禁戒跃迁谱线<sup>[13]</sup>,而这些谱线通常很难用光激发产生。所以,高电荷离子与固体靶作用的光谱研究同时也为原子复杂谱线的研究提供了新的手段。与束箔光学和薄膜光学不同<sup>[14~16]</sup>,入射粒子激发靶利用的不是自身的动能而是剥离电荷后所携带的势能,这使慢速高电荷离子与固体靶作用呈现出许多新的特征。

利用兰州重离子加速器国家实验室电子共振回旋离子源,我们建成了高电荷态重离子与固体表面相互作用研究平台。在本文报道的实验中,我们选用电荷态  $q$  高于文献<sup>[8, 12, 14]</sup>的  $^{126}\text{Xe}^{q+}$  离子轰击固体 Al 靶,测量了  $^{126}\text{Xe}^{q+}$  与 Al 表面相互作用过程中所产生的 Al、Xe 原子和离子的 200~1000 nm 的光谱。

## 2 实验装置

实验中入射离子由 18 GHz 电子回旋共振离子源提供,束流在不同的引出电压下引出,经过聚束器,  $90^\circ$  偏转分析磁铁,四极透镜,进入内部具有铂合金做电磁屏蔽的超高真空靶室,其真空维持在  $10^{-8}$  Pa 范围,束流直径 5 mm,与 Al 表面成  $45^\circ$  角入射。探测器使用美国 ARC 公司(Acton Research corporation)生产的单色仪 Spectrapro-500i,其光学参量为 1200 gr/mm,有效扫描范围为 185~1200 nm,在狭缝为  $10 \mu\text{m}$  闪耀波长 435.8 nm 时,分辨力为 0.05 nm,色散  $1.7 \text{ nm}^{-1}$ 。光入射窗口与束流成  $90^\circ$  角,与 Al 表面成  $45^\circ$  角。用分析磁铁后的法拉第筒测量束流的强度,用四极透镜和光阑调节束斑的位置和大小。靶选用纯度为 99.99% 且表面经过净化处理,面积为  $19 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ 、厚度为  $50 \mu\text{m}$  的 Al,将其固定在靶架上,靶架可以旋转  $180^\circ$ 。光谱测量在暗室条件下进行,其它背景噪声利用单色仪所带的程序予以扣除。实验装置如图 1 所示。

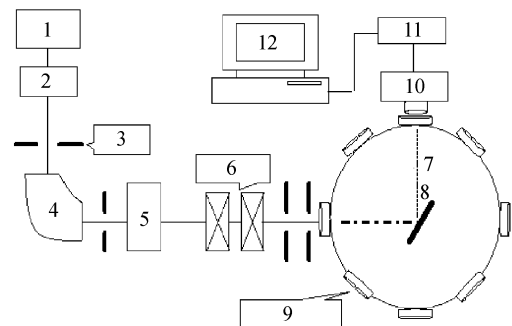


Fig. 1 Atomic physics platform of (ECR source) of the National Laboratory of the Heavy Ion Accelerator in Lanzhou. (1: ECR ion source; 2: Beam buncher; 3: barrier; 4:  $90^\circ$  deflection analytic magnet; 5: Faraday cylinder; 6: magnetic quadrupole lens; 7: ultrahigh vacuum target chamber; 8: target; 9: time of flying electron detector; 10: monochromator; 11: charge coupler; 12: gathering system)

## 3 结果与讨论

### 3.1 实验结果

我们选用的束流为  $^{126}\text{Xe}^{q+}$ , 电子共振回旋离子源的引出流强为  $15 \mu\text{A}$ , 经过聚焦和准直后,入射到 Al 表面的流强为 nA 量级,离子的电荷态分别为  $q=30, 26, 20, 10, 6$ , 选取的引出电压分别为 5 kV、5.769 kV、7.5 kV、15 kV、25 kV, 以使不同电荷态的入射离子有相同的初动能。本实验测到的光谱的

