

低强度激光泵浦类 Ni 离子 X 光激光实验^{*}

王世绩 顾 援 傅思祖 周关林 唐华泾 倪元龙

张国平 张覃鑫

上海激光等离子体研究所及高功率激光物理国家实验室
上海800-229信箱 201800

北京应用物理与计算数学研究所
北京8009信箱 100088

黄关龙 杨 军 朱健强 范滇元 林尊琪

张 杰

上海光学精密机械研究所及高功率激光物理国家实验室
上海800-211信箱, 201800

中国科学院物理研究所
北京100080

摘 要 在试运行的神光 II 装置上, 采用新设计的凸柱面透镜列阵均匀线聚焦系统, 用两束激光焦线叠加和双靶对接等技术, 以预主脉冲激光驱动方式, 在 $(5 \sim 8) \times 10^{13} \text{W/cm}^2$ 的较低强度激光泵浦条件下, 观测到 Ni-like Dy, Er, Yb 的软 X 光激光输出, 测得波长 5.02nm 类 Ni Yb 和波长 5.86nm 类 Ni Dy 的软 X 光激光的增益系数分别为 1.6cm^{-1} 和 1.4cm^{-1} 。

关键词 类 Ni 离子 X 光激光 低强度激光泵浦 凸柱面透镜列阵 焦线叠加

中图分类号 TN 24

X 射线波段激光由于波长短、亮度高, 良好的时间、空间相干性, 并能以短脉冲方式输出, 在生命科学、惯性约束聚变及其他许多科学技术领域中, 都有十分诱人的应用前景。自从 1984 年美国利弗莫尔实验室率先获得类 Ne 硒软 X 光激光输出以来^[1], 国际上 X 光激光研究取得了长足的发展, 犹以电子碰撞激发类 Ne 离子 X 光激光研究的成绩最大。其中, 利弗莫尔实验室先后获得了增益饱和的类 Ne 硒和类 Ne 钷软 X 光激光输出^[2,3], 并开始在稠密等离子体状态诊断等方面的应用研究^[4]。上海激光等离子体研究所和英国卢瑟福实验室分别获得了类 Ne 锆软 X 光激光的饱和输出^[5,6], 前者又进一步采用远距离多靶串接空间限束方案, 获得了近衍射极限的高亮度类 Ne 锆软 X 光激光^[7]。

为了提高泵浦效率, 人们在不断地寻找更优的泵浦机制和驱动方式, 其中用类 Ni 离子系列代替类 Ne 离子系列, 采用预主脉冲驱动方式, 都是行之有效的途径。法国南巴黎大学和中国西南核物理与化学研究所采用预主脉冲驱动方式在相当低的泵浦激光强度下, 分别观测到类 Ne 锌和钪的软 X 光激光^[8,9]。日本大阪大学激光工程研究所采用类似的多脉冲激光驱动方式, 在类 Ni 系列实验中也得到了成功^[10]。特别是卢瑟福实验室, 采用预主脉冲驱动方式, 在强度为 $4 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$ 基频激光辐照条件下, 获得了波长为 7.35nm 的类 Ni 钪软 X 光激光饱和输出^[11]。

本文介绍我们在神光 II 装置上进行的类 Ni 系列短波长 X 光激光实验。实验采用了预主脉冲激光驱动方式以及凸柱面透镜列阵均匀线聚焦、焦线叠加、双靶对接等技术, 在 $(5 \sim 8) \times 10^{13} \text{W/cm}^2$ 较低泵浦激光强度下, 观测到了类 Ni 镱、铟、镱软 X 光激光输出, 并测得波长为 5.02 和 5.86nm 的类 Ni 镱和镱 X 光激光的增益系数分别为 1.6 和 1.4cm^{-1} 。

* 国家 863 激光技术领域资助课题
1998年6月24日收到原稿, 1998年7月15日收到修改稿。
王世绩, 男, 1932年9月出生, 研究员

1 实验装置的有关性能

神光 II 装置是一台八路钕玻璃激光实验装置, 单路基频激光输出为 $750\text{J}/1\text{ns}$ (或 $100\text{J}/100\text{ps}$)。为了适应 X 光激光实验的要求, 装置的单纵模振荡器输出经过新颖的时空变换削波, 脉冲宽度在 $0.3\sim 1\text{ns}$ 范围内可调。

