

类氪钛软 X 射线激光空间 发射区域研究^{*}

李玉同 张启仁 谷渝秋 杨上金 尤永禄 纪康宁 赵永宽

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

(1996 年 8 月 7 日收到; 1996 年 9 月 16 日收到修改稿)

使用高分辨平焦场谱仪, 在“星光”激光器上, 对类氪钛 $J=0-1, 3p-3s$ 跃迁 32.6 nm 软 X 射线激光空间发射区域进行了实验测量, 并与 LASNEX 和 XRASER 程序模拟结果作了比较. 实验采用预脉冲打靶技术, 预、主脉冲时间间隔 5 ns , 峰值能量比为 1% . 结果表明: 当驱动能量在 $50-150\text{ J}$ 范围内变化时, 等离子体介质中 X 射线激光发射区与驱动能量大小密切相关, 并随之增大而增大.

PACC: 4225V; 0765; 4225B

1 引 言

自利弗莫尔国家实验室成功演示软 X 射线激光放大以后^[1], 各国对其光学特性的研究就广泛展开, 但主要集中于软 X 射线激光束本身的发散角、折射效应、相干性、角分布、线宽等物理量的研究, 对于软 X 射线激光的产生介质——高温高密度等离子体的诊断也主要是电子密度、温度及其梯度的测量, 很少涉及软 X 射线激光在等离子体介质中的空间发射区域问题, 而后者对于探索软 X 射线激光产生机制、优化实验条件、了解激光等离子体介质的流体力学性质及理论模拟有重要意义. 利弗莫尔国家实验室^[2]在早期研究了驱动能量 4000 J 时类氪硒薄膜靶的 X 射线激光空间分辨谱, 发现随靶长度增大, 激光发射区逐渐减小. Li 等^[3]利用时间积分、空间分辨透射光栅谱仪对块状铁靶、锆靶发光区域进行了测量, 其驱动能量为 450 J , 但由于所用透射光栅有周期 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的支撑结构, 造成所测软 X 射线激光线在空间分辨方向发生衍射, 给实验结果带来一定偏差.

我们在“星光”激光器上成功地进行了低能量类氪钛预脉冲打靶实验, 获得了 32.6 nm ($J=0-1, 3p-3s$ 跃迁) 强激光线, 其能量阈值对于 1% 预脉冲, 达到了每厘米靶长 16 J ^[4]. 本文对低能量下类氪钛软 X 射线激光空间发射区域进行了实验研究, 并与 LASNEX 和 XRASER 程序计算结果作了比较. 实验诊断仪器为高分辨平焦场谱仪 (high resolution erect field spectrometer, HIREFS).

^{*} 国家高技术研究发展计划资助的课题.

2 实 验

图 1 为实验装置示意图.

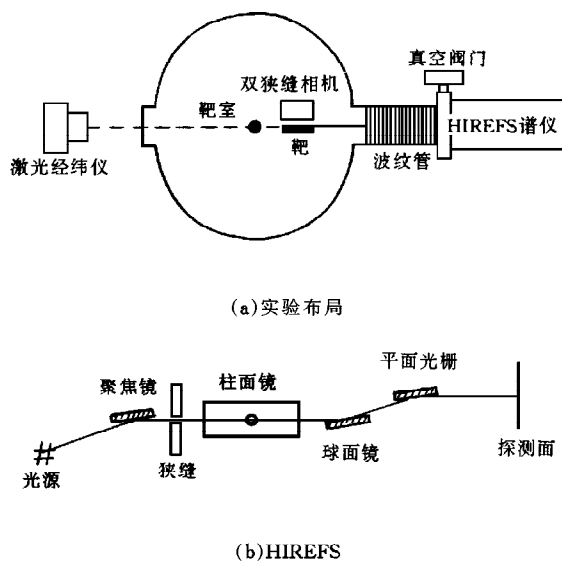


图 1 实验装置示意图

西南核物理与化学研究所“星光”钽玻璃激光器作为抽运源,其输出能量可达 200 J,工作波长 $1.053\ \mu\text{m}$,脉冲宽度 650 ps,预、主脉冲能量比为 1%,间隔 5.0 ns.实验所用线聚焦由非球面会聚透镜和离轴球面反射镜系统产生,焦线长度 2.5 cm,宽度 $80\ \mu\text{m}$.块状钽靶长 18 mm.

由于等离子体介质存在横向电子密度梯度,X 射线激光束很容易折射出窄的增益通道,所以,打靶激光线聚焦的均匀性非常重要.为了使线聚焦最佳,在实验前,我们先用铝镜代替钽靶,仔细摸索了焦线的最好位置;在实验中,又用双狭缝相机一直监测焦线情况.

