

高电离态 Ti 原子 EUV 光谱的实验研究*

杨治虎^{1)†} 杜树斌²⁾ 曾宪堂²⁾ 任守田²⁾ 宋张勇¹⁾ 苏 弘¹⁾ 王友德¹⁾

1) 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

2) 中国原子能研究院, 北京 102413)

(2005 年 8 月 11 日收到, 2005 年 11 月 14 日收到修改稿)

在中国原子能研究院 HI-13 串列加速器上用束-箔技术完成了 80 MeV Ti 离子和 C 箔相互作用产生的高电离态离子谱观测, 与用激光等离子体技术的实验结果做了比较, 大多数谱线与激光等离子体技术的实验结果有较好的符合, 有 3 条谱线是未观测到的. 这几条谱线为 $X_{VIII} 13.406$, $X_{VIII} 14.987$, $X_{VIII} 17.439\text{nm}$, 属于 $2s2p^2\ ^4P_{3/2} - 2p^3\ ^2D_{3/2}$, $2s2p^2\ ^1S_0 - 2sp^3\ ^1P_1$, $4p\ ^1P_0 - 5d\ ^1P_1$ 跃迁.

关键词: 串列加速器, 高电荷态原子, 激发光谱

PACC: 3220J, 3450H, 3220R, 3220N

1. 引 言

任何元素的任何光谱原则上都可以利用带有合适能量的离子与固体靶相互作用而获得. 类氢(H-Like)、类氦(He-Like)和类锂(Li-Like)铀的光谱已在 Berkeley, Caen 和 Darmstadt 实验室研究了^[1,2], 而基于大量的中等重量的元素和不同电离态的光谱研究得很少. 高电离态离子的光谱研究不仅在研究高电离态原子本身方面, 而且在 X 射线激光, 惯性约束聚变和磁约束聚变, 天体和等离子体物理研究中有重要的研究意义和广泛的应用价值. 等离子体中高电离态离子光谱一直作为等离子体状态诊断的重要工具被广泛应用, 因此测量和提供精确的高电离态原子光谱数据显得尤为重要. 我们曾报道过基于加速器的类氢、类氦、类锂 Ne 和类铍、类硼、类碳 Ar 原子光谱和相关一些能级寿命, 以及能级结构的实验研究. 本文报道高电离态 Ti 离子光谱的实验研究结果. Ti 离子谱学的实验研究, 受加速器的加速离子能量和离子种类的限制, 很少有较高能量的研究, 较高能量的高电离态 Ti 离子光谱数据很缺乏. Ti 元素的高电离态离子的光谱数据大都是用激光等离子体技术获得的, 不同实验设备和技术的实验研究结果进行比较, 对于进一步确定高电离态原子光谱数

据, 研究等离子体发光状态是非常有意义的.

2. 实验方法

实验是利用中国原子能科学研究院 HI-13 重离子串列加速器提供的 Ti 离子束完成的. 实验为 80 MeV 能量的高电离态离子 Ti^{9+} 穿过 $25\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳箔, Ti^{9+} 离子与碳箔相互作用, 产生各种高电离态离子, 这些离子处在激发态, 在退激过程中辐射各种波段的光谱. 实验过程中的光辐射用装有每毫米 600 条刻线的 2.2m 掠入射 GIM-957 真空紫外单色仪在与束流成 90° 的方向分析和记录. 入射在靶箔上离子流强约为 130 nA, 通过靶箔的出射离子收集在 Faraday 筒中, 用于归一测量, 克服实验中加速器束流涨落对谱线强度的影响.

实验装置详细说明可见文献 [3,4]. 光谱测量是沿 Romland 圆逐点运动的探测器记录光谱的, 在这个实验中, 为了有一个理想的光谱分辨, 入射狭缝置于 $20\mu\text{m}$. 为了获得一个短的时间窗, 使光谱仪的入口靠近束流直径中心线 7.5mm, 这样短的时间窗对观测弱光非常有利. 实验中离子流偏小, 为了获得足够的光子数, 我们在归一测量中延长了数据点的测量时间, 观察区选在箔后靠近箔约 1cm 的地方. 光谱测量由计算机控制系统自动测量和记录, 在这实

* 国家自然科学基金(批准号:10274088, 10134010)资助的课题.

† E-mail: z. yang@impcas.ac.cn

验中光谱仪移动步长为 0.1mm. 控制探测器测量点的步进电机接收到一个触发信号后自动移动, 触发信号是由 Faraday 筒收集的电荷数达到人为的预置数后产生, 这个预置数作为光谱强度测量的归一值. 实验期间箔的位置、光子计数等实验数据都储存在计算机中, 可随时进行分析处理.

