

$^{129}\text{Xe}^{30+}$ 轰击 Ni 表面激发靶原子偶极跃迁和禁戒(M1 和 E2)跃迁的特征光谱线*

张小安^{1)†} 赵永涛²⁾ 李福利¹⁾ 杨治虎²⁾ 肖国青²⁾ 詹文龙²⁾

¹⁾ 西安交通大学应用物理系, 西安 710049)

²⁾ 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2003 年 12 月 29 日收到, 2004 年 2 月 16 日收到修改稿)

报道了用高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ (150keV)轰击金属 Ni 表面, 激发的 200—1000nm Ni I 和 Ni II 的特征光谱线的实验结果. 实验结果表明: 用电荷态足够高的离子作光谱激发源, 无需很强的束流强度(nA 量级), 便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, 特别是 Ni I 和 Ni II 偶极禁戒的电四极跃迁 E2 和磁偶极跃迁 M1 的特征光谱线. 通过分析发现, 在禁戒跃迁的谱线中, 有些是电子组态相同而原子态不同的偶极禁戒跃迁光谱线而且 Ni II 的 684.84nm 谱线较强.

关键词: 光谱, 禁戒跃迁, 电子组态, 高电荷态离子

PACC: 3400, 3450D

1. 引 言

根据经典过垒模型 COB(classic over-barrier model)^[1], 低速高电荷态离子所携带的势能远大于其质心运动的动能, 在其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(hollow atom), 空心原子自电离和 Auger 退激发射大量电子和 x 射线辐射, 同时, 离子在入射表面过程中, 离子诱导电子发射、离子散射和溅射. 通过电子发射、x 射线辐射和粒子溅射所消耗的能量仅占高电荷态离子所携带势能的 10%^[2], 入射离子的其余大部分势能, 在 fs 时间尺度内, 将其沉积在靶表面 nm 尺度的空间, 使靶原子激发. 这种激发, 不同于光激发和热激发, 它既有单电子激发, 又有多电子激发^[3-5], 受激的原子通过光辐射退激可形成多电子复杂组态跃迁的光谱线, 甚至偶极禁戒光谱线, 而这些谱线通常很难用光激发产生.

在光谱学中, 电子偶极禁戒跃迁的光谱线和谱线强度, 在研究元素的丰度、电子密度、等离子体物理和天体物理学中有着重要应用. Ni I 和 Ni II 的特

征光谱线, 特别是偶极禁戒跃迁的光谱线, 是天体物理特别感兴趣的特征光谱线, 在新星(novae)特殊恒星(peculiar stars)行星状星云(planetary nebulae)和超新星爆发遗迹(supernova remnants)存在 Ni I 和 Ni II 偶极禁戒跃迁的特征光谱线^[6]. 另一方面, 对 Ni 原子的结构和光谱的研究, 在铁磁性材料, 电子功能材料和激光材料有着重要意义.

高电荷离子与固体靶作用的光谱研究, 不仅使低速高电荷离子与固体表面相互作用的研究进一步深入, 同时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, 激发的 200—1000nm Ni I 和 Ni II 的特征光谱线、特别是电子组态相同而原子态不同的偶极禁戒跃迁光谱线实验结果.

2. 实验过程

本实验在兰州重离子加速器国家实验室完成, 实验装置已在文献 [7] 中做了详细的描述. 高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 由 18GHz 电子回旋共振离子源(ECRIS)提供, 束流在 5kV 的电压下引出, 经过聚束器, 利用 90°偏转分析磁铁将确定电荷态离子引入原子物理

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:10134010)和国家自然科学基金(批准号:10274058, 10274088)资助的课题.

† E-mail: zhangxiaon2000@yahoo.com.cn; 电话: 029-82668551.

实验平台,然后经过四极透镜和光栏的聚焦准直,离子进入内部具有 μ 金属做电磁屏蔽的超高真空(真空 $\sim 10^{-5}$ mPa)靶室,与样品表面相互作用。

在本实验中,束流的束斑直径可控制在 10mm 范围,束流强度为 nA 量级,离子以 45° 方向入射到经表面净化处理的纯度为 99.99% 的 Ni 固体表面,其表面积为 $19\text{mm} \times 24\text{mm}$,厚度为 2mm。

