

双驱动 x 射线激光等离子体能谱特性研究 *

王瑞荣 王 伟 王 琛 董佳钦 孙今人 万炳根

(上海激光等离子体研究所高功率激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

(2002 年 7 月 10 日收到 2002 年 8 月 10 日收到修改稿)

用时间积分空间分辨的平晶千电子伏谱仪测量了钽激光等离子体发射波长范围为 0.45—0.75nm 的软 x 射线能谱, 精确测量和准确辨认出类镍、类钴和类铁离子的共振线及类镍离子的内壳层跃迁线, 对实验结果处理, 获得了辐射线谱的强度, 通过谱线比率的诊断推断脉冲激光时差对等离子体状态的影响, 至少也可部分解释激光上能级的粒子数及等离子体的电离程度。

关键词: 离子谱特性, 软 x 线能谱强度, 谱线辨认

PACC: 3270, 3220R, 5250J

1. 引 言

等离子体的应用研究已经发展成为当前一个重要的而又活跃的研究领域, 尤其是水窗区内波长 x 射线激光, 它被认为是实现生命大分子全息摄影、高清晰度生命大分子接触显微镜照相必然途径, 也是 x 射线激光研究工作长期努力的目标。满壳层等电子系列离子的电子碰撞激发 x 射线激光类镍离子的 $3d^94d - 3d^94p$ 激光, 是目前惟一进入水窗区的 x 射线激光, 且类镍钽离子 $J = 0$ 到 $J = 1$ 跃迁的波长 4.483nm 激光已被证明属于生物活细胞全息摄影的最佳波长之列, 但是类镍离子的电子碰撞激发软 x 射线激光实验所需的抽运功率较高。类镍离子 x 射线激光的第一个演示实验是美国 LLNL 于 1987 年做成, 接着他们先后进行了类镍铕(Eu^{35+})、镱(Yb^{42+})、钽(Ta^{45+})、钨(W^{46+})和金(Au^{51+})离子的电子碰撞激发 $4d - 4p$ 跃迁软 x 射线激光实验^[1-3]。近年来, 美国、日本和英国的科学家相继进行了用短脉宽(100—70ps)的双脉冲和多脉冲驱动的类镍离子电子碰撞激发实验^[4-5], 获得了可喜的成果。输出光束具有脉冲短、发散度小、效率较高的特点, 适宜用作激光聚变靶等离子体密度探测的探针光源。理论模拟单路基频激光驱动钽靶, 很难在“神光-II”装置上获得类镍-钽饱和增益 x 射线激光输出。对电子碰撞激发机制, Key^[6]提出一种克服此障碍的方案, 即在高密度下加热等离子体, 将其电离到类镍状态, 这样可显著地提高增益。接着 Maxon 等人^[7]将其发展为双脉冲抽运的具体设想。我们在“神光-II”激光装置上, 发展基频和倍频激光联合双路驱动靶的方法, 进行了类镍-钽饱和 x 射线激光输出的尝试性实验研究。

在高度电离的等离子体中获取 x 射线激光的条件极为复杂。为了提高对 x 射线激光输出特性的理解, 研究双脉冲条件下等离子体表现出来的光谱特性及主要动力学量非常重要。 $J = 0$ 与 $J = 1$ 之间粒子数反转发生在靶面附近, $J = 0$ 到 $J = 1$ 跃迁激光线放大主要依靠增益区的大小、电子密度梯度和等离子体电子密度的均匀性。晶体-千电子伏谱仪主要用来测量临界面附近, 即 $J = 0$ 到 $J = 1$ 跃迁激光线放大的增益区内等离子体自发辐射的 x 射线。高剥离态离子谱包含了其热等离子体的丰富信息和许多特征^[8-10], 所以系统地、精确地研究谱的结构和受激态全部机制等问题, 对实现类镍-钽饱和 x 射线激光输出的研究具有深远的意义。

