

用双靶对接方法产生高强度 7.9 nm 类镍钹 X 射线激光

王世绩 顾 援 林尊琪 黄关龙 唐华泾

张国平

(高功率激光物理国家实验室,中国科学院上海光机所 上海 201800) (北京应用物理与计算数学研究所)

加藤义章 大道博行 今仁武臣 濑崎秀平 广濑真吾

村井健介

(日本大阪大学激光工程研究所)

(日本大阪工业技术研究所)

提要 采用双弯曲靶对接技术和多脉冲驱动,结合新型线聚焦系统,在大阪大学激光工程研究所的 GekkoTM装置上进行了类镍钹软 X 射线激光实验,以相对较低的驱动能量,获得了高强度的 7.9 nm 软 X 射线激光输出。

关键词 类镍钹软 X 射线激光,双弯曲靶对接,柱面镜阵列

自从 1984 年 X 射线激光首次演示成功以来,电子碰撞激发的类氙系列激光已达饱和输出^[1-4],并且获得了很好的光学质量。但类氙系列激光的波长较长,如要缩短输出激光的波长,必须提高驱动激光的强度(获得 8 nm 激光所需驱动激光的功率密度达 $6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$)。为提高效率,可采用类镍系列。因为类镍系列在获得类似波长的激光输出时,所需的驱动功率密度可显著降低。早期的类镍系列实验虽已成功,但所获的增益系数 G 值均较小,要求的倍频驱动激光功率密度仍然较高^[5,6]。

为了降低驱动激光功率密度,提高 X 射线激光转换效率,近年来,不少实验室作了许多探索。一种途径是采用预—主脉冲驱动方式,英国卢瑟福实验室以此获得了类镍银、钐等的软 X 射线激光饱和输出^[7,8]。另一种有效的手段是采用多脉冲驱动方式,以此泵浦单块平面靶和弯曲靶的类镍 X 射线激光,也已获得成功^[9-11],但 GL 值不大。此外,在类氙系列的 X 射线激光实验中,双靶对接技术成功地用来有效地补偿折射影响,提高输出强度。美国里弗莫尔实验室对类镍系列进行了双靶对接的尝试,但获得的 GL 值依然较小。

数值模拟结果表明,驱动激光焦线均匀性对类镍机制的 G 值有极其重要的影响。本实验即从改进焦线光强的均匀性及提高双靶对接的调整、对焦精度入手,采用多脉冲驱动弯曲靶,在较低的功率密度下,实现 X 射线激光的高强度输出。

实验在大阪大学激光工程研究所(ILE)的 GekkoTM装置上进行。采用两路相向入射的激光驱动,波长为 $1.053 \mu\text{m}$ 。光轴间距为 3 cm,一路比另一路延迟 100 ps(见图 1)。我们采用四脉冲驱动方式(见图 2),脉冲均为高斯型,脉宽为 100 ps(FWHM),各脉冲峰值间隔依次为 1000 ps, 400 ps, 400 ps。

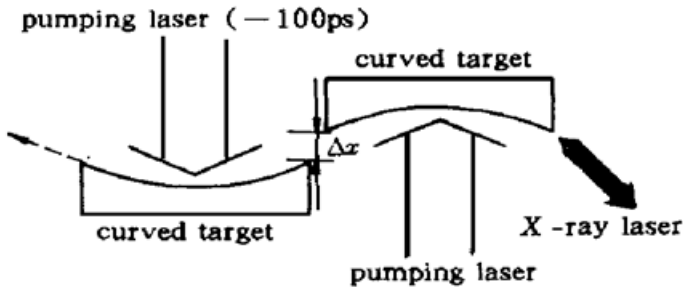


图 1 双靶对接实验示意图 (Δx 为靶面间距)

Fig. 1 Schematic diagram of the double target experiment.

