

# 高剥离态 $^{74}\text{W}$ 软X射线谱半连续带研究

林 彬 周裕清 张保汉 杨国洪 李 军 亢 武  
(中物院北京研究生部) (中物院核物理与化学研究所, 成都 525 信箱 74 分箱, 610003)

**摘 要** 在星光—II激光装置上,用PET平晶谱仪观测了 $^{74}\text{W}$ 高离化度激光等离子体软X射线发射谱,波长范围是0.36~0.52nm。准确测量和辨认了 $3d_j - nf_j (n=5, 6)$  4条类Ni共振线及附近类Cu、类Zn、类Ga和类Ge几个电离级16个半连续带结构谱。实验谱波长测量误差小于0.0005nm,与用相对论自旋轨道劈裂跃迁组(SOSA)模型(不可分辨跃迁组(UTA)特例)和 $X_\alpha$ 法理论计算结果符合很好。首次提迭加峰平均波长与离子离化度间关系式。实验和理论数据对等离子体诊断等研究有重要应用价值。

**关键词**  $^{74}\text{W}$  高离化度 半连续带 SOSA UTA  $X_\alpha$ 法

**ABSTRACT** On the Xingguang II laser facilities the soft X-ray spectra of a laser-produced plasma of highly ionized  $^{74}\text{W}$  in the wavelength range 0.36~0.52nm were investigated with a plane crystal spectrograph. Four  $3d_j - nf_j (n=5, 6)$  resonance lines in Ni-like ions, as well as sixteen broad, characteristic, pseudo-continuous transition bands in Cu-, Zn-, Ga- and Ge-like ions, were measured and identified accurately. The wavelength precision is  $\pm 0.0005\text{nm}$ . The relativistic Spin-Orbit-Split Arrays (SOSA) model, a particular case of Unresolved Transition Arrays (UTA), and the  $X_\alpha$  method support this analysis. The succinct formulas of the mean wavelength vs the ionized stage were achieved first. The data of the experiment and the calculation have important uses for plasma diagnostics etc.

**KEY WORDS**  $^{74}\text{W}$ , highly ionized, pseudo-continuous band, UTA, SOSA,  $X_\alpha$

## 0 引 言

用于制作弹丸壳层的高Z元素(如钨、金等),是Tokamaks中重要的杂质元素,有关高Z元素高离化度离子发射谱的数据,在惯性约束聚变的等离子体诊断学中具有重要意义,但是有关信息却知之甚少<sup>[1]</sup>。对激光产生的高Z元素高离化度等离子体软X射线发射谱的研究,是获得这些信息的重要手段,也是当前分子原子物理学的研究前沿。它的实验和理论数据,是检验原子结构理论计算模型和程序迫切需要的依据,尤其是连续或半连续带结构数据,更是核爆模拟、惯性约束聚变中等离子体诊断、X光激光以及磁约束高温聚变等离子体物理等应用学科的研究基础,对等离子体中辐射输运机制等领域的研究也具有重要的应用价值。

八十年代,国外学者发表了一些高Z元素离子谱数据。Tragin等<sup>[2]</sup>分析了Ta-Pb等七种元素类Ni共振线及附近 $3d - nd (n=4, 5, 6)$ 和 $3p - np (n=4, 5)$ 半连续结构谱。但是对 $^{74}\text{W}$ ,数据极为缺乏。

我们用理论和实验方法分析了高Z元素 $^{74}\text{W}$ 高离化度等离子体软X射线发射谱,重点研究了发射谱波长在0.36~0.52nm范围内 $3d - nf (n=5, 6)$ 类Ni共振线跃迁及其附

近长波段类 Cu、类 Zn、类 Ga 和类 Ge 几个电离级伴线结构和谱特征,并根据国外这一领域的最新进展<sup>[3-5]</sup>,对发射谱中半连续带结构进行了深入探索。

## 1 实验技术和数据处理方法

在星光—II 激光装置上,用强激光聚焦照射真空室内<sup>74</sup>W 平面固体靶表面,形成高剥离态热等离子体源。靶面激光功率密度约为  $2 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$ ,靶为高纯度(99.99%)W 箔,厚度约为  $40 \mu\text{m}$ 。激光能量为 50~100J,脉宽为 600~800ps,焦斑直径为 100~150 $\mu\text{m}$ 。用 PET 平晶谱仪( $2d = 0.8742 \text{nm}$ )记录了 0.36~0.52nm 波长范围内软 X 射线谱,观测到了十分丰富极有特征的线跃迁和半连续带结构的混合谱。