为实现预主脉冲激光输出, 在装置前级插入分光单元如图1所示。移动图中的一组全反镜, 可以调节主脉冲延迟时间; 旋转光路中的 $\lambda/2$ 波片, 可以调节预脉冲的强度比。目前, 时间间隔的调节范围为 $0.4\sim 4\text{ns}$, 强度比的调节范围为 $1\%\sim 20\%$ 。

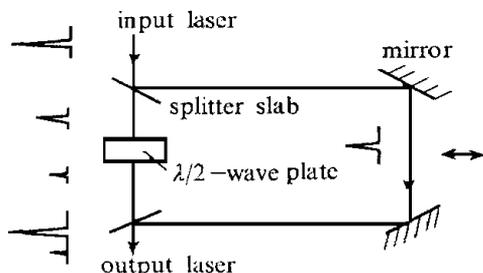


Fig 1 Beam splitter for pre-main pulse laser

图1 产生时间间隔和强度比可调的预主脉冲激光的分光单元工作原理示意图

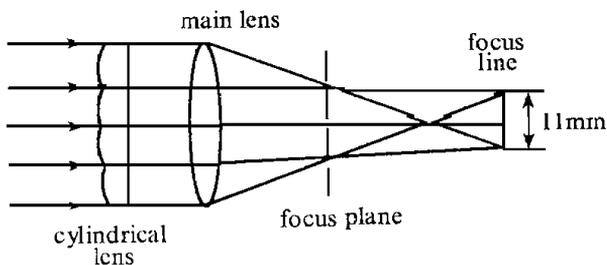


Fig 2 Convex cylindrical lens array-aspherical lens system for uniform line focus

图2 凸柱面透镜列阵-非球面主透镜线聚焦系统工作原理示意图

实验采用新设计的凸柱面透镜列阵-非球面主透镜均匀线聚焦系统。由于这一系统的组合焦面落在靶前(参见图2), 避免了主透镜膜层的激光损伤。凸柱面透镜列阵单元的宽度约为 62.5mm , 曲率半径约为 2160.2mm , 与靶室 $f/3$ (焦距 751mm) 非球面主透镜组合聚焦, 形成长约 11mm 的焦线。图3是 He-Ne 模拟激光经系统聚焦形成的焦线, 焦线尺寸约为 $11\text{mm} \times 80\mu\text{m}$, 沿长度方向光强均匀性优于 $\pm 10\%$ 。

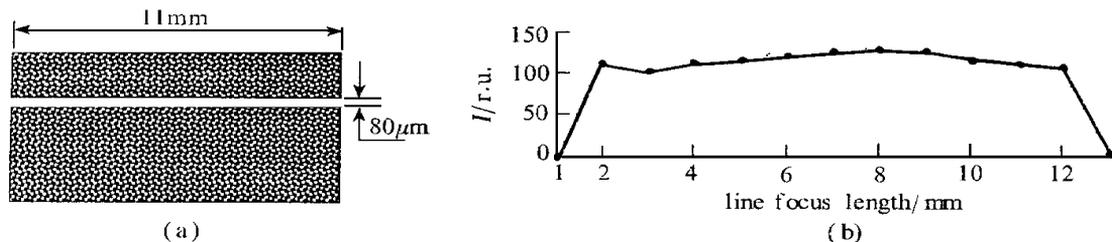


Fig 3 The uniform focus line of He-Ne laser beam produced by the convex cylindrical lens array-aspherical lens system

图3 He-Ne 激光经凸柱面透镜列阵-非球面透镜形成的均匀焦线

2 实验参数的优化

X 光激光实验的结果, 依赖于驱动激光的辐照强度 I_D 、脉冲宽度 τ_p , 以及主脉冲的延迟时间 t_d , 预脉冲的强度 I_{pre} 等。为了优化实验设计, 我们通过计算机模拟, 分别观察了这四个主要参数对实验结果的影响。模拟中, 基频激光以 21° 角入射长 10mm 平面镜靶, 激光焦线长 11mm , 宽 $86\mu\text{m}$ 。模拟结果表明:

(1) $\tau_p = 450\text{ps}$, $t_d = 2.2\text{ns}$, $I_{pre} = 10\% I_D$ 条件下, 靶面辐照激光强度从 $6 \times 10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 提高到

