

钽激光等离子体类镍和类钴离子谱线辨认*

王瑞荣**

(上海激光等离子体研究所 上海 201800)

【摘要】 采用聚焦石英弯晶谱仪测量钽(Ta)激光等离子体发射谱线, 得到了一维空间高分辨软 X 射线谱, 辨认了其类镍和类钴离子谱线。精确测量和准确辨认出类镍和类钴离子4f-3d的共振跃迁线, 给出了类镍钽离子簇波长和 $\lambda = 0.57646 \text{ nm}$ 是类钴离子4f-3d的共振跃迁线的实验结果, 其精确波长值的绝对误差小于 $5 \times 10^{-5} \text{ nm}$ 。

关键词 弯晶谱仪; 激光等离子体; 软 X 射线; 谱辨认

中图分类号 O433; O433.4;

高剥离态离子谱学在研究 X 射线激光、可控聚变、原子谱学和等离子体诊断等方面具有重要的学术意义和广泛的应用价值。近年来, 随着实验室多电荷离子源技术的发展, 特别是高功率激光器的出现, 为实验室研究等离子体(尤其是中、高 Z 元素)的 X 射线谱提供了有利条件, 同时为一些实用的 X 射线激光装置开发出一些重要的应用。因此, 高 Z 元素高剥离态离子的能级结构和光谱特性越来越受到重视。文献[1,2]表明: 部分高 Z 元素的类镍离子的某些跃迁已实现了软 X 射线放大。在原子结构理论计算方面, 相对论效应、量子电动力学效应以及组态相互作用等因素影响显著, 特别是在能级相近的组态计算中, 小量会造成大的计算误差。高 Z 元素类镍以上离子光谱的可靠理论数据比较少, 理论模型处于探索或完善阶段, 必须要有精确的实验数据来检验; X 射线发射谱携带了许多关于等离子体状态方面的信息, 线辐射强度和轮廓与等离子体密度和温度密切相关, 通过测量可推断等离子体的电子温度、电子密度等重要参数, 结合理论模型有助于搞清 X 光激光的物理机制。所以系统、精确地研究谱的结构和受激态全部机制等问题, 对等离子体诊断和激光等离子体的动力学研究具有深远的意义。

从80年代开始, 国外研究者相继发布了一些高 Z 元素高度电离的离子谱实验数据。Zigler 等测量和辨认了 Hf^{+44} 、 Ta^{+45} 、 W^{+46} 和 Re^{+47} 的4p、4f-3d 和4s、4d-3p 跃迁线^[3]。近十年来, 国内不少学者也发表了在实验室研究高度电离的等离子体的 X 射线谱的成果, 特别是文献[4]测量和辨认了上述元素的共振跃迁线, 发表了类镍离子谱的实验数据。R. Butzbach、H. Daido 等人在大阪大学激光工程研究所研制的“GEKKO XII”激光装置上, 利用高空间分辨率的石英弯晶谱仪, 测量和辨认到钽激光等离子体的类镍和类钴离子4f-3d的跃迁线^[5]。

本文利用“神光 II”强激光装置产生高度电离的钽激光等离子体, 研究其发射的软 X 射线谱的初步结果。为了提高软 X 射线谱的探测精度, 必须提高探测系统能量响应的单色性, 本实验采用石英弯晶谱仪, 测量波长在0.5~0.7 nm 范围内的谱线, 并对类镍和类钴电子序列的强跃迁线及其他跃迁线进行了分类和辨认, 并给出了软 X 射线区的类镍和类钴离子4f-3d 跃迁线的测量和分类结果。

1 谱线诊断系统的原理、基本设置与参数

谱线诊断系统的工作原理是基于 X 射线, 按布喇格-乌里夫条件, 从晶体上有选择地进行反射

$$m\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

2000年5月6日收稿

* 国家科委863高科技项目

** 男 36岁 硕士 助理研究员

式中 d 为晶体面间距； m 为衍射级； q 为掠射角。按照式(1)，晶体谱仪不能用来记录波长大于两倍晶面间距 $2d$ 的辐射，局限于短波谱段。

实验用靶为平面固体钽靶，采用装置的南四路中的第三路作为打靶激光。基频光打靶时，由于激光吸收与 X 射线转换均较低，因此，波长 $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$ 激光经 KDP 晶体倍频成 $0.53 \mu\text{m}$ 的激光， $0.53 \mu\text{m}$ 预-主脉冲激光经线聚焦后垂直照射平面厚靶，与靶作用产生等离子体，平面靶上的光束功率密度为 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ，脉宽约为 85 ps 。

