

用于 X 射线激光实验研究的列阵柱面 透镜线聚焦系统*

陈万年 王树森 陈 斌 徐艾芬

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

毛 楚 生

(中国工程物理研究院上海激光实验室, 上海 201800)

提 要

用平行排列的柱面透镜列阵与非球面会聚透镜组成一个新颖的激光线聚焦系统, 它能获得光强分布非常均匀的、能应用于 X 射线激光实验研究的高功率激光焦线。实验证明该聚焦系统有良好的特性。

关键词: X 射线激光, 高功率激光线聚焦, 列阵柱面透镜。

一、引 言

X 射线激光实验研究, 取得了很大的进展和突破^[1]。由于 X 射线激光波长短, 且目前状况多数为单程自发辐射放大, 它要求泵浦功率相当高。因此人们希望把高功率激光束会聚成激光焦线, 辐照 X 光激光靶, 以获得 X 射线激光输出。目前实验室 X 射线激光研究中所使用的高功率激光线聚焦系统有很多种, 但主要有美国劳仑兹、列弗莫尔国家实验室使用的单柱面透镜与非球面会聚透镜组成的系统^[2], 英国卢瑟福实验室的离轴球面反射镜与非球面会聚透镜组成的线聚焦系统^[3, 4]。本文介绍一种新颖的高功率激光束线聚焦系统, 用该系统将高功率激光束会聚成高纵横比、能量分布均匀的焦线, 在我国的 LF-12 高功率激光装置上获得了 X 射线激光的输出。

二、高纵横比、均匀照明线聚焦系统

在 X 射线激光实验中, 作为泵浦源的高功率激光焦线应满足:

- (1) 焦线长度为厘米量级, 宽度为几十至百微米量级, 是一个高纵横比的激光焦线;
- (2) 沿焦线长度方向的光强分布(以下简称焦线光强分布)应均匀, 以便对 X 射线激光靶进行均匀辐照;
- (3) 激光焦线的长度方向与被会聚激光的入射光线应尽可能地垂直, 以提高 X 射线激光靶对泵浦激光能量耦合效率;

(4) 激光焦线长度方向应呈水平位置或根据要求处于便于测试和诊断的位置。

通常,作为 X 射线激光的泵浦源,高功率激光装置的输出激光束其截面呈圆形的,而被会聚的高功率激光焦线上任何一点的光强,它是被会聚的激光束截面上的、且垂直于焦线长度方向上的相应线元上的光强积分而成。因此形成的焦线光强分布是很不均匀的,焦线中间部分光强最强,二边逐渐减弱直至为零。因此为获得光强均匀分布的高功率激光焦线,往往在入射的高功率激光束中放置一个内接方形或近似方形的光阑。这样,虽然激光焦线的光强分布均匀了些,但其能量被光阑挡掉了 30% 以上^[3,4],既缩短了焦线长度,又降低了功率,另外,还必须要求被会聚激光束截面内光强空间分布非常均匀,否则即使加方形光阑也得不到光强分布均匀的焦线,当然,也就很难用到 X 射线激光实验研究中。

(1) 为克服上述缺点,采用大焦斑均匀照明的列阵方法^[5],本文提出了列阵柱面透镜的方法,研制了光强均匀分布的激光线聚系统。该系统可以克服某些激光线聚焦系统的缺点,是一种新颖的,具有优良性能的激光线聚焦系统。图 1、图 2 为一个六单元列阵柱面透镜的结构图和线聚焦光路原理图。