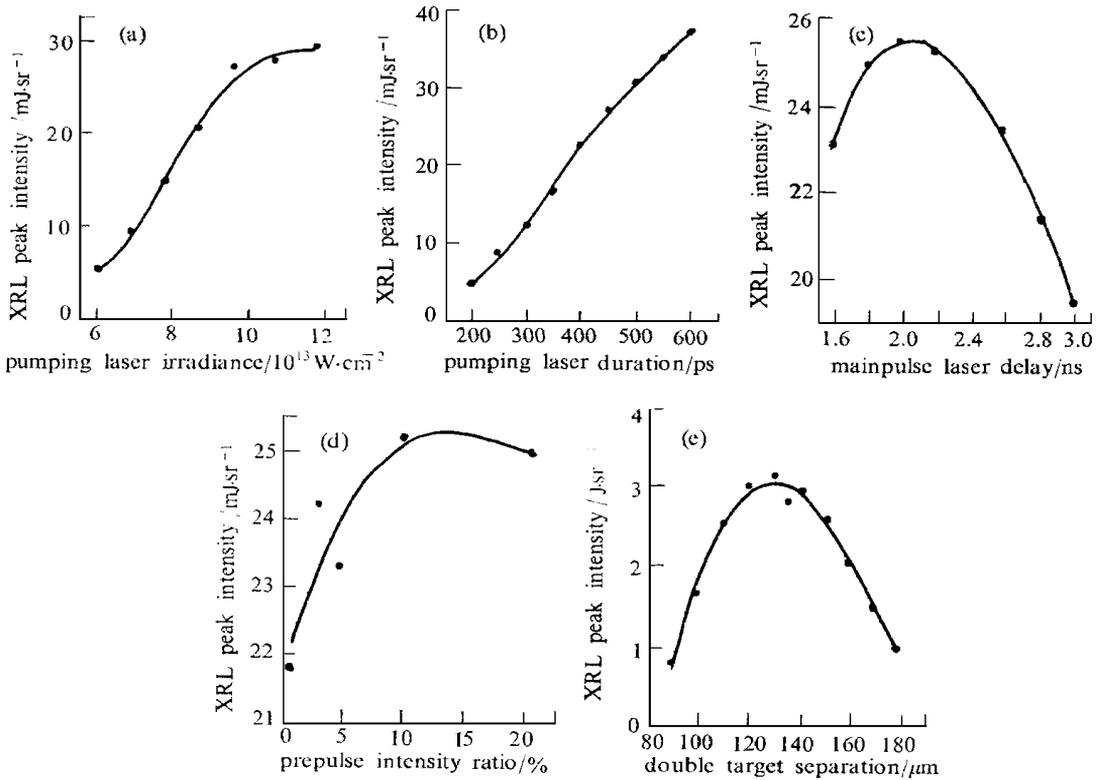


Fig 4 The simulation results of the X-ray laser peak intensity as the functions of pumping laser irradiance(a), pulse duration (b), mainpulse delay time(c), prepulse intensity ratio (d), and separation between two target surfaces(e) for Ni-like Yb

图4 类Ni镜X光激光强度随泵浦光强度(a), 脉宽(b), 主脉冲延迟时间(c), 预脉冲强度比(d)和靶面间距(e)变化的模拟结果

$1 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$ 时, X光激光输出的峰值强度增强, 增益系数增大, 光束发散角减小, 参见图4(a)。实验要求靶面激光辐照强度 $I_D = 1 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$ 。

(2) 在 $I_D = 1 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$, $t_d = 2 \text{ ns}$, $I_{pre} = 10\% I_D$ 时, 脉冲宽度 τ_p 从200ps增加到350ps, 输出X光激光峰值强度增长很快; 从400ps增加到600ps, 增长减慢, 参见图4(b)。实验选取脉冲宽度 $\tau_p = 450 \text{ ps}$ 。

(3) 在 $I_D = 1 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$, $\tau_p = 450 \text{ ps}$, $I_{pre} = 10\% I_D$ 时, $t_d = 2.0 \sim 2.6 \text{ ns}$ 范围内, 输出X光激光峰值强度的变化小于10%。延时再缩短, 等离子体来不及膨胀, X光激光折射严重, 输出强度降低; 延时再增长, 高密度区电子温度下降, 增益系数变小, 输出强度也会降低, 参见图4(c)。实验选取 $t_d = 2.2 \text{ ns}$ 。