记录的胶片经冲洗后,用 3CS 黑密度计扫描,形成黑度—位置数据文件。用离散函数褶积滑动变换法光滑谱数据,用对称零面积变换法寻找峰的位置(变换函数均为含有参数的高斯函数),然后进行实验谱的波长计算。为了提高精度,采用分析法和分段至少二次多项式拟合法相结合的方法,使得波长计算误差,在 0.36~0.52nm 波长范围内,对单强峰小于 0.0002nm,对弱或宽峰小于 0.0005nm。同时获得了实验谱相对强度和半最大全宽度(FWHM)数据。实验谱如图 1 上面的曲线所示。强峰的特征数据如表 1 所示。

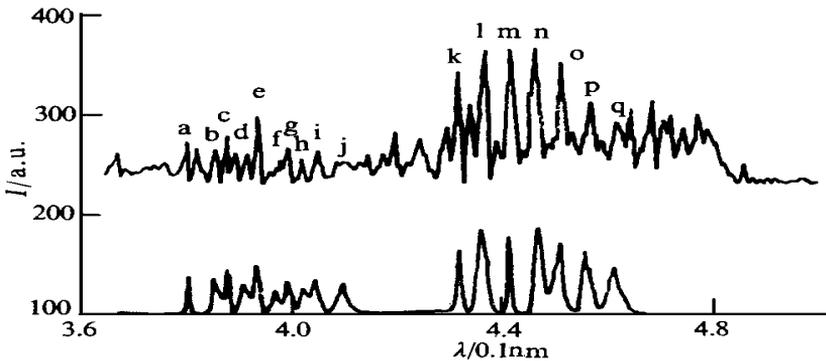


Fig 1 The mixed soft X ray spectra of 3d- 5f, 6f transitions in highly ionized W

图 1 <sup>74</sup>W 高剥离态离子软 X 射线发射线谱 3d- 5f 和 3d- 6f 混合结构

在高 Z 元素<sup>74</sup>W 高离化度等离子体中,各种电离度、激发态离子并存,众多线跃迁相互重叠交替;重离子中,能级自旋轨道劈裂十分显著,甚至超过了静电总结构分离;由于多个旁观电子的存在,众多能级十分接近,汇成了各种展宽的峰;再加上各种物理展宽效应(如 Stark 效应、Doppler 效应、等离子体自吸收和碰撞展宽等)和仪器有限的分辨率,除极个别线跃迁谱峰是分立的,其余的一组组密集的线群迭加在一起,形成了半连续带结构谱,辨认十分困难。

## 2 理论计算方法和内容

对高 Z 元素<sup>74</sup>W 高离化度离子谱中类 Ni 共振线跃迁的分析和辨认,主要依据原子结构理论计算结果。本文采用  $X_{\alpha}$  法<sup>[6]</sup>解非相对论薛定格方程,得到非相对论径向波函数、径向 Slater 积分和组态平均能。 $X_{\alpha}$  法是基于统计平均交换势计算原子结构的方法,精度接

近 Hartree- Fock 法. 相对论效应作为一级微扰处理, 微扰中包括质量—速度修正,  $D_{av}$  in 修正和自旋轨道相互作用<sup>[7]</sup>。

表 1 <sup>74</sup>W XL VII 至<sup>74</sup>W XL III 离子 3d- 5f, 3d- 6f 混合谱平均波长和半最大全宽度(单位: 0.1nm)

Table 1 The mean wavelengths & FWHMs of the 3d- 5f, 3d- 6f mixed spectra in <sup>74</sup>W XL VII through <sup>74</sup>W XL III (unit: 0.1nm)