本文利用“神光-II”激光装置的基频和倍频激光联合打靶产生的钽激光等离子体, 研究其发射的软 x 射线能谱, 观测的离子谱中包含了十分丰富的类铁、类钴和类镍等强跃迁线及其他跃迁线。通过辨认, 给出软 x 射线区的分类结果及相关讨论。

* 国家自然科学基金(批准号: 69989801) 和国家高技术研究发展计划(批准号: 863-410-3-3) 资助的课题。

2. 实验条件与实验结果

图 1 示出探测器的位置,用时间积分平焦场光栅谱仪 CCD 探测器探测类镍钽离子 $J = 0$ 到 $J = 1$ 跃迁波长 4.483nm 激光线。由于双路抽运激光驱动,千电子伏平晶谱仪放在与靶面法线方向成 45° 角,斜下方 30° 的位置,晶体谱仪实验所用参数:晶体为 TAP,晶格常数 $2d = 2.578\text{nm}$,垂直狭缝宽为 $80\mu\text{m}$,放大倍数为 2,轴向空间分辨为 $120\mu\text{m}$,狭缝后放银膜,银膜厚为 $1563.2\mu\text{g}/\mu\text{m}^2$,用沪产 5F 软 x 射线胶片记录光谱。

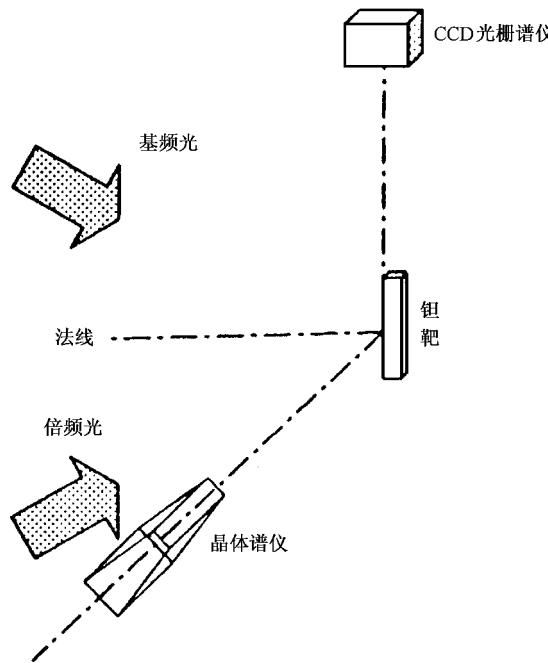


图 1 实验布局

实验用靶为平面固体钽靶,基频光与倍频光夹角为 42° 混合打靶。本文选用两发进行处理。02032803 发,基频光能量为 71.27J ,波长为 $1.053\mu\text{m}$,脉宽为 90ps ,倍频光能量为 34.25J ,波长为 $0.53\mu\text{m}$,脉宽为 90ps ,聚焦线为 $50\mu\text{m} \times 6\text{mm}$,基频比倍频脉冲提前约 20ps 。02032901 发,基频光能量为 94.85J ,波长为 $1.053\mu\text{m}$,脉宽为 109ps ,倍频光能量为 34.74J ,波长为 $0.53\mu\text{m}$,脉宽为 109ps ,聚焦线为 $60\mu\text{m} \times 4\text{mm}$,基频与倍频脉冲同步。积分平焦场光栅谱仪进口放置了衰减 4.78 倍(C_8H_8)⁺ 铝膜作为滤片。实验中观测到类镍钽激光线的波长非常接近水窗,波长约为 4.48nm 。表 1 列出 CCD 探测到的 x 射

线激光线的实验结果。

表 1 x 射线激光线的实验结果

类别 发号	P_ω $\text{J} 10^{14}\text{W} / \text{cm}^2$	$P_{2\omega}$ $\text{J} 10^{14}\text{W} / \text{cm}^2$	I_{\max} /arb. units	E_{tot} $/10^6$	Φ /mrad	$d\Phi$ /mrad	G
02032803	2.64	1.26	522.5	0.203	19.4	8.0	4.2
02032901	2.4	0.88	2015	0.602	14.8	5.1	8.7

x 射线通过狭缝照射到晶体上,经过晶体衍射后,波长由小到大顺序记录在 x 射线胶片上。胶片记录的 x 射线能谱经黑度计扫描在坐标纸上,接着对坐标纸上的曲线纵坐标值作黑密度绝对定标,形成位置-黑密度数据文件,将此数据文件输入计算机内进行信息处理。