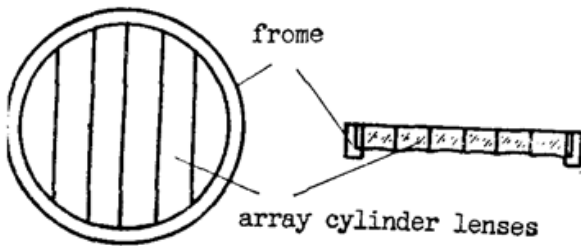


Fig. 1. Six-elements array cylinder lenses construction

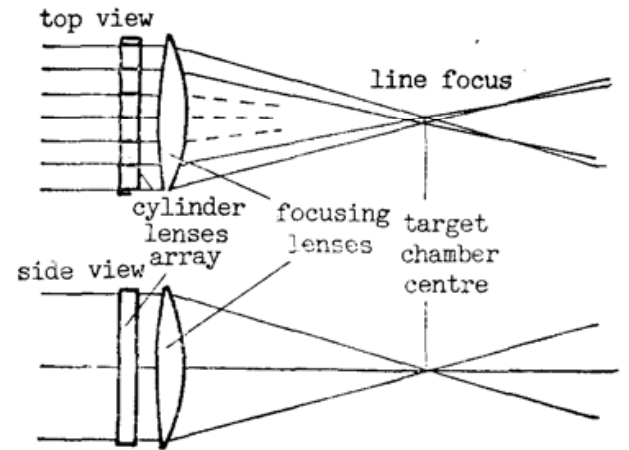


Fig. 2. Focusing configuration of the cylinder lenses array for X-ray laser experiments

列阵柱面透镜是用多块(2~6块)长条形柱面透镜整齐平行排列组合与非球面会聚透镜组成。所有长条单元柱面透镜有相同的宽度和焦距,由几何光学计算得焦线长度为

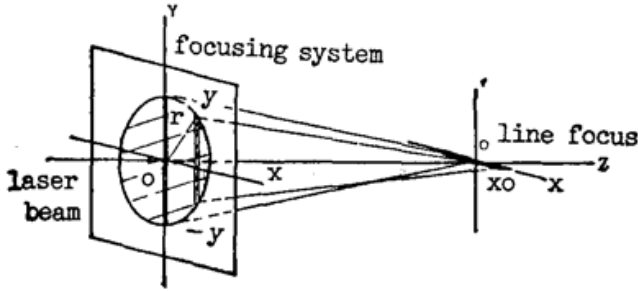
$$L = (d \cdot F / F_c) = (D \cdot F / n F_c), \quad (1)$$

式中 L 为焦线长度; d 为单元柱面透镜宽度; F_c 为单元柱面透镜的焦距; F 为非球面会聚靶镜焦距; D 为被会聚高功率激光束口径; n 为列阵柱面透镜单元数目。由图 2 可知,当高功率激光入射到排列整齐的柱面透镜列阵上时,每单元柱面透镜与非球面会聚透镜将入射到该单元柱面镜上的那部分激光束共同会聚到非球面透镜焦点处,并形成一条激光焦线,焦线长度由(1)式决定。显然,该焦线的光强分布是不均匀的。对称的另一单元柱面透镜同样将部分入射激光束会聚成一条激光焦线。该焦线的光强分布也是不均匀的,但两条激光焦线光强分布恰好相反,叠加后光强分布相互补偿,从而变成一条光强分布比较均匀的焦线。所有单元(三单元或六单元)柱面透镜与会聚透镜所形成的焦线叠加在一起,将会形成一条光强分布非常均匀的激光焦线。另外,由于是多条激光焦线的叠加补偿和平均,故对被会聚的高功率激光束光强的空间分布均匀性的要求大大降低,即使光束空间分布不均匀也能获得光强均匀分布的激光焦线。

(2) 如果 x 、 y 坐标为列阵柱面透镜和入射光束截面坐标, 柱面透镜中心与光束中心为 O 点, 光束截面的任一点半径 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, 于是入射到柱面透镜上的激光束(假定被会聚的激光束光强空间分布是高斯型的), 其在任一点的光强可以表示为

$$i(x, y) = i_0 \exp[-2(x^2 + y^2)/r_0^2] = i_0 \exp[-2(x/r_0)^2] \exp[-2(y/r_0)^2]. \quad (2)$$