认定和理论值取自参考文献[17]。

线。表 1 列出了利用文献[17]可认定的 $^{126}\text{Xe}^{30+}$  和

图 2~图 6 给出了实验测量到的部分典型光谱

$^{126}\text{Xe}^{6+}$  入射到 Al 表面产生的谱线。

Table 1 The experimental results of the excited spectral lines

Incident ion	Extract voltage	Particle	The experimental value /nm	Theoretical value <sup>[17]</sup> /nm	Transition	Angular momentum /J
$^{126}\text{Xe}^{30+}$	5 kV	Al	213.47	213.4733	$10d^2D-3p^2P^o$	$5/2-3/2$
$^{126}\text{Xe}^{30+}$	5 kV	Al	800.28	800.3186	$8s^2S-4p^2P^o$	$1/2-3/2$
$^{126}\text{Xe}^{30+}$	5 kV	Al	806.59	806.5968	$7d^2D-4p^2P^o$	$3/2-1/2$ $3/2-3/2$
$^{126}\text{Xe}^{30+}$	5 kV	Al	807.63	807.6298	$7d^2D-4p^2P^o$	
$^{126}\text{Xe}^{30+}$	5 kV	$\text{Al}^{1+}$	531.20	531.232	$9s^3S-5p^3P^o$	$1-1$
$^{126}\text{Xe}^{30+}$	5 kV	Xe	457.68	457.66	$6d[3^1/2]-6s[11/2]^o$	$4-2$
$^{126}\text{Xe}^{30+}$	5 kV	$\text{Xe}^{1+}$	661.41	661.49	$7^o-6s''-2S$	$3/2-1/2$
$^{126}\text{Xe}^{30+}$	5 kV	$\text{Xe}^{1+}$	662.02	662.00	$6p^4D^o-5d^2P$	$3/2-1/2$
$^{126}\text{Xe}^{6+}$	25 kV	Al	236.98	236.93	$3d^4D^o-3p^2P$	$5/2-3/2$
$^{126}\text{Xe}^{6+}$	25 kV	Al	309.20	309.27	$3d^2D-3p^2P^o$	$5/2-3/2$
$^{126}\text{Xe}^{6+}$	25 kV	Al	344.37	344.56	$3p^2P-3p^2P^o$	$5/2-3/2$
$^{126}\text{Xe}^{6+}$	25 kV	Al	237.48	237.4496	$3d^4D^o-3p^2P^o$	$3/2-5/2$

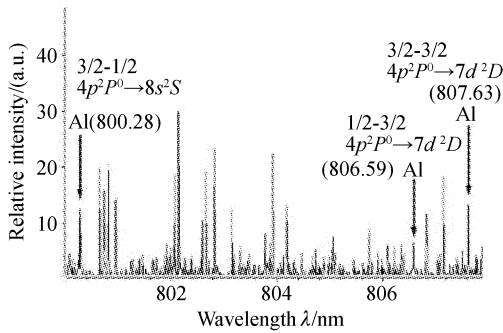


Fig. 2 The spectral lines 800.28 nm, 806.59 nm and 807.63 nm of Al are excited by the impact of  $^{126}\text{Xe}^{30+}$  ion, which extract voltage is 5 keV, on Al surface

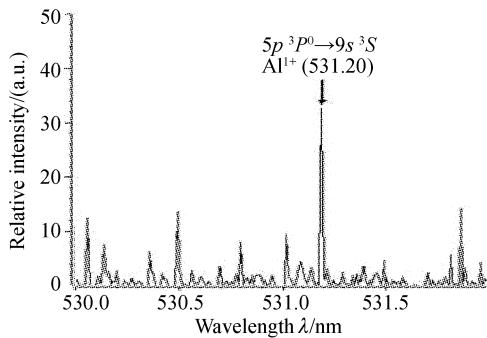


Fig. 3 The spectral line 531.20 nm of  $\text{Al}^{1+}$  is excited by the impact of  $^{126}\text{Xe}^{30+}$  ion, which extract voltage is 5 keV, on Al surface