入射离子与固体表面相互作用所产生的激发光谱,利用美国 ARC 公司 (Acton Research corporation) 的单色仪 (Spectrapro-500i) 进行分析,其光栅常数为 $1200\text{g}/\text{mm}$,闪耀波长为 435.8nm ,狭缝为 $10\mu\text{m}$ 时,分辨为 0.05nm ,有效扫描范围为 $185\text{—}1200\text{nm}$,色散为 $1.7\text{nm}/\text{mm}$ 。单色仪入射狭缝与束流方向垂直,与靶表面成 45° 角。在本实验中,入射狭缝的宽度设定为 $500\mu\text{m}$,曝光时间选为 10s。单色仪用标准汞灯校准。

在实验中,选用引出流强为 μA 量级、初动能 150keV 的 $^{129}\text{Xe}^{30+}$,经过四极透镜和光栏的聚焦和准直,束斑直径为 5mm ,与靶表面的作用流强为 nA 量级。实验中,束流强度保持稳定。整个实验是在暗室条件下完成的,以保证进行光谱测量时本底最小。实验中,我们测量了束流 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ (150keV) 轰击 Ni 靶表面所产生的波长在 200nm 到 1000nm 间的辐射光谱。波长的测量误差小于 0.03nm ,其波长和类型等的认定均以美国国家标准局数据库 (NIST database) 的值为准,波长偏差在 $0.003\text{—}0.06\text{nm}$ 之间,测量谱线强度误差小于 10% 。

3. 实验结果

图 1 给出了 Ni I 563.71nm 和 Ni II 221.66nm 强度分别为 19.58 和 35.67 的偶极跃迁的特征光谱线。图 2 给出了 Ni I 偶极禁戒 M1 跃迁 279.85nm 和 E2 跃迁 819.43nm 特征光谱线,强度分别为 15.54 和 19.32。Ni II 偶极禁戒 M1 跃迁 343.89nm 和 E2 跃迁 684.84nm 的特征光谱线,强度分别为 15.73 和

37.79。表 1 列出了本实验测量的 Ni I 和 Ni II 偶极跃迁的特征光谱线,表 2 列出了本实验测量的 Ni I 和 Ni II 偶极禁戒 (M1 和 E2) 跃迁的特征光谱线。

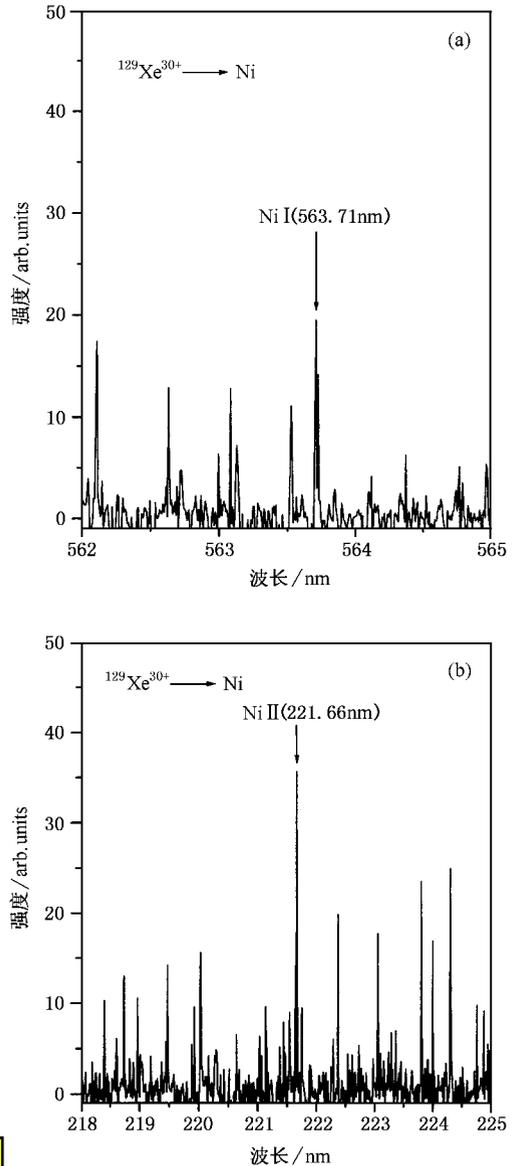


图 1 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 轰击 Ni 表面,激发 Ni I 563.71nm 和 Ni II 221.66nm 偶极跃迁 (E1) 的特征光谱线

表 1 Ni I 和 Ni II 偶极跃迁的特征光谱线 (nm)