(4) 在 $I_D = 1 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$, $\tau_p = 450 \text{ ps}$, $t_d = 2.2 \text{ ns}$ 时, $I_{pre} = (1\% \sim 20\%) I_D$, 输出强度变化最多只有10%, 实验选取 $I_{pre} = 10\% I_D$ 。

(5) 双靶对接实验结果还受靶面间距影响。在 $I_D = 1 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$, $\tau_p = 450 \text{ ps}$, $t_d = 2.2 \text{ ns}$, $I_{pre} = 10\% I_D$ 时, 两块长 $L = 10 \text{ mm}$ 平面镜靶靶端间距2mm条件下, 对不同靶面间距 $X_{1,2}$ 进行的数值模拟表明, 在 $X_{1,2} = 130 \mu\text{m}$ 时, 输出X光激光峰值强度最高, 间距为 $90 \mu\text{m}$ 或 $180 \mu\text{m}$, 强度都降低到三分之一左右, 参见图4(e)。

对于铕和钇,也进行了类似的数值模拟和相应的优化设计。

3 实验的实施

实验于1997年10月下旬起在神光II装置上进行。选定的驱动激光参数为:波长 $\lambda=1.053\mu\text{m}$,单路输出能量 $E_s=350\text{J}$,脉宽 $\tau_p=450\text{ps}$,主脉冲延迟 $t_d=2.2\text{ns}$,预脉冲强度 $I_{pre}=10\%I_D$,焦线长为 11mm ,宽为 $100\mu\text{m}$ 。考虑到靶场损耗,可聚焦率等因素,单路激光线聚焦光强 $I_s=5\times 10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 。为达到设计要求的 $1\times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 的辐照光强,采用了两路激光焦线叠加的方案,如图5所示。南路激光束 B_2 和 B_1 线聚焦叠加辐照东靶,北路激光束 B_7 和 B_5 线聚焦叠加辐照西靶。激光光轴与靶法线夹角都是 21° ;这样,靶面辐照光强 $I_D=2I_s\cos 21^\circ=1\times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 。南北两路激光光轴横向错开 12mm ,南路激光延迟 40ps 。

为了实现两根焦线的精密重叠和两组焦线的准确对接,建立了靶场监视系统(图5a中的 C_2 和 C_3)以监测激光聚焦到靶面形成的焦线的位置和宽度,以及焦线重叠和对接的情况,并通过调节靶场伺服反射镜、柱面镜列阵和非球面主透镜,调整焦线的位置和方向,直至达到实验要求。

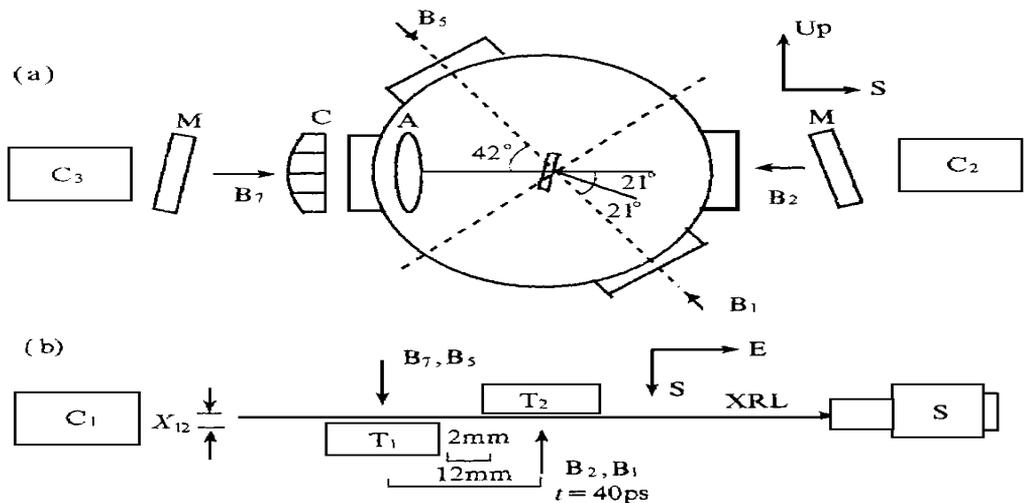


Fig 5 The schematic diagram of experimental arrangement (a) driving laser beam arrangement and (b) double target coupling B_1, B_2, B_5 and B_7 are the incident pumping laser beam S M is the mirror C and A are the convex cylindrical lens array and the aspherical lens T is the target