的变化。可以看到,当  $q$  大于 26 时,三条特征谱线的强度突然显著增强。

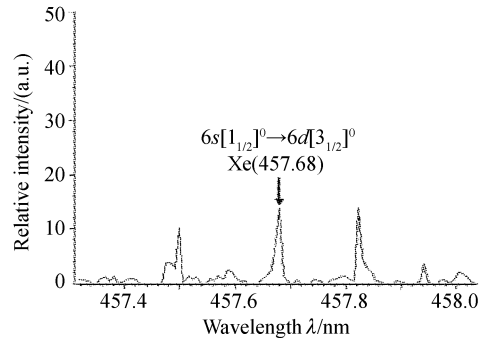


Fig. 4 The spectral line 457.68 nm of Xe is excited by the impact of  $^{126}\text{Xe}^{3+}$  ion, which extract voltage is 5 keV, on Al surface

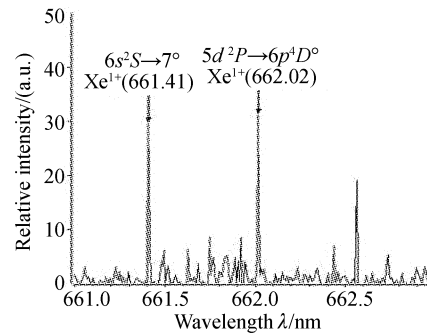


Fig. 5 The spectral lines 661.41 nm and 662.02 nm of  $\text{Xe}^{1+}$  are excited by the impact of  $^{126}\text{Xe}^{3+}$  ion, which extract voltage is 5 keV, on Al surface

图 7 给出了入射离子为  $^{126}\text{Xe}^{10+}$ 、 $^{126}\text{Xe}^{15+}$ 、 $^{126}\text{Xe}^{20+}$ 、 $^{126}\text{Xe}^{26+}$ 、 $^{126}\text{Xe}^{28+}$  入射到 Al 表面,测量到的 Al 的 237.49 nm,555.72 nm,761.43 nm 三条谱线的相对强度与束流的强度之比随入射离子电荷态

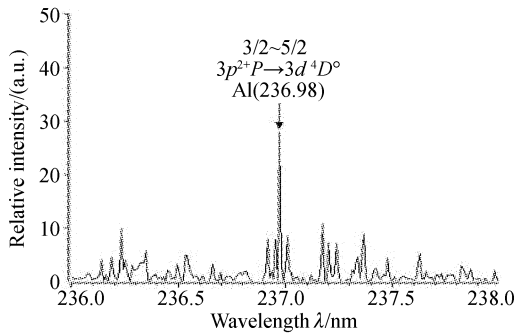


Fig. 6 The spectral line 236.98 nm of Al is excited by the impact of  $^{126}\text{Xe}^{6+}$  ion, which extract voltage is 5 keV, on Al surface

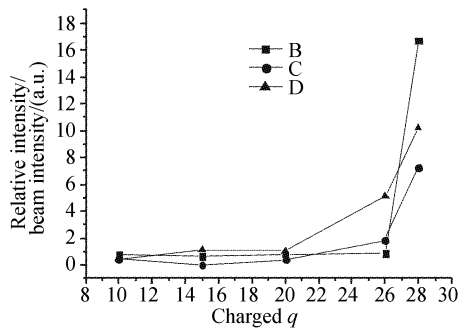


Fig. 7 The ratio of spectral relative intensity to beam intensity is as a function of charged states of the ion. —■— B for 237.49 nm of Al; —●— C for 555.72 nm of Al; —▲— D for 761.43 nm of Al

