

类镍钽 x 射线激光实验研究*

王琛¹⁾ 王伟¹⁾ 吴江¹⁾ 董佳钦¹⁾ 孙今人¹⁾ 王瑞容¹⁾ 傅思祖¹⁾ 顾援¹⁾
王世绩¹⁾ 黄关龙²⁾ 林尊琪²⁾ 张国平³⁾ 张覃鑫³⁾ 郑无敌³⁾

¹⁾ 中国科学院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

²⁾ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

³⁾ 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

(2003 年 12 月 16 日收到 2004 年 3 月 15 日收到修改稿)

在神光 II 激光装置上进行了类镍钽近水窗 x 射线激光实验研究. 利用基频、倍频联合驱动和双靶对接方案, 在总能量 400J 的驱动激光能量下, 获得了类镍钽 4.48nm x 射线激光较强的输出, 增益长度积达到 5.5.

关键词: 类镍钽 x 射线激光, 水窗, 基频、倍频联合驱动

PACC: 4255V, 5270L

1. 引 言

水窗(water window: 2.3—4.4nm)附近 x 射线激光是这方面一个重要的研究方向, 其在生物显微成像、全息成像等领域有很大的应用前景. 因此自 x 射线激光的首次演示成功以来^[1], 就一直试图把 x 射线激光波长推广到水窗波段. 目前, 尽管取得了一些进展^[1-7], 但仍有很多工作要做.

早先, LLNL 利用 10³J 的激光驱动爆炸薄膜靶, 获得了一系列水窗附近的 x 射线激光输出. 其中值得一提的结果包括增益长度积(GL)达到 7 的类镍钨(W: 4.3nm) x 射线激光和迄今为止最短波长的类镍金(Au: 3.6nm) x 射线激光^[3,4]. 但是, 这些实验对驱动激光的能量要求太高. 其后, RAL 提出了预主脉冲驱动方案, 大大降低了所需驱动激光能量. 他们利用脉宽 75ps、能量约 300J 的预主脉冲激光辐照平面靶, 获得了波长短至 7.3nm 的类镍钐(Sm: 7.3nm)激光的饱和输出^[5]. 其后 ILE 和 NLHPLP 合作, 利用预主脉冲和双靶对接技术, 及 10²J 的驱动激光能量, 分别获得了类镍镱(Yb: 5nm)、钪(Hf: 4.6nm)、钽(Ta: 4.5nm)的 x 射线激光输出^[6,7], 其中类镍镱和钪 x 射线激光 GL 分别为 11 和 6, 但类镍钽 x 射线激光只是看到了谱线, 没有测到有效的增益.

另一方面, 也同时开展了水窗附近 x 射线激光在生物学方面的应用研究, 例如生物样品全息照相^[8]、生物细胞的显微成像^[9]等. 比起电子显微镜, 尽管目前在分辨能力方面有所不如, 但却有更大的应用前景. 对生物全息成像而言, 波长位于水窗外沿的类镍钽 x 射线激光(Ta: 4.5nm)是最佳选择^[10], 这也是我们对其特别注意的原因.

我国尽管 x 射线激光实验研究也取得了很大进展^[2,11-14], 但在水窗附近 x 射线激光的实验研究中, 还处于起步的阶段. 除了几年前我们与日本 ILE 的合作实验之外^[6,7], 近年来我们加大了此方面的研究. 本文描述了我们新近在神光 II 激光装置上进行类镍钽 x 射线激光研究的情况. 通过采用新颖的基频、倍频联合驱动方案, 实验中获得了 GL 为 5.5 的类镍钽 x 射线激光输出. 结果尽管比早先 LLNL 的类似结果(GL = 6—8)略有不如^[4], 但是驱动激光能量则大大减小了.

2. 实验条件

实验在神光 II 激光装置上实施, 采用基频、倍频联合驱动方式, 其排布如图 1 所示. 使用两块靶进行双靶对接, 其中每一块靶都利用互成 42°角的两路激光联合驱动. 两路激光中一路基频、一路二倍频,

* 国家高技术惯性约束聚变基金资助的课题.

分别通过柱面透镜列阵线聚焦系统在靶面形成焦线,互相精密重合后共同辐照待测靶.基频驱动激光波长为 $1.053\mu\text{m}$ 脉冲宽度(FWHM)为 100ps ,每一路能量约为 100J ;二倍频激光利用另一路基频激光经倍频后获得,效率约为 60% .每一路激光均分裂成为预-主脉冲的,其中间隔为 1.5ns ;预-主脉冲强度比对基频光约为 4% ,对倍频光小于 0.5% ,可以忽略不计.经初步测量,基频、倍频叠合后的焦线尺寸约为 $6\text{mm} \times 100\mu\text{m}$,在长度方向上强度的不均匀性小于 $\pm 10\%$.靶采用在玻璃基板镀钽的方法制备,最大长度为 5mm ,以保证靶的两端处于线聚焦的均匀区.双靶对接中,采用准行波抽运,每块靶的两路驱

动激光同步,而两块靶之间驱动时间适当延时,以保证双靶产生的两段等离子体增益区的维持时间良好匹配.双靶靶面间距约为 $50\mu\text{m}$.