C_1, C_2 and C_3 are the target position monitors S is the grating spectrometer

图5 实验排布示意图 (a) 驱动激光光路排布, B_1, B_2, B_5, B_7 为入射激光束, T 为靶,

C 和 A 是柱面镜列阵和非球面主透镜, M 是靶场伺服反射镜, C_2, C_3 为靶位监视系统

(b) 对接双靶光路排布 S 为光栅谱仪, C_1 为靶位监视系统

实验辅助靶架保证靶法线与入射激光光轴的夹角为 21° 。靶的位置、靶法线的指向,以及对接双靶的靶面间距,采用文献[4]介绍的方法在实验室精密装调。安装到靶室主靶架上后,在靶场监视系统 C_2, C_3 和靶室西侧监视系统 C_1 监测下(见图5b),调节主靶架的三维平动和一维转动,以及辅助靶架的另两维转动,实现靶的现场精密调整。原则上,靶法线指向的调整精度可达 0.2mrad ;靶南北方向定位精度可达 $\pm 10\mu\text{m}$,其余两个方向的定位精度可达 $\pm 100\mu\text{m}$ 。

装在靶室内东头的平焦场软X光光栅谱仪用来记录X光激光谱线。谱仪摄谱波段为1~10nm,入射狭缝宽约为50 μ m,离X光激光出射端距离约为223mm。谱仪用国产5F软X光底片作时间积分光谱记录。为防止底片饱和,用适当厚度的聚苯乙烯(C₈H₈)薄膜衰减,对于波长5.02nm的类Ni镱激光,C₈H₈的吸收系数为2.7 $\times 10^3$ cm²/g。

4 实验结果和讨论

由于神光II装置尚处于试运行阶段,没有稳定地满足实验要求,类Ni镱实验中辐照光强约为8 $\times 10^{13}$ W/cm²,类Ni镱和铟实验的辐照光强为(5~6) $\times 10^{13}$ W/cm²。然而,在此较低强度的激光辐照条件下,还是观测到了双靶对接类Ni镱、铟镱的X光激光谱线,并测量了类Ni镱和铟X光激光的增益系数,结果如表1所列。

表1 类Ni镱和铟软X光激光实验结果

Table 1 Experimental results for Ni-like Yb and Dy X-ray laser

	driving laser				$I_D / 10^{13} \text{W cm}^{-2}$	target		$\rho_d / \mu\text{g cm}^{-2}$	λ / nm	X-ray laser		
	E_s / J	τ_p / ps	$I_0 / 10^{13} \text{W cm}^{-2}$	L / mm		$X_{1,2} / \mu\text{m}$	$I_x / \text{ph } \mu\text{m}^{-1}$			g / cm^{-1}		
Shanghai	308	312		500	7.1	Yb	10	583.2	5.02	368	1.6	
1997.10	358	340	323	262	7.6+6.3		10+10	200		1045.0	1720	
	284	269		520	5.8	Dy	10	583.2	5.86	910	1.4	
	195	183	218	202	4.5+5.0		10+10	180		817.2	3650	
O saka	E08	254	G11	260	100	24+24	Yb	8+5	200	5.02	1180*	6.6
1998.5	E08	244	G11	256	100	23+24		8+8	200		8520*	

* CCD data

实验采用预主脉冲驱动方式,主脉冲延迟2.2ns。实验中,预脉冲强度从3%变化到20%,输出X光激光峰值强度没有明显变化。镱双靶靶面间距 $X_{1,2}$ 从130 μ m增加到200 μ m,铟双靶靶面间距取140、180和220 μ m,输出X光激光峰值强度也只有很小的变化。

1998年5月,在日本大阪大学激光工程研究所进行的中日合作X光激光实验,开展了预主脉冲激光驱动类Ni镱实验,实验条件和结果有所不同,也列于表1。

分析这一轮实验的结果,并结合卢瑟福实验室和大阪大学的实验,我们觉得,即使在较低强度驱动激光泵浦条件下,也能获得近“水窗”的X光激光输出。但要获得足够高的增益系数,实现饱和输出,除了进一步优化泵浦条件外,泵浦激光应该有足够高的强度。在神光II装置实现高水平稳定运行后,采用焦线叠加、多靶串接等技术,有可能实现近“水窗”X光激光饱和增益。