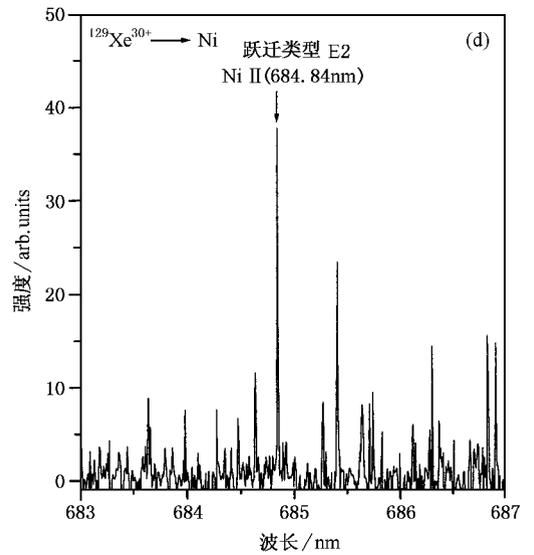
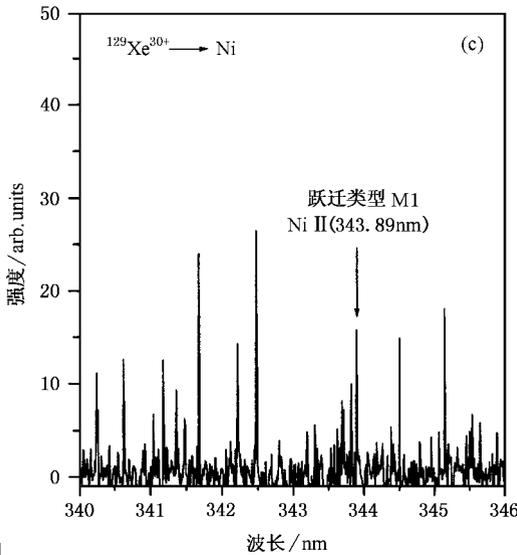
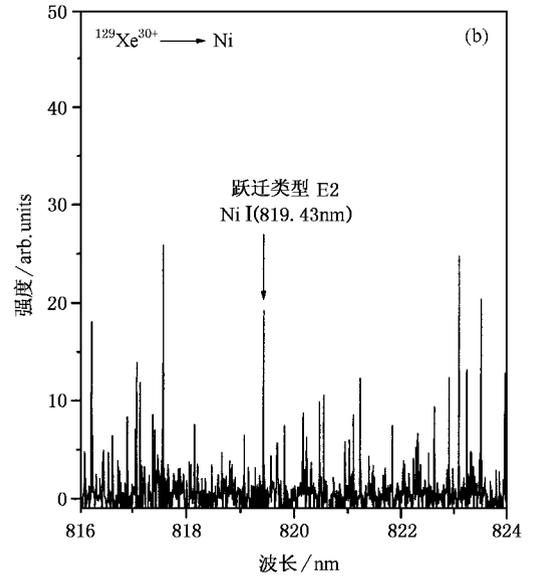
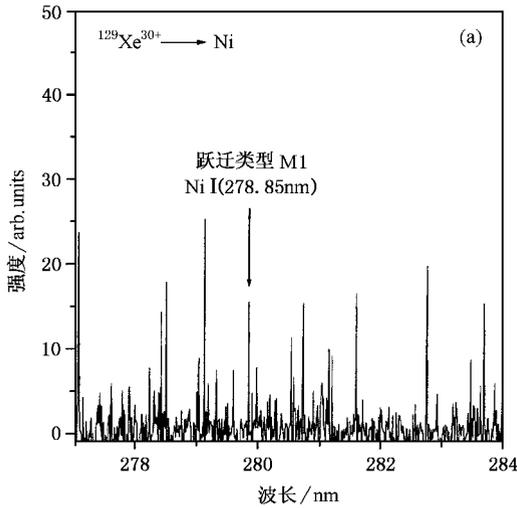
粒子	测量值	NIST 值 ^a	跃迁能级/ cm^{-1}	电子组态	态项
Ni I	205.25	205.2434	1332.16—50039.19	$3d^8(^3F)4s^2\text{—}3d^9(^2D)5p$	$^3F\text{—}^3F^{\circ}$
	313.44	313.4104	1713.09—33610.89	$3d^9(^2D)4s\text{—}3d^8(^3F)4s4f(^3P^{\circ})$	$^3D\text{—}^3D^{\circ}$
	409.38	409.3616	1332.16—25753.55	$3d^8(^3F)4s^2\text{—}3d^8(^3F)4s4f(^3P^{\circ})$	$^3F\text{—}^5D^{\circ}$
	481.58	481.5933	28569.21—49327.81	$3d^9(^2D)4p\text{—}3d^9(^2D_{5/2})4d$	$^3P^{\circ}\text{—}^2[5/2]$
	563.71	563.7119	32982.26—50716.90	$3d^9(^2D)4p\text{—}3d^9(^2D_{3/2})4d$	$^1P^{\circ}\text{—}^2[3/2]$
	613.41	613.3963	32973.38—49271.55	$3d^8(^3F)4s4f(^3P^{\circ})\text{—}3d^9(^2D_{5/2})4d$	$^3F^{\circ}\text{—}^2[5/2]$
Ni II	221.66	221.6477	8393.90—53496.49	$3d^8(^3F)4s\text{—}^3d^8(^3F)4p$	$^4F\text{—}^4G^{\circ}$
	236.71	236.7384	9930.04—51557.85	$3d^8(^3F)4s\text{—}^3d^8(^3F)4p$	$^4F\text{—}^4D^{\circ}$
	251.06	251.0874	13550.39—53365.17	$3d^8(^3F)4s\text{—}^3d^8(^3F)4p$	$^2F\text{—}^4G^{\circ}$