Δx is the separation between two target surfaces

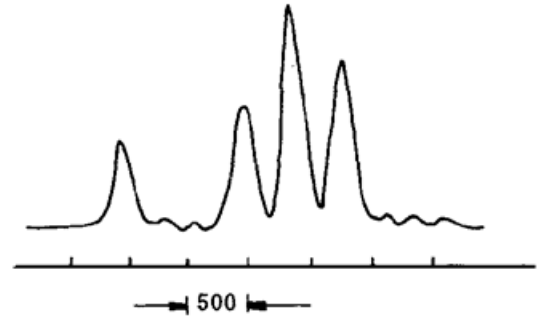


图 2 驱动激光脉冲序列

Fig. 2 The pulse train of the pumping laser

为获得高度均匀的焦线,我们采用了新型的线聚焦系统^[12]。此系统由四单元组合凸柱面透镜阵列加非球面透镜构成。采用凸柱面镜将避免以往凹面镜阵列单元间干涉造成的非球面镜损伤,并获得更高质量的均匀焦线。此系统在靶面产生宽 $80\ \mu\text{m}$,长 $2.6\ \text{cm}$ 的焦线。采用多脉冲驱动时,每个脉冲在焦线上产生的平均峰值功率密度为 $5 \times 10^{13}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。焦线长度方向的能量分布均匀性优于 $\pm 8\%$ 。

本实验采用的靶材料为镀在 $1\ \text{mm}$ 玻璃基片上的钽条。钽条宽度为 $2\ \text{mm}$,厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 。单靶的长度为 $1.5\sim 2.5\ \text{cm}$ 。凹柱面形弯曲靶的曲率半径 $\approx 4\ \text{m}$,由专用的微型靠模产生。双靶对接采用多维精密微调靶架,并通过专用光学监测系统实现精密调节。

实验所用的记录系统是两台掠入射平焦场光栅谱仪(名义栅距为 $1/1200\ \text{mm}$)。一台加上软 X 光 CCD,用以作时间积分记录;一台加上扫描相机,作时间分辨记录。系统安装于激光焦线的两头,记录沿等离子体轴向的 X 射线激光谱线。为保证记录用的软 X 射线 CCD 始终工作于线性区,谱仪插入适当厚度的 Al 和 CH 滤片。

我们在单靶获得稳定类镍钽激光输出基础上进行了双靶对接实验。当长度均为 $2.0\ \text{cm}$ 的双靶靶面间距 Δx 从 $210\ \mu\text{m}$ 开始增加时,输出激光强度持续上升,在 $320\ \mu\text{m}$ 处达到最大。同 $2.0\ \text{cm}$ 的单靶输出强度比较,光栅谱仪 CCD 记录的谱线峰值积分强度增大了约 30 倍,说明双靶对接是成功的。

通过改变靶长进行了增益系数 G 的测量。所用单靶的长度分别为 $1.5\ \text{cm}$, $2.0\ \text{cm}$, $2.5\ \text{cm}$;对接双靶的靶长为 $1.5\ \text{cm} + 1.5\ \text{cm}$, $2.0\ \text{cm} + 2.0\ \text{cm}$ 。图 3 是波长为 $7.9\ \text{nm}$ 的类镍钽 $4d-4p\ (J = 0-1)$ 跃迁谱线时间积分峰值强度 I 随靶长 L 的变化关系。 $L \leq 2.5\ \text{cm}$ 为单靶实验结果, $L > 2.5\ \text{cm}$ 的为双靶对接的结果。利用 Linford 公式,用最小二乘法对上述实验数据进行拟合,求出增益系数 $G = 2.15/\text{cm}$,增益-长度乘积 $GL = 8.6$ 。实际上,多脉冲驱动的类型镍机制的 G 是很复杂的,其值将随时间和空间位置的不同而改变,上述的 G 只是积分平均值。

另一台光栅谱仪对输出激光作时间分辨测量。图 4 为测得的输出激光强度随时间的变化。由图 4 可见, $(2.0 + 2.0)\ \text{cm}$ 双靶对接激光输出强度比 $2.0\ \text{cm}$ 单靶增大 30 倍的主要贡献来自第三及第四驱动激光脉冲,对应于第四脉冲的 X 射线激光脉冲放大了 200 倍。