实验主要采用 2400mm^{-1} 平焦场光栅谱仪后接软 x 射线 CCD 进行时间积分 x 射线激光光谱测量.谱仪整体倾斜 21° ,以保持谱仪狭缝与靶法线平行.狭缝宽度为 $50\mu\text{m}$,距 x 射线激光出端约 320mm .在谱仪上绷丝,作为沿靶法线方向折射角和发散角的基准.在谱仪中加入厚度约 $0.8\mu\text{m}$ 的 C_8H_8 滤片,以获得碳吸收边作为波长定标的基准,其对类镍钽 4.48nm 的 x 射线激光基本不衰减(约为 1.2 倍).

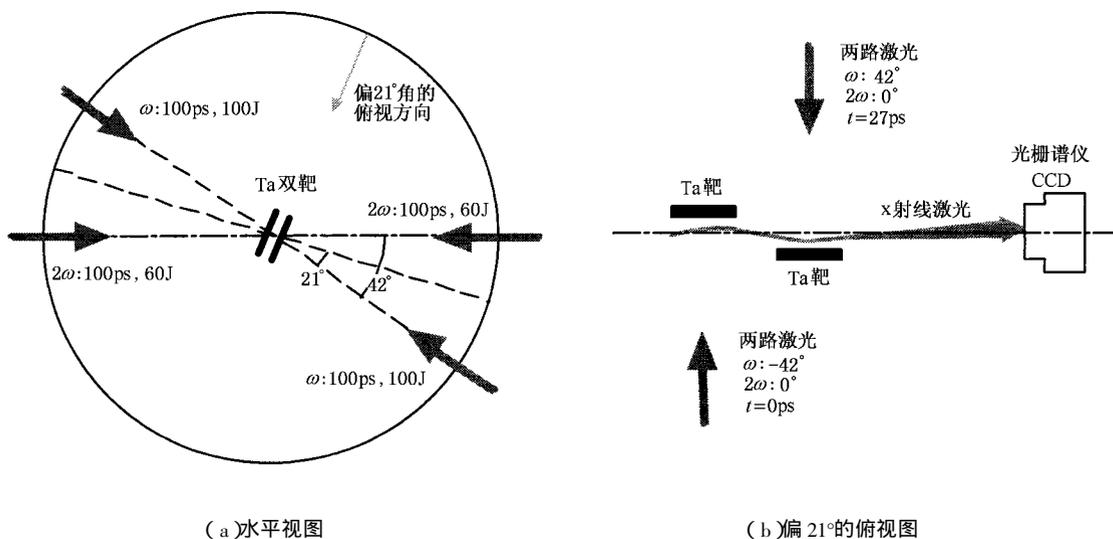


图 1 基频、倍频联合驱动类镍钽 x 射线激光驱动方式示意图

3. 实验结果

实验中获得了明显的类镍钽 4.48nm x 射线激光输出,图 2 为一发典型的平焦场谱仪记录的 x 射线激光谱线的积分记录图像.实验条件如前所述.

图 3 为图 2 谱线图像沿波长方向的扫描径迹.由图 3 可以清楚地看到类镍钽 4.48nm x 射线激光的谱线,由清晰的碳吸收边可以精确地确定谱线的波长.图 4 为沿靶法线方向的扫描径迹,已扣除本底影响并进行 50 个数据点的平滑.据此,可以估计出

x 射线激光的折射角和发散角分别约为 12 和 17mrad .图 4 中 0mrad 表示靶面位置,正方向为 x 射线激光出端靶的法线方向.

为了研究 x 射线激光的增益特性,除了 5mm 的双靶对接实验外,还进行了其他靶长的实验,包括 $2, 2.5, 3, 4, 5\text{mm}$ 的单靶实验和 $3\text{mm} + 3\text{mm}, 4\text{mm} + 4\text{mm}$ 的双靶对接实验.图 5 为根据实验数据绘制的类镍钽 x 射线激光输出强度随靶长变化的曲线(即增益曲线).利用 Linford 公式拟合,得到有效增益系数为 5.5cm^{-1} ,对应的 GL 为 5.5 .