a) NIST database.

表 2 Ni I 和 Ni II 偶极禁戒 (M1 和 E2) 跃迁的特征光谱线 (nm)

粒子	测量值	NIST 值 ^a	跃迁能级/ cm^{-1}	电子组态	态项	跃迁类型
Ni I	279.85	279.8473	15734.00—51457.25	$3d^8(^3P)4s^2-3d^9(^2D_{3/2})4d$	$^3P-^2[1/2]$	M1
	534.83	534.8284	3409.94—22102.33	$3d^9(^2D)4s-3d^8(^1G)4s^2$	$^1D-^1G$	E2
	750.68	750.7380	204.79—13521.35	$3d^9(^2D)4s-3d^8(^1D)4s^2$	$^3D-^1D$	E2
	819.43	819.4531	3409.94—1560.84	$3d^9(^2D)4s-3d^8(^3P)4s^2$	$^1D-^3P$	M1, E2
	820.17	820.1741	1332.16—13521.35	$3d^8(^3F)4s^2-3d^8(^1D)4s^2$	$^3F-^1D$	M1
	820.17	820.1741	1332.16—13521.35	$3d^8(^3F)4s^2-3d^8(^1D)4s^2$	$^3F-^1D$	E2
Ni II	343.89	343.8877	0.00—29070.93	$3d^9-3d^8(^3P)4s$	$^2D-^2P$	M1
	543.12	543.1194	10663.89—29070.93	$3d^8(^3F)4s-3d^8(^3P)4s$	$^4F-^2P$	E2
	684.84	684.842	14995.57—29593.46	$3d^8(^3F)4s-3d^8(^3P)4s$	$^2F-^2P$	E2
	870.33	870.387	13550.39—25036.38	$3d^8(^3F)4s-3d^8(^1D)4s$	$^2F-^2D$	M1

a) NIST database.

图 2 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 轰击 Ni 表面激发的 Ni I 偶极禁戒 M1 跃迁 278.85nm 和 E2 跃迁 819.43nm 特征光谱线, Ni II 偶极禁戒 M1 跃迁 343.89nm 和 E2 跃迁 684.84nm 的特征光谱线

4. 讨 论

根据光辐射的 Einstein 理论,自发辐射系数

$$A_{kk'} = \frac{4e^2\omega_{kk'}^3}{3\hbar c^3} |r_{kk'}|^2, \quad (1)$$

由能级 $E_{k'}$ 向能级 E_k 的电偶极辐射跃迁选择定则由 $|r_{kk'}|^2$ 确定 (LS 耦合) 宇称, 改变

$$\begin{aligned} \Delta S &= 0, \\ \Delta L &= 0, \pm 1; \Delta J = 0, \pm 1, \end{aligned} \quad (2)$$

在适当的条件下, 不符合上述定则的很弱的谱线 (电四极和磁偶极辐射等) 才会发生^[8]. 高电荷态离子入射金属靶表面, 通过俘获靶导带电子, 释放所携带的大部分势能于金属表面^[9], 使靶原子或离子激发, 产生这些靶原子或离子受激辐射特征光谱线. 低速高电荷态离子 $^{126}\text{Xe}^{30+}$ 入射金属 Ni 表面, 通过俘获 Ni 导带电子, 释放其所携带的势能于 Ni 表面, 由于库仑激发, 使 Ni I 或 Ni II 处于复杂的电子组态的激发态 (如 $3d^8(^3F)4s4p(^3P^o)$, $3d^9(^2D_{5/2})4d$ 等), 然后通过电偶极跃迁、电偶极禁戒跃迁 E2 和磁偶极跃迁 M1 通道退激辐射.

