

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0026-03

## 水窗波段 X 光激光饱和增益的理论研究\*

张国平 张覃鑫 郑无敌

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**提要** 提出了每两路激光分别以基频和倍频斜入射联合打靶的设想。理论研究表明, 不仅减少了一路倍频带来的能量损失, 而且可以取得比同样功率密度倍频光更高的增益系数。提出了四靶远程串接方案, 并用掠入射双中继镜将前一对靶输出的 X 光激光耦合到后一对靶进行放大。理论研究表明, 利用此方案, 可望在神光 II 装置上, 获得水窗波段 X 光激光的饱和增益。

**关键词** X 光激光, 类镍机制, 水窗波段, 饱和增益

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A

### The Theoretical Research on the Saturated Gain of X-Ray Laser at the Spectral "Water Window"

ZHANG Guo-ping ZHANG Tan-xin ZHENG Wu-di

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

**Abstract** In this paper, a new idea is proposed, using two driven laser beams combined one beam in prime frequency with another beam in double frequency to shot on target obliquely. According to theoretical calculation, not only energy loss due to the double frequency can be avoid but also a higher gain coefficient can be achieved, comparing to use two driven laser beams in double frequency with same power in the prime frequency. A design of long distance four targets series coupling is also presented, the X-ray laser produced by former two targets is collected by a pair of junction mirrors with grazing incidence, then amplified by latter two targets. The theoretical research predicts that, taking advantage of this method, saturated gain of X-ray laser at spectral "water window" can be got by Shen-Guang II facility.

**Key words** X-ray-laser, Ni-like scheme, spectral "water window", saturated gain

## 1 引 言

上世纪 90 年代初美国利弗莫尔国家实验室用 Nova 两路二倍频激光, 驱动爆炸薄膜钽和钨靶在水窗波长内外获得了 X 光激光输出, 增益长度积 GL 分别为 8 和 7<sup>[1]</sup>。1998 和 2000 年中日两国科学家在日本大阪大学 GekkoX II 装置上用 100 ps 预主脉冲驱动技术也进行相应的实验。1998 年用基频光驱动观察到了类镍钽和钨的谱线, 但强度很低<sup>[2]</sup>。2000 年用二倍频光驱动类镍钽。因多路焦线拼接不好等因素, 功率密度  $\sim 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>, 没有观察到激光线<sup>[3]</sup>。一般认为, 对于类镍钽和钨, 增益区的电子密度在  $2 \times 10^{21}$  cm<sup>-3</sup> 附近, 需要二倍频光驱动。本

文提出了每两路激光分别以基频和二倍频斜入射联合打靶设想, 提出了四靶远程串接方案。

## 2 基频和二倍频光联合驱动的设计

基频和二倍频光同时打靶时, 倍频光使基频光临界面附近电子密度梯度变小, 提高了基频光的吸收效率, 基频光的能量主要沉积在其临界密度附近。基频光提高了等离子体的电子温度。倍频光提高了基频光临界面前的电子温度, 有利于通过电子热传导将基频光的能量传到增益区。基频光的那一路避免了倍频引起的能量损失。使增益区的电子温度提高 30% 以上。X 光激光的增益系数 G 比两路都用二倍频光驱动要大 30% 左右。

国家 863 高技术激光技术领域及惯性约束聚变领域资助课题。

### 3 远程四靶串接实验方案

采用神光 II 输出的八路激光(基频和二倍频混合使用)共同驱动多靶串接实验方案。原理排布见图 1。每两路激光驱动一个靶,进行四靶串接,每束激光与靶法线成  $21^\circ$  角。两个靶近程对接,双靶间距  $\sim 3$  mm;两组双靶远程串接,其间距约 537 mm。每路驱动激光基频输出 100 J,二倍频输出 50 J,脉宽 100 ps。二倍频光焦线宽度  $80 \mu\text{m}$ ,基频光焦线宽度为  $100 \mu\text{m}$ 。焦线长度为 6 mm,用 5 mm 的靶进行实验,靶面功率密度  $2.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ,四靶总长度为 20 mm。为了避免两组靶 537 mm 远程对接带来的 500~1000 的衰减。两组靶之间用掠入射的双中继镜将前两个靶发出的 X 光激光聚焦反射到后两个靶的入端。