图 2 实验记录得到的类镍钽 x 射线激光谱线图像

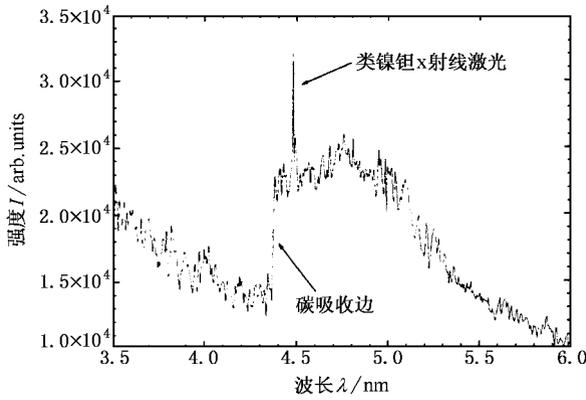


图 3 类镍钼 4.48nm X 射线激光谱线

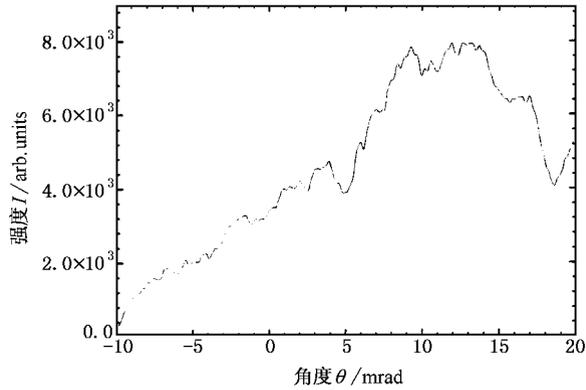


图 4 类镍钼 4.48nm X 射线激光在靶面法线方向上的角分布
50 个数据点平滑, 折射角约为 12mrad, 发射角约为 17mrad

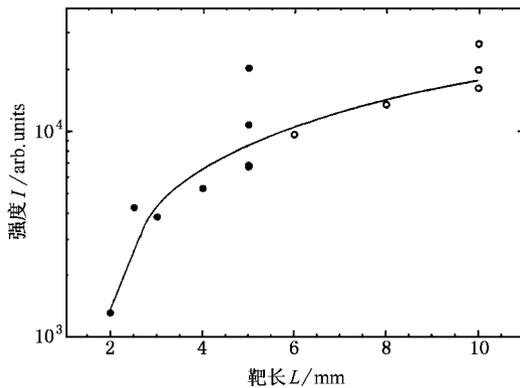


图 5 实验得到的类镍钼 X 射线激光强度随等离子体长度的变化 (即增益曲线) ● 为单靶实验 ○ 为双靶对接实验

4. 分析与讨论

本次实验的独特之处在于采用基频、倍频激光的联合驱动方式,之所以采用这种方式,是考虑了类

镍钼 X 射线激光的特点.一般而言,驱动激光在靶等离子体中能量沉积的主要机理是逆轫致吸收和共振吸收.在较高激光强度和短脉冲情况下,共振吸收占优势,并且主要集中在临界密度面附近.对应于入射激光波长 λ_0 , 等离子体的临界密度满足公式: $n_c = 1.1 \times 10^{21} / \lambda_0^2$, 其中 λ_0 和 n_c 单位分别为 μm 和 cm^{-3} . 对于基频激光 ($\lambda_0 = 1.053 \mu\text{m}$), 临界密度为 $1.0 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$; 对于二倍频激光 ($\lambda_0 = 0.53 \mu\text{m}$), 临界密度为 $4.0 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$. 理论计算给出的类镍钼 X 射线激光增益区的最佳密度条件为 $2.0 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 附近. 因此, 无论单独使用基频, 还是倍频激光驱动, 都存在如何把临界面附近沉积的能量通过电子热传导传递到增益区的问题. 图 6 为采用基频、倍频联合驱动原理示意图. 利用基频、倍频联合驱动方式, 同时存在从前后两个临界密度区向增益区电子热传导的过程 (图中 3 和 4), 可能更有效地对增益区进行加热, 从而得到更大的增益系数.

在实验中, 通过采用基频、倍频联合驱动方式, 在靶面功率密度为 $(2-3) \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ 时, 利用 2mm 的靶, 就能够观测到明显的类镍钼 4.48nm 的 X 射线激光谱线, 而在先前进行的一些实验中, 相同功率密度条件下, 只利用倍频激光驱动的实验, 在 10mm 的靶长时才观测到相应谱线^[7]. 另一方面, 即使在功率密度低至 $1.5 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ 条件下, 利用 5mm 的单靶也能观测到谱线. 这表明联合驱动方式确实起到了相当大的作用.