在表 1 中, 列出了我们测量到的 Ni I 和 Ni II 被高电荷态离子 $^{126}\text{Xe}^{30+}$ 激发的电偶极跃迁的 200—1000nm 的特征光谱线. Ni I 的谱线从 205.52nm 到 820.17nm, 从对应跃迁的电子组态和态项可以看出, 这些特征光谱线是原子复杂组态的跃迁, 组态相互作用既有 LS 耦合 (如态项 3F), 又有 $J'l$ 耦合 (如态项 $[\frac{5}{2}]$). Ni II 的谱线有三条, 上能级都是同一组态 $3d^8(^3F)4s$ 的不同谱项, 下能级也是同一组态 $3d^8(^3F)4p$ 的不同谱项. 特别是 Ni I 从基态 $3d^8(^3F)4s^2$ 向激发态 $3d^9(^2D)5p$ 和 $3d^8(^3F)4s4p(^3P^o)$ 电偶极跃迁辐射两条谱线, 向能级 $3d^8(^1D)4s^2$ 电四极和磁偶极跃迁的一条谱线, 由于 Ni 原子的第一激发能很低, 0.025eV, 同一电子组态形成的不同谱项间隔较大, 基态电子组态形成的较高能量原子态高于第一激发电子组态形成的较低能量原子态^[10], 因此, 在高电荷态离子 $^{126}\text{Xe}^{30+}$ 轰击的特殊激发方式下, 出现了 205.25nm 和 409.38nm 电偶极跃迁的光谱线和偶极禁戒跃迁 E2 和 M1 跃迁的 820.17nm 光谱线, 其跃迁如图 3 所示.

对于高电荷态离子入射 Ni 金属表面, 俘获导带电子, 使 Ni 原子激发和离化, 这种过程涉及大量的多电子激发, 在多电子激发情况下, 常有两个或多个

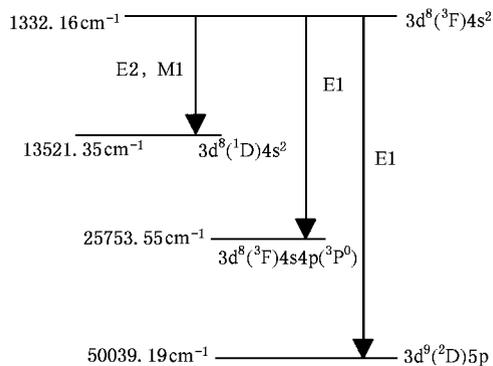


图 3 高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 轰击 Ni 表面, Ni 原子受激辐射跃迁的示意图. 其中两个条是偶极 E1 跃迁, 另一条是偶极禁戒 E2 和 M1 跃迁

组态之间相互作用, 电子的实际波函数是多个组态波函数的叠加, 即组态相互作用 (configuration interaction), 这给 Ni 的特征光谱线的研究带来许多困难. 然而, Ni I 和 Ni II 偶极禁戒跃迁, 特别是 E2 和 M1 跃迁的光谱线, 在天体物理中发挥着重要作用. 因而, 近年来, 有许多工作集中于此^[6, 11, 12]. 表 2 列出了本次实验测量到的 Ni I 和 Ni II 偶极禁戒跃迁 E2 和 M1 跃迁的特征光谱线, 其中 Ni I 的 534.83nm 和 819.43nm, 是同一能级 $3d^9(^2D)4s$ 向能级 $3d^8(^1G)4s^2$ 和 $3d^8(^3P)4s^2$ 跃迁的两条谱线, 跃迁类型分别为 E2, M1 和 E2, 跃迁概率最近由 Quinet 和 Dourneuf 用 HFR (relativistic Hartree-Fock) 和 SST (Superstructure) 理论计算出来, 分别为 6.87s^{-1} 和 4.98s^{-1} (HFR 计算值), 6.68s^{-1} 和 5.39s^{-1} (SST 计算值). 684.84nm 对应的两个能级 $3d^8(^3F)4s$ 和 $3d^8(^3P)4s$ 的跃迁概率为 5.2s^{-1} (HFR 计算值), 4.92s^{-1} (SST 计算值)^[6].