transition		ion type	mark	ours work		Zigler	Y. Zhou
3d- nf	j- j			$\lambda_{exp}$ (FWHM)	$\lambda_{cal}$ (FWHM)	$\lambda_{exp}$	$\lambda_{exp}$ (FWHM)
3d- 6f	3/2- 5/2	NiII	a	3 798(0.013)	3 804(0.006)	3 803	3 798(0.008)
	3/2- 5/2	CuI	b	3 851(0.016)	3 857(0.016)	3 855	3 853(0.012)
	5/2- 7/2	NiII	c	3 872(0.011)	3 874(0.006)	3 879	3 875(0.010)
	3/2- 5/2	ZnI	d	3 911(0.024)	3 911(0.021)	3 909	3 910(0.010)
	5/2- 7/2	CuI	e	3 932(0.011)	3 932(0.019)	3 932	3 933(0.010)
	3/2- 5/2	GaI	f	3 971(0.013)	3 965(0.017)	3 959	3 972(0.012)
	5/2- 7/2	ZnI	g	3 988(0.013)	3 987(0.023)	3 988	3 986(0.012)
	3/2- 5/2	GeI	h*	4 016(0.014)	4 018(0.019)		
	5/2- 7/2	GaI	i	4 045(0.013)	4 044(0.018)	4 046	4 045(0.012)
	5/2- 7/2	GeI	j*	4 099( ? )	4 100(0.018)	4 103	
3d- 5f	3/2- 5/2	NiII	k	4 311(0.013)	4 311(0.006)	4 311	4 311(0.012)
	3/2- 5/2	CuI	l	4 358(0.016)	4 359(0.020)	4 358	4 358(0.014)
	5/2- 7/2	NiII	m	4 408(0.015)	4 409(0.006)	4 409	4 407(0.013)
	3/2- 5/2	ZnI	m	4 408(0.015)	4 408(0.022)		
	5/2- 7/2	CuI	n	4 458(0.017)	4 459(0.024)	4 458	4 457(0.014)
	3/2- 5/2	GaI	n	4 458(0.017)	4 457(0.020)		
	5/2- 7/2	ZnI	o	4 509(0.018)	4 509(0.025)	4 508	4 507(0.013)
	3/2- 5/2	GeI	o	4 509(0.018)	4 506(0.020)		
	5/2- 7/2	GaI	p	4 562(0.019)	4 560(0.019)	4 561	4 562(0.018)
	5/2- 7/2	GeI	q	4 614(0.023)	4 610(0.023)	4 616	4 611(0.018)

对半连续带结构谱, 实验上已经无法将其中包含的经跃迁逐一区分开来. 此时, 详细计算所有线跃迁的传统办法, 不仅工作量大, 也没有必要. 为此, 近年来 C. Bauche- Arnoult 等人提出不可分辨跃迁组(UTA)理论和相对论自旋轨道劈裂跃迁组(SOSA)模型<sup>[3- 5]</sup>. 一个不可分辨跃迁组就是一个带, 即两个电子组态间所有线跃迁的总和. 一个自旋轨道劈裂跃迁组是自旋轨道劈裂后两个次组态间所有线跃迁的总和, 也称为一个带. 用跃迁能的权重强度分布来描述这种跃迁组, 两个特征量是平均波数  $T_{av}$  和标准方差  $\sigma^2$ . 取高斯线型描述谱峰, 跃迁带半最大全宽度  $FWHM = 2.355\sigma$ , 平均波长  $\lambda = 1/T_{av}$ .

我们用  $X_{\alpha}$  法计算了非相对论电子组态的径向 Slater 积分, 再用 Bauche 给出的  $(nlj)^{N+1} - (nlj)^N n l j$ 、 $(nlj)^N n l j - (nlj)^N n l j$  和  $(nl)^N n l j - (nl)^N n l j$  类型跃迁带  $\sigma^2$  和  $\Delta E$  计算公式, 结合相对论效应, 得到了类 Cu 到类 Ge 离子  $3d^{10} - 3d_{j1}^N 3d_{j2}^N n f_j$  ( $n = 5, 6$ ) 跃迁带  $\lambda$  和  $FWHM$ . 按照局域热动力学平衡等离子体模型计算了跃迁带总跃迁强度  $KT$ . 这里取电子温度  $T = 700eV$ , 旁观电子均取  $4s$ 、 $4p$ 、 $4d$  和  $4f$  电子. 实验谱上每个可观测峰都是若干个 SOSA 的迭加. 一个类 Cu 离子  $3d_{j1} - n f_j$ , 峰是七个带迭加形成的, 类 Zn 的是 28 个, 类 Ga 的是 82 个, 类 Ge 的是 196 个. 为了与实验谱比较, 必须考虑其它物理效应和仪器等产生的实验宽度. 这里实验宽度  $h_{exp} = 0.0006nm$ , 是类 Ni  $3d_{3/2} - 5f_{5/2}$  共振线跃