平晶谱仪的光路原理如图 2 所示。根据几何关系,并仅考虑 x 射线在晶体上的一级衍射布拉格公式: $\lambda_i = 2d \sin \theta_i$, 得任一谱线的波长 λ_i 与其在底片上的位置 x_i 有如下关系:

$$x_i = x_0 - f \operatorname{ctg} \alpha + \sin^{-1}(\lambda_i / 2d), \quad (1)$$

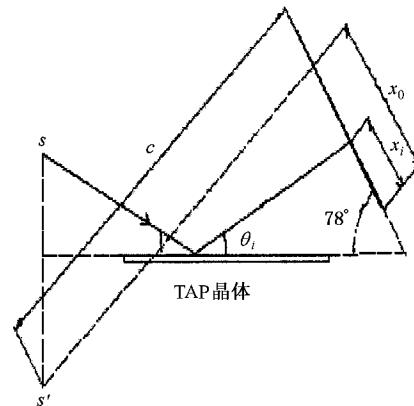


图 2 晶体谱仪光路

式中 α 为谱仪的底片与衍射晶面之间的夹角(实验用 $\alpha = 78^\circ$), f 为光源像点到底片的距离, x_0 为光源像点到底片的垂直线垂足的坐标(坐标原点 0 任意选定)。这些量中 α , d 分别为谱仪及晶体的参数,可视为常量。 x_0 , f 由底片和光源的相对位置确定。实验中谱仪和光源的几何位置实际很难精确测定,本文采用两次曝光的方法将钽和铝的谱线记录在同一张底片上,用铝的类氦线及类镍钽共振跃迁线的位置^[11]及其已知波长对(1)式进行求解,确定谱仪的色散参数 x_0 和 f ,再由同一底片上钽线位置确定其他波长 λ_i 。

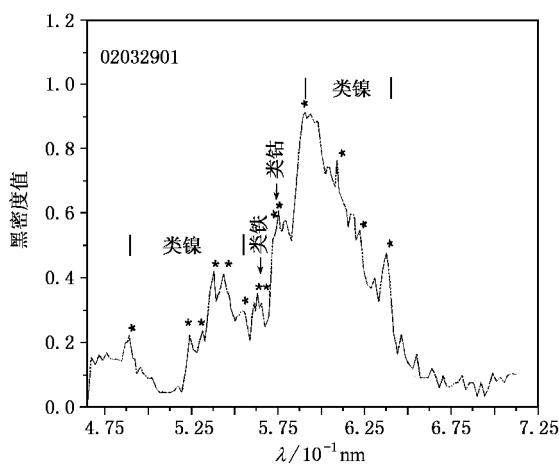


图3 钽等离子体x射线谱图 * 为已辨认出的谱线

$$\lambda_i = 2d \sin[\operatorname{ctg}((x_0 - x_i)/f) - \alpha]. \quad (2)$$

图3示出由黑密度计扫描的钽激光等离子体的x射线能谱. 我们对钽离子谱线作了辨认和归类. 表2列出谱线的分类和波长(所有跃迁都是从 $J=1$ 到 $J=0$)及北京应用物理与计算数学研究所计算的理论值. 图3和表2表明, 观测辨认的离子谱线为类镍离子 $3d^{10}-3d^94f$ 共振跃迁线、类钴离子 $3d^9-3d^84f$ 共振跃迁线、类铁离子 $3d^8-3d^74f$ 共振跃迁线类镍离子 $3p^63d^{10}-3p^53d^{10}4s$ 内壳层跃迁线和 $3p^63d^{10}-3p^53d^{10}4d$ 内壳层跃迁线等区域谱.