在实验中, 为了产生想要的电荷态, 只需选择合适的加束离子能量. 我们采用 Nikolaev 和 Dimitriev^[5] 的半经验公式估算. 这个公式适用 $Z \geq 16$ 元素, 其形式为

$$\bar{q} = Z \left\{ \left[\frac{0.067 M Z^{0.9}}{E} + 1 \right] \right\}^{-0.6}, \quad (1)$$

式中 Z 是入射离子的原子序数, E 是入射束能量, M 是入射离子的质量数, \bar{q} 是入射束通过碳箔后的平均电荷态. 利用这个公式计算出的电荷态, 由于离子与箔作用过程中有电子交换过程的存在, 实际用的能量要比计算的能量低些, 通过箔的出射离子的电荷态分布 $F(q)$ 近似为 Gauss 分布, 即

$$F(q) = (2\pi d^2)^{-1/2} \exp[-(q - \bar{q})^2 / 2d^2], \quad (2)$$

式中 d 为分布宽度

$$d = 0.5 \{ \bar{q} [1 - (\bar{q}/Z)^{10.6}] \}^{1/2}. \quad (3)$$

3. 实验结果

我们的实验测量扩展了文献 [6, 7] 中基于加速器 Ti 离子的高电离态离子光谱实验研究, 文献中的实验研究都是在低于 30MeV 能量下进行的, 跃迁谱线的离子电荷态一般在 Ti VIII 或低于 Ti VIII. 本实验测量谱线的离子电荷态扩展到了更高电离态, 实验数据分析依靠激光等离子体的实验结果.

图 1 是能量在 80MeV 下实验观测到的部分光谱, Y 轴代表束流归一强度计数, X 轴代表探测器在 Romland 上移动位置, 用道数表示. 离子与箔相互作用, 不仅电荷态发生了变化, 而且激发的电子布居在许多高能级上, 退激跃迁形成复杂谱线. 大量的测量谱线要结合能级图和跃迁概率的基本资料, 并结合能级结构的理论计算提供的数据进行综合分析. 我们根据手中已有资料和对数据的分析, 已鉴别出高电离态 Ti 的 35 条谱线, 这些谱线主要是类 Bc (XIX) 类 Bc (XVIII) 类 Cc (XVII) 类 Nc (XVI) 类 Cc (XV) 离子的跃迁谱线, 大都属于 $n=2, \Delta n=0$ 的允许电偶极跃迁. 更高电离态离子的谱线未观测到, 主要原因是离子的电离度高, 波长短. 光谱仪和探测器 (通道电子倍增器) 在软 X 射线区域探测效率很

低. 实验中要保证较好的分辨, 不可能通过增加光谱仪狭缝宽度, 增加光谱仪探测效率. 我们实验研究的目的是在较高分辨下测量和识别新的高电离态 Ti 离子谱线, 并与激光等离子体实验结果比较, 得到高精度和可信度的可靠实验数据.