### 3.2 讨 论

图 2 的三条 Al 原子的长波段的谱线来源于高电荷态离子  $^{126}\text{Xe}^{30+}$  入射到 Al 表面, Al 原子被  $\text{Xe}^{30+}$  俘获电子所释放的库仑势能激发到  $8s$  态和  $7d$  态退激辐射的光。因库仑场很强 ( $q=30$ ), 原子被激发到很高的能态, 形成三条长波段 Al 的特征谱线。图 6 为  $^{126}\text{Xe}^{6+}$  离子所激发的 Al 的谱线。可以看到, 因电荷态较低,  $\text{Xe}^{6+}$  俘获电子所释放的库仑势能少, Al 原子被激发到较低的  $3d$  态。这一结果说明, 提高入射离子的电荷态可有效地将原子激发到高激发态而产生靶原子的光谱线。在图 7 中, 入射离子动能不变, 电荷态从  $q=10+$  变到  $28+$ , 可以发现, 其激发强度与入射离子的引出电压的关系不明显, 而与离子的电荷态有很强的关联, 并且当  $q$  大于 26 时明显增强。根据经典过垒模型<sup>[18]</sup>, 在高电荷态离子入射到金属表面过程中, 因金属表面像电荷的加速作用, 入射离子的能量获得增益<sup>[12]</sup>

$$\Delta E = Wq^{3/2}/4\sqrt{2}, \quad (1)$$

随着电荷态的增高, 入射离子本身的库仑势能和能量增益  $\Delta E$  都将增大, 在其逼近和射入金属表面过

程中会溅射出更多处于激发态的 Al 原子和离子, 从而使光辐射强度增强。另一方面, 根据光谱学定义的第二类非弹性碰撞——彭宁 (Penning) 碰撞, 激发态离子与其它粒子碰撞, 自身退激而使被碰撞的粒子激发。低速高电荷态粒子在接近金属固体表面的过程中, 会在高激发态的外壳层空位上俘获多个电子, 从而形成处于高激发态的空心原子, 这些空心原子逼近金属固体表面时退激而释放势能于表面, 使表面的靶原子受激, 进而辐射其特征光谱线, 而且入射离子的电荷态越高, 因俘获而处于激发态的电子数目越多, 由彭宁碰撞导致的光辐射则越强。因此, 随入射离子电荷态的提高, 通过彭宁碰撞也可导致靶原子强的光辐射。在彭宁碰撞中, 也可发生电子进一步向入射离子的转移从而产生激发态的靶离子。图 3 是  $^{126}\text{Xe}^{30+}$  入射到 Al 表面形成的激发态  $\text{Al}^{1+}$  退激而产生的谱线。

根据经典过垒模型, 高电荷态离子运动到距表面为

$$R_c = (2q)^{1/2}/W \quad (2)$$

处开始俘获电子, 其中  $q$  为离子的电荷态数,  $W$  为金属的脱出功。 $R$  随离子电荷态而变, 一般约为 10.0 nm 左右。在入射离子逼近靶表面的过程中, 通过不断俘获电子, 可形成处于激发态与入射离子电荷态不同的离子甚至于完全中和的空心原子<sup>[19]</sup>, 它们可通过俄歇和辐射过程退激。在我们的实验中观察到了这一现象。图 4 为激发态的 Xe 原子辐射退激的特征光谱图。图 5 为入射离子  $\text{Xe}^{30+}$  未完全中性的激发态  $\text{Xe}^{1+}$  辐射退激的特征光谱图。

上述结果表明, 利用高电荷态离子与金属固体表面相互作用产生光谱线, 与用电子和低电荷态离子不同, 光谱线的产生不是通过入射离子与靶的直接碰撞而产生的, 入射粒子的动能在这一过程中不起很大的作用, 电子的俘获或转移起着非常重要的作用, 通过提高入射离子的电荷态可增强入射离子俘获电子的能力, 显著增强光谱线的强度。