表2 x射线能谱的分类

跃迁	实验结果		理论计算	
	波长/ 10^{-1} nm	波长/ 10^{-1} nm	gf	gf
类镍离子 共振跃迁线	$3p^63d^{10}-3p^63d_{5/2}^94f_{5/2}$	6.167	6.167	0.0043
	$3p^63d^{10}-3p^63d_{5/2}^94f_{7/2}$	6.091	6.079	1.8070
	$3p^63d^{10}-3p^63d_{3/2}^94f_{5/2}$	5.905	5.882	6.489
类钴离子 共振跃迁线	$3p^63d^9-3p^63d_{3/2}^84f_{5/2}$	5.752	5.752	16.604
	$3p^63d^9-3p^63d_{3/2}^84f_{7/2}$	5.741	5.741	9.338
类铁离子 共振跃迁线	$3p^63d^8-3p^63d_{3/2}^84f_{5/2}$	5.654	5.657	9.490
	$3p^63d^8-3p^63d_{3/2}^84f_{7/2}$	5.632	5.632	13.104
类镍离子 内壳层 跃迁线	$3p^63d^{10}-3p_{3/2}^53d^{10}4s_{1/2}$	6.375	6.380	0.3198
	$3p^63d^{10}-3p_{3/2}^53d^{10}4s_{1/2}$	5.555	5.530	0.1315
内壳层 跃迁线	$3p^63d^{10}-3p_{3/2}^53d_{10}4d_{3/2}$	5.435	5.450	0.0569
	$3p^63d^{10}-3p_{3/2}^53d_{10}4d_{5/2}$	5.381	5.395	0.0625
	$3p^63d^{10}-3p_{3/2}^53d^{10}4f_{5/2}$	4.891	4.842	0.4249

根据误差理论可计算出, 用上述方法确定谱线波长的标准偏差小于 3×10^{-4} nm, 考虑到两次曝光, 底片本底光强大, 信噪比差, 加之晶体分辨率的限

制, 本文给出的波长实验误差小于 1×10^{-3} nm.

3. 实验分析与讨论

按照沪产5F底片的黑密度-曝光量曲线借助文献[12]中的理论模型计算及实测谱片的黑密度计扫描曲线和辨认分类结果, 滤片透过率借助已发表的吸收系数的计算, TAP晶体的各波长积分反射率采用曲线拟合法, 将供应商提供的有限实验参数, 用最小二乘法将晶体的积分反射率拟合成波长的多项式函数, 经过数据处理后, 获得x射线强度分布, 如图4所示.