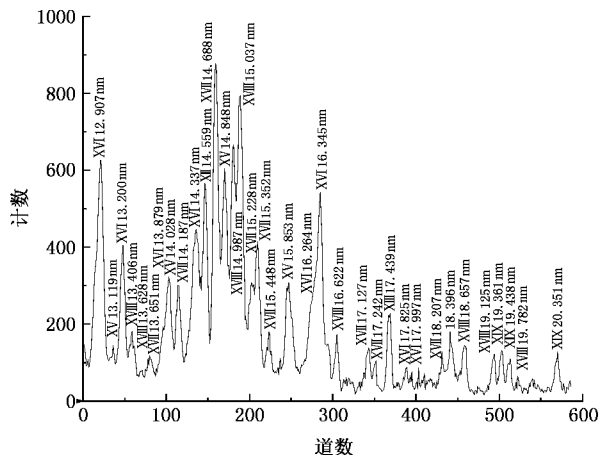


图 1 80MeV 硫离子通过碳膜后的光谱分布图

我们的实验数据分析, 选择了激光等离子体实验数据, 并与其比较. 用激光等离子体技术获得的光谱数据, 很大程度上依赖理论去鉴别和分析. 束箔技术不受粒子干扰和等离子体膨胀影响, 也不产生异常能级, 可用已知的单一谱线鉴别其他谱线或新谱线. 我们用这种技术测量了波长低于 300Å 的光谱线. 本实验数据与激光等离子体技术获得的数据符合, 一些谱线波长非常接近. 在实验数据分析处理中, 光谱分析相对较简单, 因为在我们的实验光谱中含有大量的和激光等离子体符合好的已知高电离态 Ti 离子谱线, 在谱线波长或新谱线波长确定时, 这些谱线可以作为本实验的参考谱线和标定谱线. 我们选择类 Cc (XVII) 的 $2s^2 2p^2 - 2s 2p^3$ 和 $2s^2 2p^2 \ ^3P_0 - 2s 2p^3 \ ^3P_1$, 以及类 Bc (XVIII) 的 $2s 2p^2 \ ^4P_{3/2} - 2p^3 \ ^4S_{3/2}$ 跃迁的较强谱线作为 80 MeV 能量下的参考谱线对这实验测量谱线波长进行标定, 然后对光谱采用了 Gaussian 和最小二乘法拟合处理, 对未见文献报道的跃迁增加了等电子序外推方法的鉴别. 在数据分析中, 确定出谱线位置的不可靠性为 0.1Å, 较强或较高强度的谱线不可靠性为 0.006nm. 在光谱图中对有一些靠近和混合谱线, 用核物理中的解 γ 谱程序来分解处理, 混合谱线的不可靠性为 0.04nm, 没有超出这个实验中的光谱分辨范围. 表 1 列出本实验数据分析结果与激光实验和一些理论结果, 表中

的理论结果是 Edlén Beng^[12]和 Hibbert^[13]用 MCDF 和 HFR 理论方法计算结果,理论和实验之间的误差最大没有超过 0.034nm.在这些光谱数据中,大多数是 $2s2p^3$ 的能级跃迁谱线.表中第二栏的本实验波长

13.406,14.987,14.439nm 的跃迁还未见到文献报道.这 3 条谱线被认为是本实验中观测到的谱线和确定的跃迁,属于 $2s2p^2 4P_{3/2}—2p^3 2D_{3/2}$, $2s2p^2 1S_0—2sp^3 1P_1$, $4p^1 P_0—5d^1 P_1$ 跃迁.

表 1 Ti 的高电态离子光谱线

离子	波长/nm			跃迁能级
	本实验	激光实验 ^[8-11]	理论 ^[12,13]	
XVI	12.907	12.9075		$2s2p^4 2D_{3/2}—2p^5 2P_{1/2}$
XV	13.119	13.112		$2s^2 2p^4 1S_0—2s2p^5 1P_1$
XVI	13.200	13.2022		$2p^5 3d^1 P_1—2s2p^6 3d^1 D_2$
XVIII	13.406		13.4068	$2s2p^2 4P_{3/2}—2p^3 2D_{3/2}$
XVIII	13.628	13.6280		$2s^2 2p^2 P_{1/2}—2s2p^2 P_{1/2}$
XVII	13.651	13.6393		$2s^2 2p^3 3D_1—2p^4 3P_1$
XVI	13.879	13.8760		$2s^2 2p^3 2P_{3/2}—2s2p^4 2S_{1/2}$
XV	14.028	14.034		$2s^2 2p^4 3P_2—2s2p^5 3P_2$
XVII	14.187	14.192		$2s^2 2p^2 1D_2—2s2p^3 1D_2$
XV	14.280	14.272		$2s^2 2p^4 3P_0—2s2p^5 3P_1$
XVI	14.337	14.3459		$2s2p^3 2D_{3/2}—2s2p^4 2D_{3/2}$
XII	14.559	14.57		4p—6d
XVII	14.688	14.6856		$2s^2 2p^2 3P_0—2s2p^3 P_1$
XV	14.848	14.854		$2s^2 2p^4 3P_1—2s2p^5 3P_2$
XVIII	14.987			$2s^2 p^2 1S_0—2sp^3 1P_1$
XVIII	15.037	15.015	15.0176	$2s2p^2 2D_{3/2}—2p^3 2P_{3/2}$
XVII	15.228	15.2174		$2s^2 2p^2 3P_1—2s2p^3 3P_2$
XVII	15.352	15.350		$2s^2 2p^2 3P_1—2s2p^3 3P_1$
XVII	15.426	15.4133		$2s^2 2p^2 3P_1—2s2p^3 3P_0$
XVII	15.853	15.8469		$2s^2 p^2 3P_2—2s2p^3 3P_2$
XVI	16.264	16.2503		$2s^2 2p^3 2P_{1/2}—2s2p^4 2D_{3/2}$
XVI	16.345	16.3410		$2s2p^4 2P_{3/2}—2p^5 2P_{1/2}$
XVIII	16.622	16.6225		$2s2p^2 4P_{3/2}—2p^3 4S_{3/2}$
XVII	17.127	17.109		$2s^2 2p^2 3P_2—2s2p^3 3P_2$
XVII	17.235	17.2380		$2s^2 2p^2 3P_0—2s2p^3 3D_1$
XIII	17.439			4p ¹ P ₀ —5d ¹ P ₁
XVI	17.825	17.8240		$2s2p^4 2P_{3/2}—2p^5 2P_{3/2}$
XVIII	17.997	17.9902	17.987	$2s^2 2p^2 P_{1/2}—2s2p^2 D_{5/2}$
XVII	18.207	18.2072		$2s^2 2p^2 3P_1—2s2p^3 3D_2$
XVIII	18.657	18.686		$2s^2 2p^2 2D_2—2s2p^3 2D_2$
XVIII	19.125	19.123		$2s2p^2 2D_{3/2}—2p^3 2D_{3/2}$
XIX	19.361	19.354		$2s2p^3 P_0—2p^2 3P_1$
XIX	19.438	19.4361		$2s2p^1 P_1—2p^2 1S_0$
XVIII	19.782	19.7838		$2s^2 2p^2 P_{3/2}—2s2p^2 D_{5/2}$
XIX	20.351	20.3422		$2s2p^3 P_2—2p^2 3P_2$