主要诊断仪器为带空间分辨的 HIREFS-SXR-1.75/AB (Hettrick Scientific Inc. USA)^[5,6],该谱仪由前置球面收集镜、狭缝、柱面镜、会聚球面镜、变栅距平面光栅和探测器组成,其中,柱面镜可对扩展光源进行空间分辨.仪器内部配有 A, B, C, X 四块光栅,高通波带范围 0.8—35.0 nm.当入射狭缝为 $5\ \mu\text{m}$ 时,光栅 C 在 32.6 nm 处分辨率可达 4000.实验时,谱仪通过波纹管与靶室相连,沿轴向对准靶端,这样可得到垂直于靶面的空间分辨谱,其空间分辨本领约为 $50\ \mu\text{m}$.靶心距谱仪前置镜 90 cm,探测面距入射狭缝 176 cm,由 Q-Plate 记录谱线.

3 结 果

图 2 为 18 mm 长块状钽靶轴向光谱.空间分辨方向垂直于靶面.32.6 nm 软 X 射线

激光线与其他辐射线相比,有两个明显特点:短而强。“短”是由于 X 射线激光发射区域小于整个等离子体区域所致;“强”正是 X 射线激光高亮度的体现.这两个特点使该激光线非常易于辨认. _

沿空间分辨方向,对32.6nm激光线进行黑密度扫描,得到图3所示的空间分辨曲

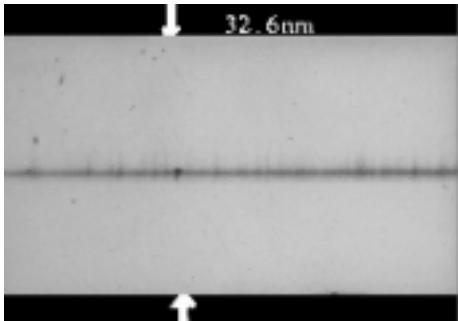


图2 类氪钛时间积分、空间分辨轴向光谱

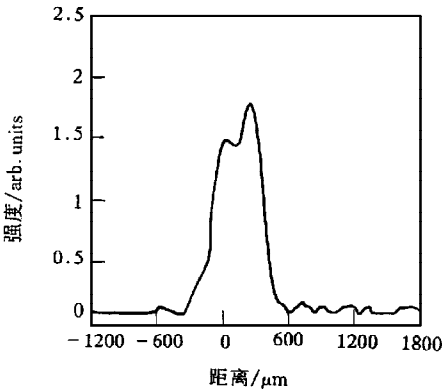


图3 类氪钛 32.6 nm X 射线激光空间分辨曲线(横轴零点对应靶面)

线,其打靶能量 66 J. 曲线前面平台对应靶表面的连续辐射,峰值对应 X 射线激光在等离子体介质中的空间发射区域.理想情况下,靶面对应于连续谱开始发射位置.考虑到谱仪像散等因素的影响,取 X 射线激光发射峰背面直线部分反向延长线强度为零的位置为靶面,该峰值半高宽为激光发射区宽度,由此引入的误差约为 50 μm.实验结果见表 1.很明显,X 射线激光发射区域与驱动能量关系密切.

表 1 类氪钛 X 射线激光发射区空间位置及宽度

驱动能量/J	发射区中心与靶面距离/μm	发射区宽度(半高宽)/μm
66	175	150
109	275	200
121	348	350
50	205 *	85 *
150	310 *	149 *

* 实验所测强度值及理论增益区计算值.

4 理论模拟与讨论

使用 LASNEX 程序^[7],对驱动能量 50,150 J 两种情况下的等离子体流体力学过程进行了计算,模拟条件与实验条件类似,驱动激光脉冲作高斯型处理.将 LASNEX 计算所得的密度、温度和速率作为 XRASER 程序^[8]的输入,可得到类氪钛 32.6 nm X 射线激光增益区随时间和空间的分布,图 4 为计算结果.图中最黑区域对应增益大于 6 cm⁻¹,由内向外增益值依次以 1.5 cm⁻¹步长递减,横轴、纵轴零点分别对应靶面位置 and 主脉冲峰值时刻. _