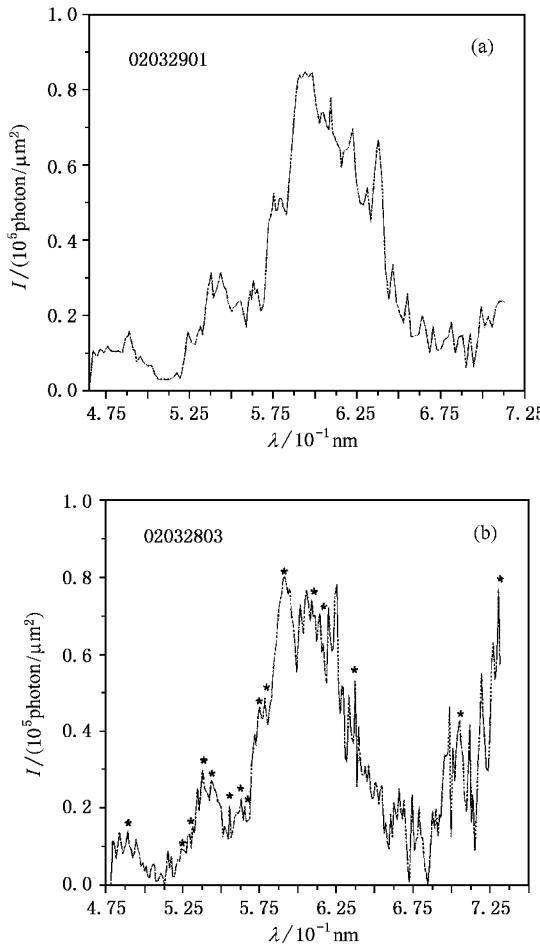


图4 x射线强度 * 为图3相应的辨认线谱

从图4发现高电离态从类镍到类铁离子 $3d-4f$ 跃迁线有一定的强度, 类镍离子共振线强度最强, 其次为类钴离子共振线. 激光上能级的粒子是通过类镍基态的离子直接碰撞激发产生的, 所以类镍基态离子是x射线激光抽运库, 由于高电离态离子上能级几乎惟一地从基态碰撞激发产生而来, 并具有

类似的速率,因此高电离态离子 $3d-4f$ 跃迁线相互间强度值之比可作为判断等离子体是否过电离的一个定性分析参数,图 4(a)中类钴、类铁离子中最强跃迁线与类镍离子最强跃迁线强度之比分别为 0.63 和 0.35. 图 4(b)中类钴、类铁离子中最强跃迁线与类镍离子最强跃迁线强度之比分别为 0.58 和 0.28. 理论分析:作为类镍系列等离子体均未过电离,02032901 发等离子体存在期间比 0203803 发有足够的类镍离子丰度.

自发辐射在等离子体中得到足够放大的 χ 射线激光取决于两个因素,一个是增益系数,增益系数是与反转粒子数成正比,另一个是 χ 射线激光在增益区中传播距离. 类镍 $3d-4f$ 的跃迁是有趣的,类镍基态通过碰撞激发到 $4f$ 态的粒子数概率要大,因此在实验中由于 $3d^1s_0-3d^94p_1$ 跃迁有大的震子强度,所以应当测量到比较强的类镍离子跃迁线. 基态类镍离子碰撞激发到 $4f$ 能级上,激光上能级也几乎惟一地从基态碰撞激发而来,测量到的类镍跃迁线强度值是激光上能级粒子数的充分的标示,比较图 4(a)和(b),02032901 发的激光上能级粒子数多,增益系数大,这个判断与轴向 CCD 探测到的 χ 射线激光信息相符合.

对图 4(b)的谱线作进一步辨认,发现类镍离子 $3p^63d^{10}-3p^63d_{3/2}^94p_{3/2}$ 和 $3p^63d^{10}-3p^63d_{5/2}^94p_{3/2}$ 两根共振线,波长分别为 0.7053 和 0.7303 nm. 图 4(a)中类镍离子 $3d^{10}-3d^94f$ 共振跃迁线强度强,观测的 $3d^{10}-3d^94p$ 跃迁线强度较弱甚至不出现,表明 02032901 发激发能高,由于等离子体对激光的吸收强度 $I_a \sim T_e^{3/2}$,所以激光强度大. 数据处理发现:在测谱范围内随驱动激光强度的增强,短波长的信息更丰富,辐射强度近似线性增强. 但是 02032803 发基频光强度和倍频光强度都比 02032901 发大,出现了反常现象. 除了驱动激光主要参数测量上存在较大误差外,很可能是基频光与倍频光时间配合不协调,倍频光主要是使等离子体临界面附近电子密度梯度变小,提高等离子体对基频光的吸收效率,基频光的能量主要沉积在等离子体的临界面附近,也就提高了等离子体临界面附近的电子温度,优化不好,倍频光就很可能达不到改善等离子体临界面附近的

电子密度梯度的目的,因此基频和倍频脉冲时间差配合很重要. 从 CCD 观测到的折射角也可以很好地解释这一现象.