如图 3 所示, 可以假定激光焦线所处的平面也是 x 、 y 坐标, 沿焦线长度方向为 x 轴, 中心点为 O 。那么激光焦线上任一点的光强为入射光束 y 轴方向相应线元上光强的积分。



$$I(x) = \int_{-y}^y i(x, y) dy = \sqrt{\pi/2} i_0 r_0 \exp[-2(x/y_0)^2] \operatorname{erf}(u),$$

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du, \quad u = \sqrt{2} y/r_0. \quad (3)$$

Fig. 3 The coordinate of the line focus system

对于三单元列阵柱面透镜的焦线光强分布为

$$I(x) = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\pi}{2}} i_0 r_0 \left\{ \exp[-2(x/3r_0)^2] \operatorname{erf}(u_1) + \exp[-2\left(\frac{x+2r_0}{3r_0}\right)^2] \operatorname{erf}(u_2) + \exp[-2\left(\frac{x-2r_0}{3r_0}\right)^2] \operatorname{erf}(u_3) \right\}, \quad (4)$$

$$u_1 = \sqrt{2} \sqrt{1 - (x/3r_0)^2}, \quad u_2 = \sqrt{2} \sqrt{1 - [(x+2r_0)/3r_0]^2},$$

$$u_3 = \sqrt{2} \sqrt{1 - [(x-2r_0)/3r_0]^2}.$$

对于六单元列阵柱面透镜的焦线光强为

$$I = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{\pi}{2}} i_0 r_0 \left\{ \exp[-2\left(\frac{x+r_0}{6r_0}\right)^2] \operatorname{erf}(u_1) + \exp[-2\left(\frac{x-r_0}{6r_0}\right)^2] \operatorname{erf}(u_2) + \exp[-2\left(\frac{x+3r_0}{6r_0}\right)^2] \operatorname{erf}(u_3) + \exp[-2\left(\frac{x-3r_0}{6r_0}\right)^2] \operatorname{erf}(u_4) + \exp[-2\left(\frac{x+5r_0}{6r_0}\right)^2] \operatorname{erf}(u_5) + \exp[-2\left(\frac{x-5r_0}{6r_0}\right)^2] \operatorname{erf}(u_6) \right\}, \quad (5)$$

$$u_1 = \sqrt{2} \sqrt{1 - \left(\frac{x+r_0}{6r_0}\right)^2}, \quad u_2 = \sqrt{2} \sqrt{1 - \left(\frac{x-r_0}{6r_0}\right)^2},$$

$$u_3 = \sqrt{2} \sqrt{1 - \left(\frac{x+3r_0}{6r_0}\right)^2}, \quad u_4 = \sqrt{2} \sqrt{1 - \left(\frac{x-3r_0}{6r_0}\right)^2},$$

$$u_5 = \sqrt{2} \sqrt{1 - \left(\frac{x+5r_0}{6r_0}\right)^2}, \quad u_6 = \sqrt{2} \sqrt{1 - \left(\frac{x-5r_0}{6r_0}\right)^2}.$$

由(3)~(5)式用数值计算, 得到单柱面透镜, 3单元, 6单元列阵柱面透镜线聚焦系统形成的焦线光强分布如图 4 所示。由图 4 可知六单元列阵线聚焦系统的焦线光强分布比三单元, 单柱面透镜为好。对于不均匀性可以定义为 $\eta = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 。将 I_{\max} , I_{\min} 值代入由计算得单柱面透镜系统 $\eta = 1$; 三单元列阵系统 $\eta = 5 \times 10^{-2}$; 六单元列阵系统 $\eta = 1.6 \times 10^{-2}$ 。