迁在光谱上的宽度。跃迁带总宽度是两个高斯函数褶积的结果<sup>[8]</sup>。

用上述方法, 计算了<sup>74</sup>W 高离化度离子发射谱在 0.36~ 0.52nm 波长范围内  $3d^{10}-3d^{N1}3d^{N2}nf_j$  ( $n=5, 6$ ) 类  $Ni$  共振线跃迁波长及其附近类  $Cu$ 、类  $Zn$ 、类  $Ga$  和类  $Ge$  离子半连续带结构谱中包含的所有近 400 个  $SOSA$  的  $\lambda_{FWHM}$  和  $KT$ , 及其迭加后形成的 16 个半连续带结构谱的  $\lambda$  和  $FWHM$ 。

### 3 研究结果和分析讨论

根据上述计算结果, 对波长在 0.36~ 0.52nm 范围内<sup>74</sup>W 高离化度软 X 射线离子发射谱, 进行了分析辨认。

图 1 中, 上面的曲线是从实验上得到的<sup>74</sup>W 在 0.36~ 0.52nm 波长范围内的软 X 射线谱, 它由若干个孤立峰组成。比较每个迭加峰平均波长和半最大全宽度的实验值和理论计算值, 分析鉴别出图 1 中, 峰 a~ j 依次是<sup>74</sup>W 类  $Ni$  至类  $Ge$  离子若干个  $3d_j-6f_j$ ,  $SOSA$  迭加峰, 峰 k~ q 依次是<sup>74</sup>W 类  $Ni$  至类  $Ge$  离子若干个  $3d_j-5f_j$ ,  $SOSA$  迭加峰。峰 a、c、k 和 m 是类  $Ni$  离子共振线跃迁, 其中 m 是类  $Ni$  离子  $3d_{5/2}-5f_{7/2}$  线跃迁和类  $Zn$  离子  $3d_{3/2}-5f_{5/2}$  半连续带结构的重叠谱。其余是  $3d-nf$  ( $n=5, 6$ ) 半连续带结构谱。值得一提的是 h 和 j 峰, 它们是类  $Ge$  离子  $3d-6f$   $SOSA$  迭加形成的半连续带结构谱, 在本文中首次得到分析和辨认。所有强峰详细的实验和理论计算结果列在表 1 中。带\* 的是类  $Ge$  离子  $3d-6f$  半连续带结构谱。从中可以看出, 本文实验和理论结果以及与国内外已经发表的有关数据<sup>[9, 10]</sup>均符合得很好。

图 1 中下面曲线是理论计算谱, 其  $\lambda$  和  $FWHM$  与上面实验谱对应很好。由于相对强度除了与离化度、激发能态有关外, 还与实验条件, 如激光器的输出功率密度、等离子体碰撞机制等因素密切相关, 这里相对强度被取作自由参数。

对于同种类型跃迁带  $n l j- n l j$ , 不同离化度离子的峰是等间隔均匀分布的, 如图 2 所示。图中, 横轴是离子离化度, 纵轴是迭加峰平均波长, 实线表示理论值, \* 表示实验值, 它们呈直线分布。这种周期性结构是<sup>74</sup>W 高离化度离子谱波长在 0.36~ 0.52nm 范围内的典型特征。正是从这里得到启示, 将从头计算的理论值, 用最小二乘法做拟合直线, 它们分别是:  $3d_{3/2}-5f_{5/2}; y = - 0.0488x + 6.5553$ ;  $3d_{5/2}-5f_{7/2}; y = - 0.0502x + 6.7184$ ;  $3d_{3/2}-6f_{5/2}; y = - 0.535x + 6.2652$ ;  $3d_{5/2}-6f_{7/2}; y = - 0.0567x + 6.4820$ 。其中  $x$  是离子离化度,  $y$  是跃迁带迭加峰平均波长, 单位是 0.1nm。表 1 中理论计算平均波长就是根据这些公式计算的, 与实验测量值以及国内外已经发表的有关数据均符合得很好。

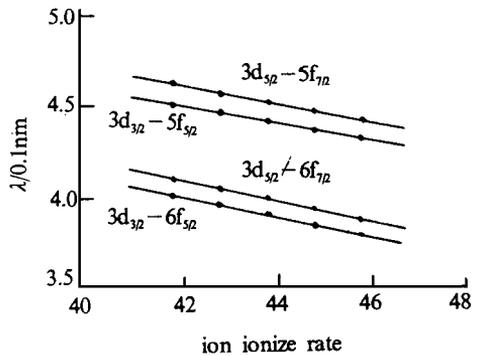


Fig. 2 Mean wavelength of  $3d-5, 6f$  superposition feature vs ionized stage in highly ionized <sup>74</sup>W