实验中, χ 射线激光靶是平面固体钽靶,激光产生的等离子体是柱状的,轴向等离子体的速度梯度和电子密度梯度较小,轴向运动的共振线是光性厚的,只有自发辐射放大的 χ 射线才能逃逸出来. 等离子体径向膨胀存在大的速度梯度,共振线是光性薄的. 晶体谱仪没有沿着靶的法线方向放置,这就给测量自发辐射线谱强度带来一定的误差,但考虑到各方面的因素,这部分误差对定性分析处理信息的结果影响还是较小的.

作为增益介质的等离子体所发射的丰富线辐射含有大量的等离子体状态的信息,因为这些辐射的强度及其特性完全由等离子体的电子温度、电子密度、离子温度、离子密度及各种离子的丰度决定的. 实验中测量的光谱通过一定的理论模型,把光谱强度值与等离子体状态联系起来,对局部热动平衡等离子体,其电离态及激发态离子密度满足萨哈-玻尔兹曼等式,利用不同电离态光性薄的两条跃迁线强度的比值,可得出电子温度,也可以用同一电离态的一条光性薄跃迁线与另一条光性厚跃迁线强度比,从实验测出的 χ 射线线率中可换算出离子基态密度. 因此,本文的工作为下一步定量分析等离子体状态动力学参数打下了坚实的基础.

4. 结 论

高度电离的激光等离子体,其辐射的 χ 射线包含了多种不同电离阶离子发射的 χ 射线能谱. 观测辨认出类镍及其两个邻近的类钴和类铁电荷态的离子共振线,多条类镍离子的内壳层跃迁线,辨认谱的波长实验值,其绝大部分与其预期结果符合得相当好,离子的跃迁能量的平方根与 Z 之间有非常好的线性关系. 对图像进行处理,获得了钽等离子体高电离态离子辐射线谱强度分布.

感谢北京应用物理与计算数学研究所张覃鑫副研究员对本工作给予的帮助.

- [1] MacGwan B J *et al* 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2157
- [2] MacGwan B J *et al* 1988 *J. Opt. Soc. Am. B* **5** 1858
- [3] MacGwan B J *et al* 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 420
- [4] Nilsen J *et al* 1995 *Proc. SPIE* **2520** 152
- [5] Daido H *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1074
- [6] Key M 1992 *IOP Conference Series* ed by E E Fil (IOP, Bristol, UK) p171
- [7] Maxon S *et al* 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 2285
- [8] Fang D W *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 596 (in Chinese) 方达
渭等 1999 *物理学报* **48** 596]
- [9] Zhang J Y *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 809
- [10] Yang J M *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2408 (in Chinese) 杨家
敏等 2000 *物理学报* **49** 2408]
- [11] Wang R R 2001 *J. University Electron. Sci. Technol.* **30** 46 (in
China) 王瑞荣 2001 *电子科技大学学报* **30** 46]
- [12] Yang J M *et al* 1997 *Acta Opt. Sin.* **17** 599 (in Chinese) 杨家敏
等 1997 *光学学报* **17** 599]

Spectral characterization of double-driven x-ray laser plasmas^{*}

Wang Rui-Rong Wang Wei Wang Chen Dong Jia-Qin Sun Jin-Ren Wan Bing-Gen

(State Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Laser Plasmas, Shanghai 201800, China)

(Received 10 July 2002; revised manuscript received 10 August 2002)

Abstract

A soft x-ray spectra of double-driven laser-produced Ta plasmas is measured by a time-integrated space-resolved keV crystal spectrometer from 0.45 to 0.75nm. Some resonant transition of the Ni-like, Co-like and Fe-like ions and some intrashell transition of the Ni-like ions are identified. The experimental results have been processed, the spectroscopic line intensity of the higher ionization stages is obtained. The effect of the double-laser driven time difference on the plasma condition is inferred through the spectroscopic line ratio diagnostics. The results obtained can, at least in part, give a good explanation of the upper lasing level population and the ionization properties of the plasmas.

Keywords : ionic spectral characterization, soft x-ray spectral intensity, spectra identified

PACC : 3270, 3220R, 5250J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69989801), and the National High Technology Development Program of China (Grant No. 863-410-3-3).