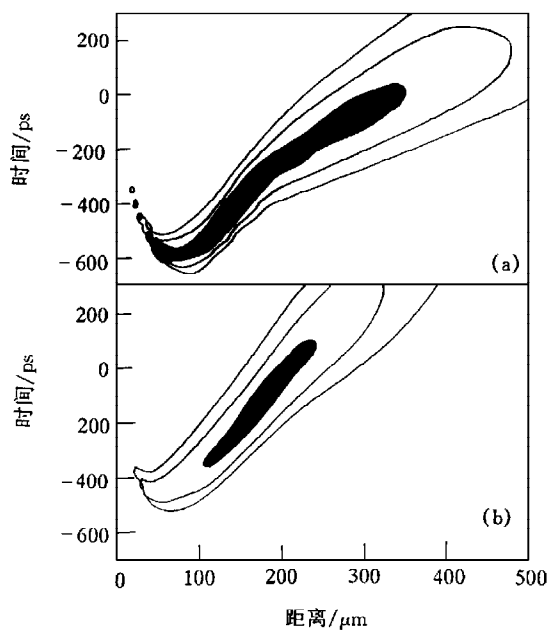


图 4 驱动能量 150 J(a), 50 J(b) 两种情况下类氪钛 32.6 nm X 射线激光增益区理论时空分布(取自文献[4])

很显然, 驱动能量 50 J 时, 等离子体中 X 射线激光增益区比 150 J 情况要小. 因谱仪为时间积分结果, 故取主脉冲峰值时刻对应的空间位置为增益区中心, 由此得到的理论值也列于表 1. 实验和理论结果表明: 随驱动激光能量增大, X 射线激光发射区距靶面距离及空间尺度亦增大, 两者变化趋势相同, 但绝对值有一定差异.

一般认为, 预脉冲首先与靶相互作用, 产生一预等离子体, 主脉冲主要对预等离子体加热, 产生一较长放大增益区, 使得 X 射线激光在被折射出增益区之前得以充分放大. 在本实验中, 主、预脉冲能量比 1% 保持不变, 驱动能量从 60 J 到 130 J 变化. 对于大驱动能量, 预脉冲能量值大, 产生的预等离子体膨胀速度快, 所以 X 射线激光发射区距靶面远. 至于实验与理论的偏差, 可能有以下原因: 实验所测为 X 射线激光强度分布, 程序模拟的是增益分布, 两者存在指数定标关系, 而且 X 射线激光在增益通道中传播时存在折射效应; 实验所用谱仪的空间分辨率不够高, 使测量结果有一定误差; 理论模拟只考虑了等离子体的二维流体力学过程.

5 结 论

使用高分辨平焦场谱仪, 在“星光”激光器上, 对类氪钛 $J=0-1, 3p-3s$ 跃迁软 X 射线激光空间发射区域进行了实验测量; 利用 LASNEX 和 XRASER 程序对增益区随时间和空间的变化作了理论模拟. 实验采用预脉冲打靶技术, 预、主脉冲时间间隔为 5 ns, 峰值

能量比为 1%, 块状钛靶长 18 mm. 理论和实验都表明:当驱动能量在 50—150J 范围内变化时, 等离子体介质中 X 射线激光发射区域与驱动能量大小密切相关, 并随之增大而增大. 具体数值见表 1.

本实验是在西南核物理与化学研究所“星光”运行组大力协助和支持下完成的, 陆丽珠同志为实验的顺利进行作了大量准备工作, 在此一并致谢.

- [1] D.L. Matthews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 110.
- [2] D.A. Whelan *et al.*, *SPIE*, **831**(1987), 275.
- [3] Yuelin Li *et al.*, *Opt. Commun.*, **119**(1995), 557; *J. Opt. Soc. Am.*, **B13**(1996), 742.
- [4] J. Zhang *et al.*, *Phys. Rev.*, **A53**(1996), 3640.
- [5] M.C. Hettrick, *Nucl. Instrum. and Meth.*, **A266**(1988), 404.
- [6] M.C. Hettrick *et al.*, *Appl. Opt.*, **25**(1986), 4228.
- [7] G.B. Zimmerman *et al.*, *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion*, **11**(1975), 51.
- [8] J. Nilsen, AIP Conference Proceeding 168-Atomic Processes in Plasma, eds. A. Hauer and A. L. Merts (American Institute of Physics, New York, 1988), p. 51.

SPACE-RESOLVED STUDY OF NEON-LIKE TITANIUM SOFT X-RAY LASING

LI YU-TONG ZHANG QI-REN GU YU-QIU YANG SHANG-JIN

YIU YONG-LU JI KANG-NING ZHAO YONG-KUAN

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

(Received 7 August 1996; revised manuscript received 16 September 1996)

ABSTRACT

We report a spatially resolved investigation of lasing on the $J=0-1, 3p-3s$ transition in neon-like titanium at 32.6 nm, with high-resolution erect field spectrometer. Experiments were carried out on the “Xingguang” Nd-glass laser with 1% prepulses 5 ns before the main pulse. The experimental results are compared with the theoretical simulations obtained by LASNEX and XRASER code. The dependence of lasing region on drive energy is also discussed.

PACC: 4225V; 0765; 4225B