提高X光激光的转换效率,实验的优化设计非常重要。卢瑟福实验室类Ni钇(Z=62)实验,驱动激光脉宽为75ps,大阪大学类Ni镱(Z=70)实验,脉宽为100ps。按我们的数值模拟,工作物质原子序数Z越高,驱动激光脉冲要宽一些,脉宽的选择要进一步优化。预脉冲的作用是肯定的,预主脉冲的时间间隔对结果影响很大。卢瑟福和我们的实验主脉冲都延迟2.2ns,而大阪大学的实验在延迟1.5ns时效果最好。按物理分析,工作物质Z越高,延迟时间要短一些,以免电子温度下降太多,这个参数也要优化。在双靶对接实验中,工作物质Z高,由于增益区电子密度高,离靶初始表面近,靶面间距应该小些;但此时电子密度梯度大,X光激光折射角大,靶面间距 $X_{1,2}$ 又该大些。卢瑟福的类Ni银和钇实验,靶面间距分别取为150 μ m和175 μ m;

大阪大学类Ni镜实验,靶面间距200 μm 。这又是一个要优化的参数。实验设计的优化,既要数值模拟,更要靠实验观察。

为便于结果分析,应该加强有关的诊断。例如,利用X光针孔相机和双狭缝相机,可以观测线聚焦形成等离子体的位置、尺寸、均匀性。利用X光晶体谱仪可以拍摄等离子体自发辐射的X光线谱,有助于分析等离子体离子丰度、电子温度和电子密度等状态参量。有的实验室注意到在获得较高强度类Ni离子X光激光的同时,都能观察到较强的类Co乃至类Fe离子特征线,这是值得重视的。

致谢 对于神光II装置运行室积极的配合,同济大学的实验用靶和衰减膜的研制,表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Matthews D L, et al *Phys Rev Lett*, 1985, **54**: 110
- 2 Koch J A, et al *Phys Rev Lett*, 1992, **68**: 3291
- 3 Da Silva L B, et al *Opt Lett*, 1993, **18**: 1174
- 4 Da Silva L B, et al in X-ray Laser-1996, DP Conf series No. 151, p. 496
- 5 Wang S, et al *Sci China*, 1991, **A34**: 1388
- 6 Carillon A, et al *Phys Rev Lett*, 1992, **68**: 2917
- 7 Wang S, et al *Chinese journal of lasers*, 1994, **6**: 1
- 8 Jaegle P, et al in X-ray lasers-1994, AIP Conf proc No. 322, p. 25
- 9 蔡玉琴等 强激光与粒子束, 1997, **9**: 407
- 10 Daido H, et al *Phys Rev Lett*, 1995, **75**: 1074
- 11 Zhang J, et al *Science*, 1997, **276**: 1097

EXPERIMENT ON Ni-LIKE IONS X-RAY LASERS WITH LOWER PUMPING LASER IRRADIANCE

Wang Shiji, Gu Yuan, Fu Sizu, Zhou Guanlin, Tang Huajing, Ni Yuanlong

*Shanghai Institute of Laser Plasma, and National Laboratory on High Power Laser and Physics,
P. O. Box 800-229, Shanghai 201800*

Huang Guanlong, Yang Jun, Zhu Jianqiang, Fan Dianyuan, Lin Zunqi

*Shanghai Inst of Optics and Fine Mechanics, and National Lab on High Power Laser and Physics,
P. O. Box 800-211, Shanghai 201800*

Zhang Guoping, Zhang Tanxin

*Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics,
P. O. Box 8009, Beijing 100088*

Zhang Jie

Institute of physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080

ABSTRACT The Ni-like Dy, Er and Yb X-ray lasers were observed under lower pumping laser irradiance of $(5-8) \times 10^{13} \text{W}/\text{cm}^2$ using the pre-mainpulse laser driving scheme. The new convex cylindrical lens array was designed. The techniques of focus line overlapping and double target coupling were used. The gain coefficient of 1.6 and 1.4cm^{-1} was measured for Ni-like Yb and Dy laser respectively.

KEY WORDS Ni-like ion X-ray laser, lower pumping laser irradiance, convex cylindrical lens array, focus line overlapping