实验装置如图1所示。弯晶谱仪是由 $35 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的石英弯晶作为衍射晶体，点阵面(1010)， $2d = 0.85 \text{ nm}$ 。晶体安装在泵浦激光水平方向成 42° 观测，离靶中心距离为 1162 mm ，离 CCD 的距离为 141.4 mm 。对这种晶体谱仪参数，布喇格中心衍射角的变化范围为 $42^\circ < q < 48^\circ$ 。X 射线在晶体中的反射只有同时满足反射定律和布喇格条件才能产生，而在其他方向和波长上没有反射光，考虑一级衍射，由式(1)可得到波段覆盖范围。晶体谱仪配有像素点大小为 $22.5 \mu\text{m} \times 22.5 \mu\text{m}$ 的 CCD 相机作为探测器，晶体与 CCD 之间放置2块 400 nm 厚的聚脂铝膜片，以便阻挡可见光，避免可见光造成 CCD 的饱和现象。考虑到系统误差，CCD 阵列的空间分辨率为 $88.7 \mu\text{m}$ ，放大倍数约为 9 倍，对应实物的空间分辨率约为 $9.8 \mu\text{m}$ 。

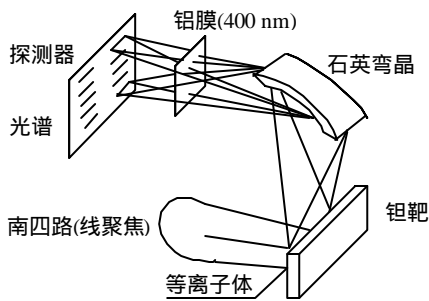


图1 谱仪实验布置

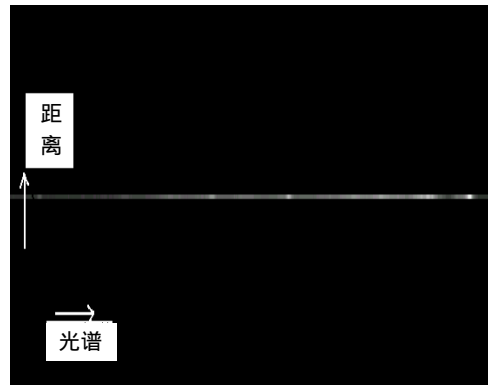


图2 CCD 相机摄的辐射光谱

2 谱线处理、波长计算及辨认

图2是 CCD 相机摄的钽激光等离子体的辐射谱，图3是空间积分辐射谱。将像素点换算成波长进行谱处理。在实际处理过程中，选取内标准波长作为参考，即尽量多地找出感兴趣元素的离子强跃迁线作为内标准波长，以自身特征线对钽激光等离子体 X 射线谱进行处理。像素点与波长之间经过线性变换，对钽激光等离子体的辐射线谱的波长进行了标定，波长标定最大绝对误差小于 $5 \times 10^{-5} \text{ nm}$ 。

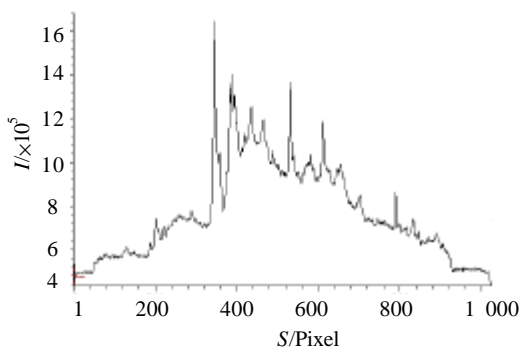


图3 空间积分辐射谱

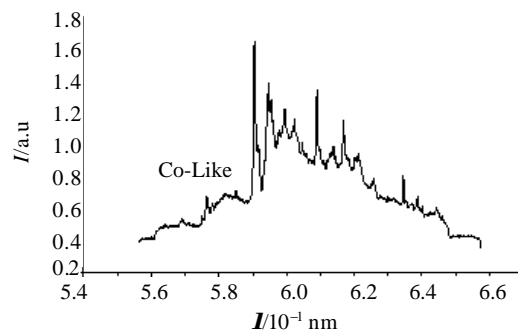


图4 钽等离子体的辐射线谱

图4是对测量得到的钽激光等离子体发射的 X 射线谱的波长标定, 波长标定和辨认结果与文献 [5]吻合较好。

3 结果和讨论

从图4可观察到相当丰富的高剥离态离子的跃迁线, 特别是对钽激光等离子体类镍和类钴离子谱线作了重点辨认和分类。表1给出了类镍钽离子簇波长的实验结果和理论计算值, 所有跃迁都是从 $J=1$ 能级到 $J=0$ 基态。图4和表1表明, 类镍离子谱中除可观测辨认到3条 $3d^9 4f-3d^{10}$ 共振跃迁线, 还观测辨认到 $3p^5 3d^{10} 4s-3p^6 3d^{10}$ 等内壳层跃迁线。对于高 Z 等离子体, 离子组态太复杂, 我们认为 $\lambda=0.576\ 46\ \text{nm}$ 是类钴钽离子的 $4f-3d$ 共振跃迁线, 为下一步的理论计算中提供了参考值。图4还显示出激光产生的钽等离子体的 X 射线发射谱以线谱为主。

表1 Ta 的类镍离子线跃迁的分类 波长单位: $\times 10^{-1}\ \text{nm}$

跃 迁	实验结果	理论计算
$3p^6 3d^{10}-3p^5_{3/2} 3d^{10} 4s_{1/2}$	6.345 4	6.366 0
$3p^6 3d^{10}-3p^6 3d^9_{5/2} 4f_{5/2}$	6.168 3	6.177 0
$3p^6 3d^{10}-3p^6 3d^9_{5/2} 4f_{7/2}$	6.090 1	6.091 0
$3p^6 3d^{10}-3p^6 3d^9_{3/2} 4f_{5/2}$	5.905 1	5.901 0