Ni I 的 820.17nm 是 $3d^8(^3F)4s^2$ 向 $3d^8(^1D)4s^2$ 的跃迁, Ni II 的 543.12nm, 684.84nm 和 870.33nm 是同一能级 $3d^8(^3F)4s$ 向 $3d^8(^3P)4s$ 和 $3d^8(^1D)4s$ 跃迁, 这些跃迁都是电子组态相同而原子态 (态项) 不同的偶极禁戒跃迁.

从偶极跃迁和禁戒跃迁的能级可以看出, Ni II 的跃迁多数来自 $3d^8(^3F)4s$ 能级, 且谱线较强, 例如能级 $3d^8(^3F)4s$ 和 $3d^8(^3P)4s$ 电四极跃迁概率仅为 5.2s^{-1} , 而其谱线 684.84nm 最强. 根据 Ni 原子的结构, Ni 原子 ($3d^8(^3F)4s^2$) 容易失去一个 4s 的电子变成 Ni 离子 ($3d^8(^3F)4s$), 当高电荷态离子入射 Ni 表面, 俘获电子, 沉积势能, 产生大量的 Ni 离子 ($3d^8(^3F)4s$), 进而通过偶极跃迁和禁戒跃迁辐射 200—

1000nm 范围内的光.

5. 结 论

一般地,光激发或单电子激发,很难产生原子或离子的偶极禁戒跃迁光谱线.用电荷态足够高的离子作光谱激发源,无需很强的束流强度,便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.高电荷态离子 $^{129}\text{Xe}^{30+}$ 轰击 Ni 表

面,由于多电子过程使得 Ni I 和 Ni II 激发,产生了 Ni I 和 Ni II 偶极禁戒的电四极跃迁 E2 和磁偶极跃迁 M1 的特征光谱线,特别是电子组态相同而原子态不同的偶极禁戒跃迁光谱线而且 Ni II 的 684.84nm 谱线较强.

衷心感谢兰州重离子加速器国家实验室 ECR 源全体人员的有效合作.

-
- [1] Burgdörfer J , Lerner P and Meyer F W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 5674
- [2] Machicoane G A *et al* 2002 *Phys. Rev. A* **65** 042903
- [3] Winter H and Aumayr F 1999 *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* **32** 39
- [4] Zhang X A *et al* 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1372
- [5] Zhao Y T *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2768 (in Chinese) [赵永涛等 2003 物理学报 **52** 2768]
- [6] Quinet P and Le Doumeuf M 1996 *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **119** 99
- [7] Zhang X A *et al* 2003 *Science in China G* **33** 234 (in Chinese) [张小安等 2003 中国科学 G **33** 234]
- [8] Chu S L 1979 *Atomic physics* (Beijing : Higher Education Press) p165 (in Chinese) [褚圣麟 1979 原子物理学 (北京 : 高等教育出版社) 第 165 页]
- [9] Schenkel T *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **22** 4273
- [10] Xu K Z 2000 *Advanced Atomic and Molecular Physics* (Beijing : Science Press) p146 (in Chinese) [徐克尊 2000 高等原子分子物理学 (北京 : 科学出版社) 第 146 页]
- [11] Litzen U , Brault J W and Thorne A P 1993 *Phys. Scr.* **47** 628
- [12] Pickering J C *et al* 2000 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **319** 163

Atomic and ionic light emission spectra of dipole transition and forbidden transition induced by the impact of $^{126}\text{Xe}^{30+}$ on Ni solid surface *

Zhang Xiao-An^{1,2)} Zhao Yong-Tao^{1,2)} Li Fu-Li¹⁾ Yang Zhi-Hu Xiao Guo-Qing²⁾ Zhan Wen-Long²⁾

¹⁾*Department of Applied Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

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

(Received 29 December 2003 ; revised manuscript received 16 February 2004)

Abstract

The measurement of light spectrum of Ni I and Ni II with wavelengths from 200 to 1000nm emitted from the solid surface of Ni, which is excited by slow highly charged ions $^{126}\text{Xe}^{30+}$, 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 result shows especially that the characteristic spectral lines from forbidden transition (M1 and E2) of Ni I and Ni II can be effectively excited.

Keywords : spectrum , forbidden transition , configuration , highly charged ion

PACC : 3400 , 3450D

* Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10134010), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10274058 , 10274088).