图 2 <sup>74</sup>W 高离化度离子  $3d-5f$  和  $3d-6f$  迭加峰平均波长- 离子离化度函数曲线

## 4 结束语

属于不同离化态  $3d_j-5f_j$  和  $3d_j-6f_j$  的峰是分离的, 可以用作确定高剥离态重离子离化度的方法; 通过比较半连续带结构谱与类 Ni 离子共振线跃迁的相对强度, 可以对等离子体电子温度等情况进行诊断; 利用这部分研究比较透彻的谱, 它相应的等离子体可以作为其它元素吸收谱研究的软 X 射线源。

进一步研究激光等离子体发射谱, 需要有关等离子体的详细信息, 如光学厚度、强度标准和时空分辨等情况, 以及更为详细的理论, 如考虑了径向碰撞的等离子体模型和用于诊断目的的强度研究。这些都是具有挑战性的新课题, 有待于今后深入细致的研究。

致 谢 实验得到激光器运行组全体工作人员以及制靶组常富华同志的支持, 在此深表谢意

## 参考文献

- 1 Martinson I *Rep Prog Phys*, 1989, **52**: 157
- 2 Tragin N. et al *Physica Scripta*, 1988, **37**: 72~ 82
- 3 Bauche C. et al *Phys Rev*, 1979, **A20- 6**: 2424
- 4 Bauche C. et al *Phys Rev*, 1982, **A25- 5**: 2641
- 5 Bauche C. et al *Phys Rev*, 1985, **A31- 4**: 2248
- 6 张志杰、赵伊君编著. 原子结构的计算, 科学出版社, 1987
- 7 褚圣麟编著. 原子物理, 北京: 高等教育出版社, 1984
- 8 林 彬. 硕士论文, 未发表, 1995
- 9 Zhou Y. et al *Phys Lett (to be Published)*, 1995
- 10 Ziegler A. et al *Phys Lett*, 1986, **117- 1**: 31~ 35

## ANALYSIS OF PSEUDO- CONTINUOUS BANDS OF SOFT X- RAY SPECTRA FROM A LASER- IRRADIATED HIGHLY IONIZED <sup>74</sup> W PLASMA

L in Bin, Zhou Yuqing, Zhang Baohan, Yang Guohong, Li Jun, and Kang Wu  
(*Institute of Nuclear Physics & Chemistry, CAEP, P. O. Box 525- 74, Chengdu, 610003*)

On the Xingguang II laser facilities a flat <sup>74</sup>W target was irradiated with a beam of a 50~ 100J, 600~ 800ps laser. The spectrum emitted from the laser- induced highly ionized <sup>74</sup>W plasma in the wavelength range of 0.36~ 0.52nm was recorded with a plane PET crystal spectrograph. The data of the spectrum were smoothed using the convolute sliding- conversion method with a dispersed function. The positions of the emitted peaks were found with the symmetric zero- area conversion method. The wavelengths were calculated with the analytic method and the at least binomial- fitting method. The relative intensities and the full widths at half maximum (FWHM) were obtained.

Using the X<sub>am</sub> method, relativistic correction (including the mass- speed effect, the Darwin effect and the spin- orbit interaction) and the spin- orbit- split transition arrays (SOSA) model, the wavelengths

of the  $3d-nf$  ( $n=5, 6$ ) resonance lines in Ni-like ions as well as the mean wavelengths, the FWHMs and the total intensities of pseudo-continuous transition bands Cu-, Zn-, Ga- and Ge-like ions, were evaluated. Here all 41 electrons were considered as "spectators".

The analysis and the identification of all those predominant features in the range  $0.36 \sim 0.52\text{nm}$  were achieved. The results of the model are in the excellent agreement with those of the experiment. We have got the succinct formulas of the mean wavelength vs the ionized stage of various types of packed peaks for each  $3d-nf$  ( $n=5, 6$ ) transition band.

These theoretical and experimental data are of important applications to nuclear fusion simulation, X-ray laser, plasma diagnostics, magnetic confine fusion, astrophysics and laboratory plasma physics.