对高度电离的激光等离子体, 其等离子体 X 射线包括了多种不同电离阶离子的 X 射线谱。采用弯晶谱仪有效地利用了光源所发出的全部有用的光强度, 提高了对谱线的分辨能力, 实验给出了较可靠的测量结果。但是对其进行准确分类、辨认谱线还是一项复杂且难度较大的工作。为使谱线辨认结果的不确定性最小, 还需对高剥离度的几个相邻电荷态离子谱作系统研究, 尤其是类镍、类钴、类铜、类锌等电荷态的离子谱线, 并对几条混合跃迁线作重点处理。

为了提高泵浦效率, 人们不断寻找更优的泵浦机制和驱动方式, 采用类 Ni 离子系列代替类氖 (Ne)离子系列和预-主脉冲驱动方式, 都是行之有效的途径。本文对高电离钽激光等离子体离子谱线进行了实验研究。通过精确测量得出其发射的软 X 射线谱的初步结果, 并且辨认出高 Z 钽等离子体类镍类钴离子 $4f-3d$ 谱线, 为进一步推断等离子体的电子温度、电子密度等重要参数打下了基础, 也为讨论各种等离子体状态下 X 射线发射的特征、找出发射 X 射线的最佳等离子体状态提供实验了依据, 为驱动激光束质量的改善和 X 光激光实验的总体设计提供重要的参考数据。

感谢北京应用物理与计算数学研究所张覃鑫研究员和唐华泾博士对本文工作给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Maxon S, Hagelstin P, MacGowan B, *et al.* Calculation and design of a Ni-like Eu soft-x-ray laser. *Phys Rev*, 1988, (37): 2 227
- 2 MacGowan B J, Maxon S, Hagelstein P H, *et al.* Demonstration of soft-X-ray amplification in nickel-like ions. *Phys Rev Lett*, 1987, (59): 2 157
- 3 Zigler A, Zmoram H, Spector N, *et al.* Identification of the spectra of Hf_{XLV} , Ta_{XLVI} , W_{XLVII} , and $\text{Re}_{\text{XLVIII}}$ isoelectronic to Ni_i in laser-produced plasmas. *J Opt Soc Am*, 1980, (70): 129
- 4 周裕清, 张保汉, 杨国洪, 等. 高 Z 元素类镍离子谱研究. *物理学报*, 1994, (43): 1 623
- 5 Daido H, Kato Y, Butzbach R, *et al.* 4f-3d transition in Ni and Co-like ions of Ta and Re. *Inst Phys Conf Ser*, 1999, (159): 463

(下转第65页)

参 考 文 献

- 1 Leveson N G, Shimeall T J, *et al.* Design for safe software. In Proceedings AIAA Space Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1983
- 2 Rushby J. Kernels for safety? Safe And Secure Computing Systems Symposium. London: Blackwell Scientific Publications, 1989: 210~220
- 3 周世杰, 秦志光, 耿 技. 办公自动化系统中的安全性. 电子科技大学学报, 2000, 29(2):201~204
- 4 King R. Safety kernel enforcement of software safety policies: [Doctor's Thesis]. USA: University of Virginia, 1995
- 5 蒋继洪, 黄月江. 计算机系统、数据库系统和通信网络的安全与保密. 成都:电子科技大学出版社, 1995
- 6 雷 航, 熊光泽, 刘锦德. 基于任务模块的实时软件可靠性模型. 电子科技大学学报, 1997, 26(1): 69~73

Analysis of Mechanism of Safety Kernel

Li Zhongwen Xing Guangze

(College of Computer Science and Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Safety kernel is a new mechanism providing safety assurance in safety-critical system. In this paper, many important concepts and characteristics of safety kernel are discussed by analyzing kernel method, such as the reason for its building, the requirements for its actualization, safety policies and architectures, etc. In addition, a reusable safety kernel mechanism is designed in this paper, which can address common problems found in safety kernel supporting reuse, such as dependencies on specific application software, in harmony of safety parameter expressiveness, etc.

Key words safety critical system; safety kernel; safety policy; kernel structured system

(上接第48页)

Identification of Spectra Lines of Ni- and Co-like Ions of Laser-produced Ta Plasma

Wang Ruirong

(Shanghai Institute of Laser Plasma Shanghai 201800)

Abstract One-dimension spatial resolution soft X-ray spectra of laser-produced Ta plasmas is obtained by using a bent crystal spectrometer. Some resonance transition of the type 4f-3d in the Ni and Co-like isoelectronic sequence are identified. The Ni -like isoelectronic sequence wavelengths and Co-like 4f-3d resonance transition possible value are introduced. Wavelengths are measured with an uncertainty of $\pm 5 \times 10^{-5}$ nm.

Key words bent crystal spectrometer; laser-produced plasma; soft X-ray; spectra identification