在我们的数据分析中, Doppler 效应没有忽略. 在测量中 Doppler 展宽和位移十分明显, 我们按照文献 [1] 进行了修正, 而 Doppler 展宽不可以消除, 并且限制了波长测量精度. 另外, 从图 1 看出, 在我们的观测范围有较强的本底噪声, 并且波长越短, 噪声越强. 这种噪声是电子倍增器的高压吸引束流电子产生的, 实验测量中探测器靠近单色仪狭缝越近, 噪声增加的越高. 实验中较强的本底噪声可归于高速离子速度和我们的观测设置, 在束-箔光谱学实验研究中, 这个问题带有一定的共性, 这种噪声对弱谱线影

响较大, 谱线越弱, 误差越大. 图 1 中刚超过本底的弱谱线, 在分析和进行处理中没有被考虑.

在分析中考虑了实验测量中各种因素, 例如没有良好的地线而产生的干扰信号对测量值的影响和电子倍增器的高压吸引束流电子产生的这种噪声对弱谱线引起的误差, 经分析和激光等离子体技术测量比较, 认为, 本实验结果的不可靠性低于 0.08 nm.

作者感谢中国原子能研究院 HI-13 MV 串列加速器上的运行人员提供有效的离子束.

- [1] Munger C T, Gould H 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 927
 [2] Scheweppe J, Belkacem A, Blumenfeld J *et al* 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 434
 [3] Zeng X T, Li J W, Hu A D *et al* 1998 *J. At. Mol. Phys.* (Supp.) **8**(in Chinese) 曾宪堂、李景文、胡爱东等 1998 原子与分子物理学报, 增刊 81]
 [4] Yang Z H, Du S B, Zeng X T *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 953
 [5] Nikolaev V, Dimitriev I 1968 *Phys. Lett.* **28A** 277
 [6] Tröbert E 1984 *Z. Phys. A.* **319** 25

- [7] Jupén C 1988 *Instr. Phys. Rev.* **B31** 166
 [8] Kaufman V, Sugar J, Copper D 1982 *Phys. Scr.* **26** 163
 [9] Sugar J, Kaufman V, Copper D 1982 *Phys. Scr.* **26** 189
 [10] Sugar J, Kaufman V, Copper D 1982 *Phys. Scr.* **26** 293
 [11] Fawcett B C, Ridgeley A, Hatter A T 1980 *J. Opt. Am.* **26** 293
 [12] Edlén B 1983 *Phys. Scr.* **28** 483
 [13] Hibbert A, Ledouneuf M, Mohan M 1993 *Atomic data and nuclear tables* **53** 23

Research on EUV spectra of highly ionized titanium^{*}

Yang Zhi-Hu^{1)†} Du Shu-Bin²⁾ Zeng Xian-Tang²⁾ Ren Shou-Tian²⁾ Song Zhang-Yong¹⁾ Su Hong¹⁾ Wang You-De¹⁾

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

2) *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*

(Received 11 August 2005 ; revised manuscript received 14 November 2005)

Abstract

The spectrum of highly ionized titanium was studied by means of the beam-foil technique. Titanium ions were provided by the HI-13 tandem accelerator at China Institute of Atomic Energy. The experimental results are compared with those of laser-produced plasmas. Numerous lines attributed to Ti XVI to XVIII transitions have been identified, and three of them were newly measured, which were attributed to $2s2p^2P_{3/2} - 2p^3D_{3/2}$, $2s2p^2S_0 - 2sp^3P_1$ and $4p^1P_0 - 5d^1P_1$ transitions.

Keywords : tandem accelerator, highly ionized atom, excited spectrum

PACC : 3220J, 3450H, 3220R, 3220N

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10274088, 10134010).

† E-mail : z. yang@impcas.ac.cn