如果被会聚的高功率激光束光强空间分布是均匀的, 则列阵柱面透镜成聚系统形成的

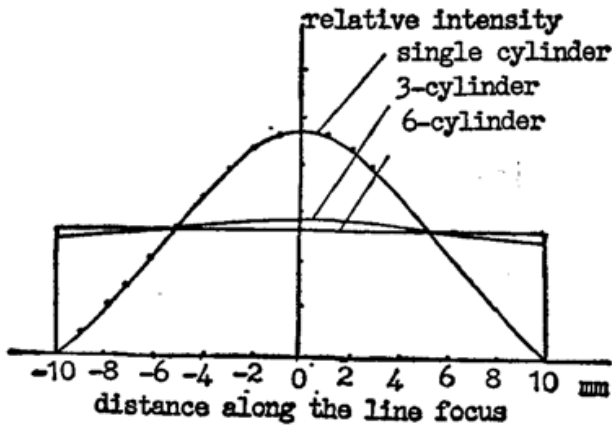


Fig. 4 Theoretic calculation intensity distribution along the line focus

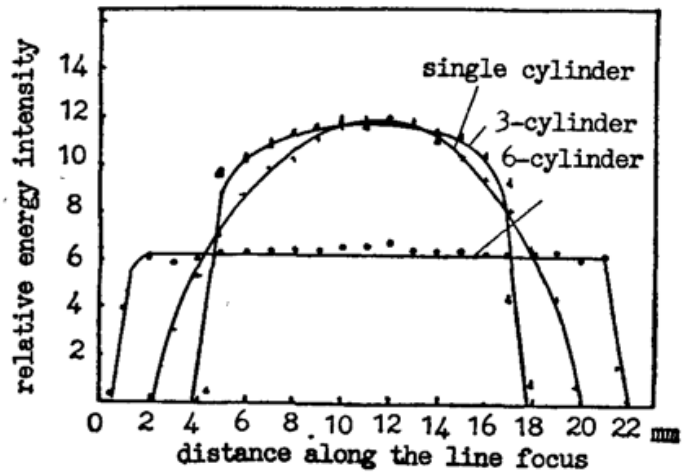


Fig. 5 Relative energy distribution along the line focus produced a single, 3-, 6-elements cylinder lens using CW YAG laser beam

焦线光强分布更均匀。六单元列阵系统, 其焦线光强不均匀性接近 1×10^{-2} 。

(3) 实际测量了单柱面透镜, 列阵柱面透镜的焦线光强分布与宽度。用波长 $1.06 \mu\text{m}$ 的连续 YAG 激光, 扩孔至 $\phi 180 \text{ mm}$ 并会聚成激光焦线, 用光电探测器对焦线长度方向逐点测量光强的相对值, 其结果如图 5 所示*, 实验测量证实了理论的计算: 单柱面透镜线聚焦系统焦线光强分布是很不均匀的, 三单元列阵线聚焦系统的焦线光强不均匀性 $\leq 10\%$, 而六单元列阵线聚焦系统焦线的光强不均匀性 $\leq 5\%$ 。

测量透过狭缝的激光焦线, 在 $80 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 宽度内占有能量的比例为: 单柱面透镜、单元列阵, 六单元列阵线聚焦系统都占 90% 以上的激光能量。

三、列阵柱面透镜线聚焦使用于 X 射线激光实验

在 LF-12 高功率激光装置上进行了 X 射线激光实验研究。使用了列阵柱面透镜线聚焦系统, 被会聚的高功率激光束口径为 $\phi 180 \text{ mm}$, 非球面会聚透镜焦距 $f = 340 \text{ mm}$, 产生的焦线长 20 mm, 25 mm 两种, 线宽约 $100 \mu\text{m} \sim 130 \mu\text{m}$, 对不同长度的平面靶进行均匀照明泵浦作 X 射线激光增益实验研究。

(1) 在电子碰撞激发类氩锆平面靶的 X 射线激光增益实验中, 用六单元列阵柱面透镜线聚焦系统, 焦线长 20 mm, 激光泵浦光强为 $1.2 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 得到 $3p-3s$ 跃迁的软 X 射线激光的明显增益, 波长为 19.61, 23.22, 23.63, 24.73 和 28.65 nm, 增益 G 分别为 3.06, 3.99, 3.72, 2.36 及 4.59 cm^{-1} , 靶长 $8 \text{ mm} \sim 18 \text{ mm}$ ^[6]。