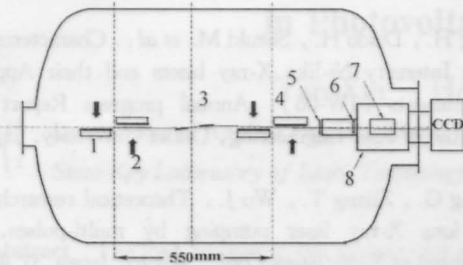


图 1 四靶串接方案基本排布(俯视图)。1、4: 双靶;2: 两路驱动激光;3: 双中继镜;5: 狭缝;6: 滤片;7: 光栅;8: 光栅谱仪

Fig.1 Schematic diagram of four targets series coupling. 1,4:double target;2:two driving lasers;3:double relay mirror;5:slit;6:filter;8:grating spectragraph

### 4 用系列程序对实验方案的优化设计

首先对单靶进行优化设计,预脉冲强度为主脉冲的 5%。单靶输出 X 光激光角分布峰值强度与预主脉冲间的时间间隔  $T_{1,2}$  的关系见图 2。从中选定  $T_{1,2}$  为 1.2 ns。增益区的等离子体状态见图 3。在增益区,电子密度  $(4.5 \sim 20) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,电子和离

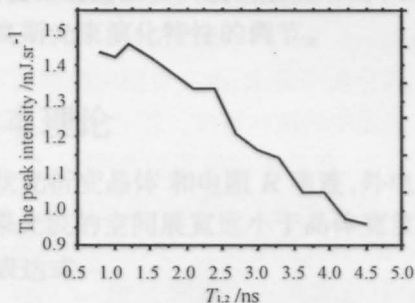


图 2 单靶优化设计

Fig.2 Optimization on  $T_{1,2}$  in single target

子温度分别为 1.5~3 和 0.2~0.4 keV,类镍离子丰度为 20%~50%,增益区离开初始靶面 38~82  $\mu\text{m}$ ,宽度为 44  $\mu\text{m}$ 。增益系数的演化见图 4。10 ps 左右增益区中心过电离,其增益系数  $G$  下降,峰值慢慢向两边移动, $G$  的最大值  $\sim 15 \text{ cm}^{-1}$ 。在光路程序中每隔 1 ps 改变等离子体状态的方法模拟老化效应<sup>[4,5]</sup>。其单靶、双靶对接和四靶远程对接 X 光激光角分布见图 5。单靶折射角 1.99 mrad,发散角 9.4 mrad,峰值强度 1.41 mJ/sr.,输出能量 0.103  $\mu\text{J}$ 。双靶垂直距离  $Y_{1,2}$  为 105  $\mu\text{m}$ ,夹角  $\theta_{1,2}$  为  $-3.7 \text{ mrad}$ , $G$  为  $10.9 \text{ cm}^{-1}$ ,与单靶相比,峰值放大 176 倍,输出能量 4.4  $\mu\text{J}$ 。四靶远程串接二、三靶间  $Y_{2,3}$  为  $-20 \mu\text{m}$ , $\theta_{2,3}$  为  $-4.2 \text{ mrad}$ , $GL$  为 22.0,输出能量 0.549 mJ。在图 5 也列出了二倍频光驱动结果(虚线),在四靶远程串接中, $Y_{2,3}$  为 700  $\mu\text{m}$ , $\theta_{2,3}$  为  $-3.75 \text{ mrad}$ , $GL$  为 15.2,输出能量 9.60  $\mu\text{J}$ 。其增益区的电子温度低 30% 左右, $G$  也低 30%,但自发辐射强度高,所以单靶时,角分布的峰值强度稍高于前者。如果认为  $GL \geq 16$  和 X 光激光的能量转换效率  $\geq 10^{-6}$  才达到饱和增益的话,在四靶远程串接中,联合驱动的输出能量已达到饱和,而二倍频光驱动则比饱和低 40 倍。如果中继镜的收集效率能达到 20~40 倍,则联合驱动达到饱和尚留有相当余地,二倍频光驱动则接近饱和。