输出激光的脉宽为 $70\ \text{ps}$ (FWHM),出现在自发辐射脉冲的前沿。单靶情况 ($L = 2.0\ \text{cm}$) 时,输出 X 射线激光光束的发散角为 $2\ \text{mrad}$ 。双靶情况时 $(2.0\ \text{cm} + 2.0\ \text{cm}, \Delta x = 320\ \mu\text{m})$,出射 X 射线激光的角分布常呈多峰结构,发散角为 $5\ \text{mrad}$,折射角(X 射线激光峰值与

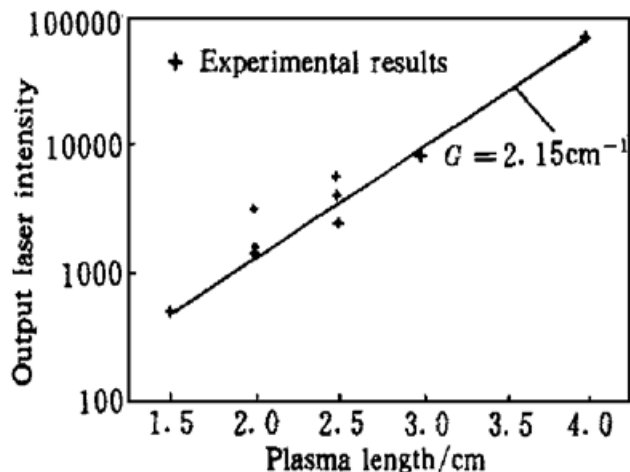


图 3 7.9 nm X 射线激光强度与靶长的关系

Fig. 3 The intensity of X-ray laser at 7.9 nm as a function of the target length

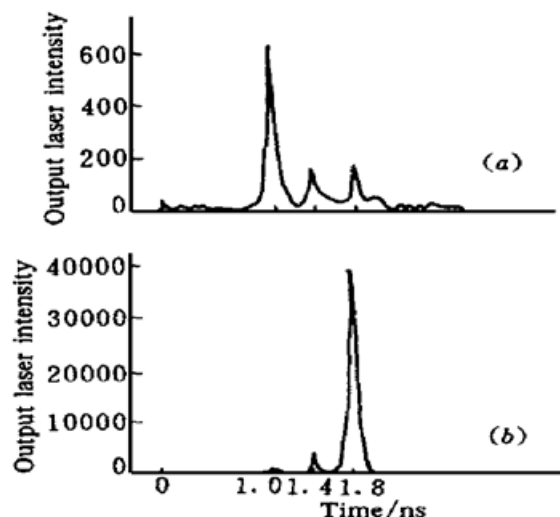


图 4 单靶 (a) 和双靶 (b) 的 X 射线激光强度的时间分辨记录

Fig. 4 The time-resolved X-ray laser intensity for single (a) and double (b) target

靶面的夹角) 为 3 mrad。

实验结果表明, 如果焦线光强分布的均匀性有 10% 的变化, 输出 X 射线的强度将有成倍的增减, 由此可见焦线均匀性的重要性。

由时间分辨的 X 射线激光谱线可知, 单靶时第二驱动脉冲产生的 X 射线最强, 但在双靶对接时第二脉冲对应的 X 射线并未获得进一步放大。根据数值模拟与理论分析, 第一脉冲的主要作用是烧去钨靶表面的氧化层, 产生等离子体, 第二驱动脉冲在第一脉冲之后 1 ns 时到来, 此时电离度已经很低, 第二脉冲既要进一步电离, 又要加热等离子体, 实现粒子数反转, 增益区电子密度较高, 密度梯度较大, 增益区宽度很窄, 约为 20 μm 。此种状态出光较易, 增益值也较大, 但 X 射线激光的发散角小 (≈ 2 mrad), 折射角大, 不易实现双靶对接。第三脉冲在第二脉冲后 400 ps 时到来, 此时靶面上已存在一宽度约为 40~ 100 μm 的等离子体均匀区, 具有适合出光的电子密度和电离度。第三脉冲的作用是进一步提高电子温度。这时, 电子密度梯度较小, X 射线的偏折小, 增益区较大, 因而容易进行多靶的串接, 实现多级放大, 从而获得高的增益长度积, 甚至获得增益饱和。第四脉冲的作用和效果, 定性上与第三脉冲相似。