(2) 复合泵浦类锂硅离子平面靶软 X 射线激光实验研究中, 用六单元列阵柱面透镜线聚焦系统, 焦线长 20 mm, 均匀辐照泵浦平面硅靶, 光强为 $1.7 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。实验中观察到 $5f-3d$, $5d-3p$ 跃迁的软 X 射线激光增益, 相应波长为 8.89, 8.73 nm, 增益 G 分别为 1.5, 1.4 cm^{-1} , 靶长 $L = 1.8 \text{ cm}$, 故 GL 分别为 2.7, 2.5 ^[7~9]。值得提出的该实验是在较低

* 上述测量的结果还不包括被会聚连续波 YAG 激光器的输出能量的不稳定, 改进测量方法还可以获得更准确的结果, 光强分布更为均匀。

的光泵功率密度下获得的。在以后的实验中还得到波长为 7.58, 7.46 nm 软 X 射线激光的增益, G 分别为 1.3, 1.4 cm^{-1} , 靶长为 1.8 $\text{cm}^{[9]}$ 。上述 8.89, 8.73, 7.58, 7.46 nm 的软 X 射线激光输出是国际上第一次实现。

(3) 在电子碰撞激发类氦锆平面双靶对接耦合的 X 射线激光实验中, 用四单元列阵柱面透镜线聚焦系统, 产生长 25 mm 的激光焦线辐照泵浦锆平面厚靶, 并精确地对接二条激光焦线, 二条激光焦线分别由二路对打的高功率激光形成。二平面锆靶相对放置, 相互呈 7~8 mrad 的角度, 相对间隔约 320 μm , 二靶对接后长度达 4 cm, 激光焦线泵浦光强为 $1.4 \times 10^{13} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 获得了 3p—3s 跃迁的 19.6, 23.2, 23.6, 24.7 和 28.6 nm 软 X 射线激光的增益^[10]。增益 G 最大达 3.4 cm^{-1} , 靶长 4 cm, 故 GL 为 13.6。该对接方法也为国际首创, 为今后高增益 X 射线激光实验提供了有效的途径。

参加该工作的还有顾亚清, 王国兴, 强勇华、叶强, 王绮红等。该工作一直得到王世绩, 范滇元教授的支持、帮助和指导, 作者对此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] S. Yasokobi; *Photonics Spectra*, 1987, No. 11 (Nov), 65~68.
- [2] L. G. Sappala; *Laser Program Annual Report (LLNL)*, 1984, 2~47, 48, 51.
- [3] I. N. Ross *et al.*; *J. Phys. (E) Science Instrument*, 1985, 18, No. 1 (Jan), 169~172.
- [4] I. N. Ross *et al.*; *Appt. Opt.*, 1987, 26, No. 9 (Sep), 1585~1586.
- [5] 邓锡铭等; *中国激光*, 1985, 12, No. 5 (May), 257.
- [6] 淳于书泰等; *强激光与粒子束*, 1990, 2, No. 3, 280.
- [7] 徐至展等; *中国激光*, 1989, 16, No. 10 (Oct), 616.
- [8] Zhi-Zhan Xu *et al.*; *Appl. Phys. (B)*, 1990, 50B, No. 2 (Feb), 147~151.
- [9] Zhi-Zhan Xu *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56, No. 24 (11 Jun), 2370~2372.
- [10] 王世绩等; *强激光与粒子束*, 1990, 2, No. 3, 273~278.

Cylinder lenses array line focus system for X-ray laser experiments

CHEN WANNIAN, WANG SHUSEN, CHEN BIN AND XU AIFEN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Academia Sinica, Shanghai 201800)

MAO CHUSHENG

(Shanghai Laser Laboratory, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800)

(Received 11 January 1991; revised 19 March 1991)

Abstract

A novel laser line focus system using a lens and a parallel cylinder lens array can produce an uniform energy distribution line focus. Irradiation of the plane targets with high power laser line focus in various experiments. X-ray laser gain and excellent performance have been obtained.

Key words: X-ray laser, laser line focus, cylinder lenses array.