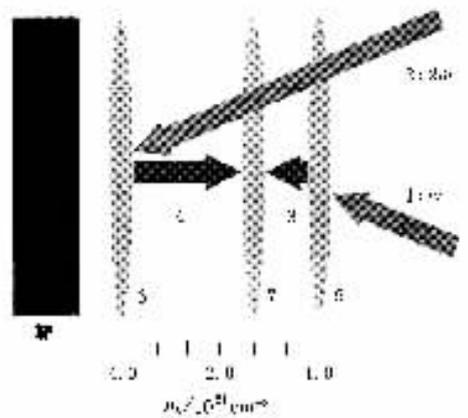


图 6 基频、倍频联合驱动原理示意图 1 为基频驱动激光, 2 为倍频驱动激光, 3 为基频电子热传导, 4 为倍频电子热传导, 5 为基频激光临界密度区, 6 为倍频激光临界密度区, 7 为 X 射线激光增益区

实验结果的一个显著特点是类镍钼 X 射线激光在靶面法线方向上的发散角很大. 图 4 给出的发

散角典型值 17mrad 是双靶对接情况下,比起单靶的结果已经有明显的改善.5mm 单靶实验测量得到的发散角通常在 25mrad 以上,甚至于没有明显的峰的结构.通常采用平面厚靶的 x 射线激光在靶面法线方向上的发散角都不大(3—5mrad),即使考虑到靶长较短的影响,其发散角也不会超过 10mrad.经过仔细分析,造成这种结果的原因可能是折射过大的影响.类镍钽增益区的最佳电子密度为 $2.0 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$,此值在基频、倍频驱动激光的临界密度之间,电子密度梯度可能非常大,从而造成 x 射线激光过早偏离出增益区.这一点从激光输出强度与靶场的变化曲线(图 5)也可以看出来.靶长在 2—3mm 之间,增益曲线非常陡,增益系数可达 20 cm^{-1} .随后随着靶长的增加,增益系数逐渐减小.这个过程类似于饱和现象,但 GL 只有 5.5,远还没有饱和.根据图 5,可以初步估计在靶长达 3mm 时,大部分的 x 射线

激光已经偏出了增益区,从而造成发散角过大、增益系数变小,甚至强度峰不明显等现象.在今后的实验研究中,如何通过改变实验条件,从而减小发散角,将是获得更强 x 射线激光输出的必要条件,也是研究的主要内容.

5. 结 论

在神光 II 激光装置上进行了水窗附近 x 射线激光实验,采用新颖的基频、倍频联合驱动方式,只利用 400J 的驱动激光能量,获得了类镍钽 4.48nm x 射线激光较强的输出, GL 达到 5.5.但由于折射效应的影响,使得获得的 x 射线激光输出强度不大、发散角过大.如何减小折射影响,将是需要继续研究的主要问题.

- [1] Matthews D L *et al* 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110
 [2] Wang S J *et al* 1991 *Chin. Phys. Lett.* **8** 618
 [3] MacGowan B J *et al* 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 420
 [4] MacGowan B J *et al* 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 2374
 [5] Zhang J *et al* 1997 *Science* **276** 1097
 [6] Daido H *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1074
 [7] Daido H *et al* 1999 *Proc. SPIE* **3776** 54
 [8] Trebes J E *et al* 1987 *Science* **238** 517

- [9] DaSilva L B *et al* 1992 *Science* **258** 269
 [10] London R A *et al* 1989 *Appl. Opt.* **28** 3397
 [11] Wang S J *et al* 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 360
 [12] Li Y J *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 516
 [13] Wang C *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 847 (in Chinese) [王 琛等 2002 物理学报 **51** 847]
 [14] Yan F *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2524 (in Chinese) [燕 飞等 2002 物理学报 **51** 2524]

Experimental studies of Ni-like Ta x-ray laser^{*}

Wang Chen¹⁾ Wang Wei¹⁾ Wu Jiang¹⁾ Dong Jia-Qin¹⁾ Sun Jin-Ren¹⁾ Wang Rui-Rong¹⁾ Fu Si-Zu¹⁾ Gu Yuan¹⁾
 Wang Shi-Ji¹⁾ Huang Guan-Long²⁾ Lin Zun-Qi²⁾ Zhang Guo-Ping³⁾ Zhang Tan-Xin³⁾ Zheng Wu-Di³⁾

¹⁾ Shanghai Institute of Laser Plasma, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

²⁾ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

³⁾ Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

(Received 16 December 2003; revised manuscript received 15 March 2004)

Abstract

The experimental studies of Ni-like Ta x-ray laser at near "water window" on Shenguang II laser facility were reported. By using a new scheme of united driving of fundamental- and double-frequency laser, the distinct spectrum signal of Ni-like Ta x-ray laser at 4.48 nm was obtained under the total drive energy of 400J. The efficient gain-length product was about 5.5

Keywords: Ni-like Ta x-ray laser, water window, united driving of fundamental- and double-frequency laser

PACC: 4255V, 5270L