另外又进行了单靶加反射镜的实验, 发现第三、四泵浦脉冲对应的输出 X 射线激光得到明显的放大。我们相信, 通过双靶的双通放大, 很有希望大幅度提高 X 射线激光的强度。

参 考 文 献

- 1 J. A. Koch, B. J. MacGowan, L. B. Da Silva *et al.*. Observation of gain-narrowing and saturation behavior in Se X-ray laser line profiles. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(22): 3291~ 3294
- 2 Wang Shiji, Gu Yuan, Zhou Guanlin *et al.*. Experimental research on saturated-gain for soft X-ray laser from neon-like germanium plasma. *Chinese Phys. Lett.*, 1991, **8**(12): 618~ 621
- 3 A. Canllon, H. Z. Chen, P. Dhez *et al.*. Saturated and near-diffraction-limited operation of an XUV laser at 23.6 nm. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(19): 2917~ 2920
- 4 Wang Shiji, Gu Yuan, Zhou Guanlin *et al.*. Achievement of soft X-ray laser with nearly saturated intensity and minimum divergence angle ~ 1 mrad. *Chinese J. Laser*, 1994, **B3**(6): 507~ 510
- 5 B. J. MacGowan, S. Maxon, P. L. Hagelstein *et al.*. Demonstration of soft-X-ray amplification in

- nickel-like ions. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(19): 2157~ 2160
- 6 B. J. MacGowan, S. Maxon, C. J. Keane *et al.*. Soft-X-ray amplification at 50.3 Å in nickel-like ytterbium. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(9): 1858~ 1863
- 7 J. Zhang, A. G. MacPhee, J. Nilsen *et al.*. Demonstration of saturation in a Ni-like Ag X-ray laser at 14 nm. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(20): 3856~ 3859
- 8 J. Zhang, A. G. MacPhee, J. Lin *et al.*. A saturated X-ray laser beam at 7 nm. *Science*, 1997, **276**: 1097
- 9 J. Nilsen, Juan C. Moreno. Lasing at 7.9 nm in nickellike neodymium. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(12): 1386 ~ 1388
- 10 H. Daido, Y. Kato, K. Murai *et al.*. Efficient soft X-ray lasing at 6 to 8 nm with nickel-like lanthanide ions. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(6): 1074~ 1077
- 11 Yuelin Li, Georg Pretzler, Peixiang Lu *et al.*. Demonstration of X-ray lasing in nickel-like tin. *Phys. Rev. A.*, 1996, **53**(2): R652~ R654
- 12 Shiji Wang, Zunqi Lin, Yuan Gu *et al.*. Convex cylindrical lens array line focusing system. *Acta Optica Sinica* (光学学报) (to be published)

Intense Ni-like Nd X-ray Laser at 7.9 nm by Double Target Coupling

Wang Shiji Gu Yuan Lin Zunqi Huang Guanlong Tang Huajing

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Zhang Guoping

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

Yoshiaki Kato Hiroyuki Daido Takeomi Imani Syuhei Sezaki Shingo Hirose
(Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2~ 6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565 Japan)

Kensuke Murai

(Osaka National Research Institute, 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda, Osaka 563, Japan)

Abstract Using the double curved target coupling and multipulse pumping techniques, combined with the novel line focus system, the Ni-like neodymium soft X-ray lasing experiment was carried out on Gekko ^{III} at Institute of Laser Engineering, Osaka University. The intense soft X-ray laser at 7.9 nm was obtained with relative lower pumping laser energy.

Key words Ni-like Nd soft X-ray laser, double curved target coupling, cylindrical lens array