**结论** 一般认为, 在慢速高电荷离子与固体金属靶作用中光辐射比自电离和俄歇过程要慢得多可不加考虑。本实验结果表明, 随着入射离子的电荷态增高, 原子和离子的各种光谱线可得到有效地激发, 且当电荷态达到某一阈值 ( $\text{Al}, q$  大于 26) 时, 被激发的靶原子的光辐射退激过程会突然显著增强, 光辐射过程变的重要起来。

## 参 考 文 献

- 1 Trabert B, Beiersdorfer P, Brown G V *et al.*. Experimental M1 transition rates in K XI, K XV, and K XVI. *Phys. Rev. (A)*, 2001, **64**(3):034501-1~034501-4
- 2 Hattass M, Schenkel T, Hamza A V *et al.*. Charge equilibration time of slow, highly charged ions in solids. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(24):4795~4798
- 3 Schenkel T, Barnes A V *et al.*. Synergy of electronic excitations and elastic collision spikes in sputtering of heavy metal oxides. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(19):4325~4328
- 4 Xiao G, Schiwietz G, Grande P L *et al.*. Indications of nuclear-track-guided electrons induced by fast heavy ions in insulators. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(10):1821~1824
- 5 Winter H, Aumayr F J. Hollow atoms. *J. Phys. (B)*, 1999, **32**(7):R39~R65
- 6 Xiao Guoqing. Electron emission from solids induced by swift heavy ions. *Nuclear Physics Review (原子核物理评论)*, 2000, **17**(3):159~164 (in Chinese)
- 7 Zhang Xiaohan, Xiao Guoqing, Wang Wusheng *et al.*. Highly charged ions interaction with surfaces. *Nuclear Physics Review (原子核物理评论)*, 2002, **19**(3):342~346 (in Chinese)
- 8 Meyer F W, Overbury S H, Havener C C *et al.*. Electron emission during interactions of multicharged N and Ar ions with Au(110) and Cu(001) surfaces. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **44**(11):721~47228
- 9 Kohrobruck R, Grether M, Spieler A *et al.*. Angular distribution of K Auger electrons ejected by highly charged ions interacting with an Al(111) surface. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **50**(2):1429~1434
- 10 Morishita Y, Ninomiya S, Yamazaki Y *et al.*. Visible light emissions from slow highly charged ions transmitted through a Ni microcapillary. *Phys. Scripta*, 1999, **T80**(4):212~214
- 11 Bethe H A, Salpeter E E. *Quantum Mechanics of One and Two Electron Systems*. New York: Academic Press, 1957
- 12 Ducree Jens J, Casali Fulvio, Thumm Uwe. Extended classical over-barrier model for collisions of highly charged ions with conducting and insulating surfaces. *Phys. Rev. (A)*, 1998, **57**(1):338~350
- 13 Beiersdorfer P, Osterheld A L, Elliott S R. Measurements and modeling of electric-dipole-forbidden  $2p_{1/2} - 2p_{3/2}$  transitions in fluorinelike  $\text{U}^{81+}$  through berylliumlike  $\text{U}^{88+}$ . *Phys. Rev. (A)*, 1998, **58**(3):1944~1953
- 14 Qi Hongji, Cheng Chuanfu, Yuan Jingmei *et al.*. Morphology analysis of titanic thin film prepared by ion beam sputtering. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2003, **23**(4):480~484 (in Chinese)
- 15 Feng Shimeng, Zhao Haiying, Dou Xiaoming *et al.*. Influence of sputtering power on optical quality of thin film. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2002, **22**(11):1300~1302 (in Chinese)
- 16 He Yuping, Wu Guifang, Li Aixia *et al.*. Microstructure and optical constants of sputtering Ag films with different thicknesses. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2002, **22**(6):678~682 (in Chinese)
- 17 Stelgnopf A P, Swinichizg H C. *Neutral and Ionized Atoms, Table of Spectral Lines*. Moscow: Atom Press, 1966
- 18 Burgdorfer J, Lerner P, Meyer F W. Above-surface neutralization of highly charged ions: the classical over-the-barrier model. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **44**(9):5674~5685