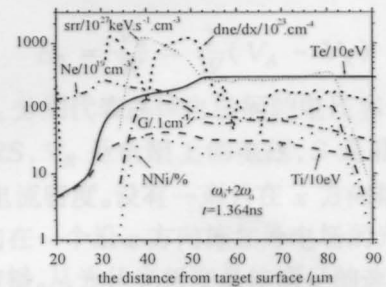


图 3 增益区的状态

Fig.3 The status of gain region

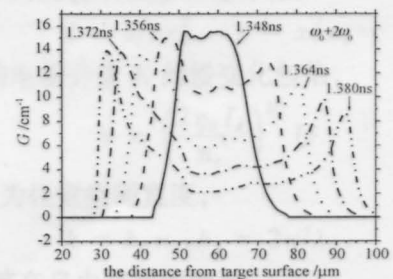


图 4 增益分布随时间变化

Fig.4 The distribution of gain vs. time

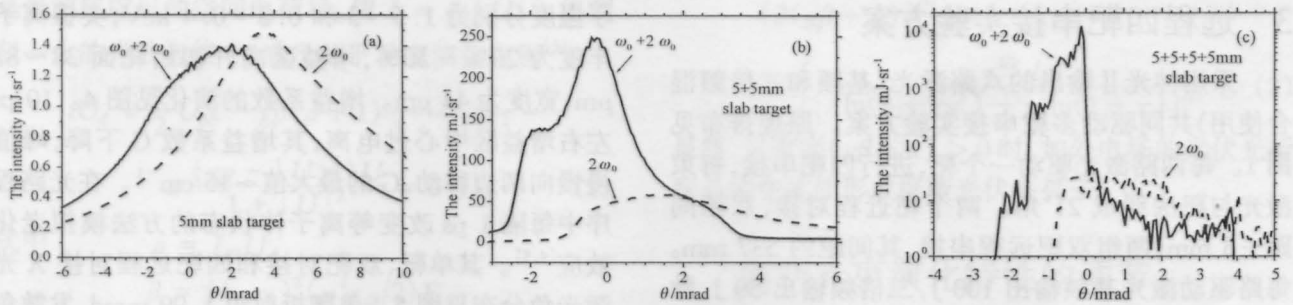


图5 X光激光角分布。(a) 单靶；(b) 双靶对接；(c) 远程四靶串接

Fig. 5 Intensity of X-ray laser vs. (a) The refracted angle for single target; (b) double targets; (c) four targets

### 5 结束语

根据理论模拟,对于类镍钼,远程四靶串接加双中继镜,基频和二倍频光联合驱动达到饱和还留有余地,其发散角 $0.2\sim 1$  mrad,脉宽约 $5$  ps。二倍频光驱动接近饱和,其发散角约 $2.7$  mrad,脉宽约 $4\sim 6$  ps。

致谢 该工作得到于敏院士的指导。王世绩院士、顾援教授、黄关龙副教授和神光装置靶场人员参加了实验方案的制订。

### 参 考 文 献

1 MacGowan B. J., Da Silva L. B., Fields D. J. *et al.*. Short Wavelength X-ray laser research at the Lawrence Livermore National Laboratory. *Phys. Fluids (B)*, 1992,

4(7):2326

2 Daido H., Sebban S., Sakaya T. *et al.*. High brightness Ni-like soft X-ray lasers for various applications, Paper presented at X-ray lasers Conf., Kyoto, Japan, 31 August - 4 September 1998, Inst. Phys. Conf. Ser., 159, 83~90

3 Tang H., Daido H., Suzuki M. *et al.*. Characterization of High Intensity Ni-like X-ray lasers and their Application Experiments (IW-06), Annual progress Report 2000, Insitute of laser Engineering, Osaka University, Japan, 23~26

4 Zhang G., Zhang T., Wu J.. Theoretical research on Ni-like ions X-ray laser pumping by multi-pulses, Paper presented at X-ray lasers Conf., Kyoto, Japan, 31 August-4 September 1998, Inst. Phys. Conf. Ser. 159. 391~394

5 Zhang G., Zhang T., Wu J.. Research on Ni-like Sm X-ray laser pumped by double short duration pulse. 强激光和粒子束, 1998, 10(3):352~356