

光楔列阵线聚焦系统的研制*

蔡邦维 吕百达 刘忠永 张彬 冯国英

(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

提要 报道七单元光楔列阵线聚焦系统的设计原理和焦线特性的测试结果。

关键词 激光线聚焦, 光楔列阵, 均匀照明

1 引言

X射线激光实验研究的靶面均匀照明、激光切割焊接、热处理加工等高功率激光应用技术中,要求将出射高斯激光束的强度分布整形变换成一条光强均匀分布的细长焦线。近年来,国内外对此作了许多研究工作,采用的技术方案各有千秋^[1~4]。众所周知,高斯光束经常规单柱面透镜系统聚焦后,焦线中心光强最大,两端逐渐减少至零,呈所谓的“船形光斑”。虽然使用狭缝光阑将两端不均匀部分挡去,只取中间一段作为泵浦光,使焦线的不均匀性减至35%左右,但总能量却损失了约30%。列阵柱面系统能使焦线不均匀性下降到5~10%^[1];1991年,D. M. Villeneuve等人采用十列阵光楔系统用于X射线激光靶面均匀照明^[2]。我们充分吸取了国内外各家之长处,研制成功直径 $\phi 105$ mm,奇数光楔列阵线聚焦系统,它具有对光束整形性能好,不受入射光场影响,能量损失小,抗光损伤阈值高,实用性强,加工、装校方便,造价低等许多优点。

2 设计原理及参数选择

光楔列阵(Segmented wedge array, SWA)和柱面列阵(Cylinder lenses array, CLA)线聚焦系统都能改善线长的均匀性,获得“平顶光强”分布,但前者的加工难度和造价比后者低。CLA技术方案^[1]的主要问题是,条形大尺寸单柱透镜的曲率半径、母线偏心、扭曲、楔角偏差、列阵总体拼接误差和大口径非球面的精度等因素都直接影响焦线的成像质量,而高精度非球面系统的制造困难大,造价高,精度很难保证。

SWA线聚焦系统由正柱透镜 F 和若干平行排列的光楔透镜 W 组成,两者相互正交,见图1。柱透镜 F 将入射激光束在垂直方向聚焦,获得窄线宽, W 的作用是将入射光等分割成若干子光束,以相同偏角折射后在同一焦面 L 处会聚,彼此重合叠加,使各子束光强分布的不均匀性

* 国家高技术 863 资助项目。

相互平均补偿,从而得到一条长度与单元列阵宽度 W_0 相等,光强分布近似于“平台”的均匀细长焦线。SWA 各单元的楔角是不相等的,由几何光学求得第 m 单元光楔的楔角 α_m 为

$$\alpha_m = \frac{1}{n-1} \operatorname{tg}^{-1} \frac{y_m}{L} \quad (1)$$

式中, n 表示 SWA 材料的折射率, y_m 为第 m 个单元的中心与光轴之间的距离, L 是 SWA 到焦线的距离。当 $\alpha_m < 5^\circ$ 时,作小角近似,可取 $\alpha_m \approx \frac{1}{n-1} \frac{y_m}{L}$ 。焦线的长度与单元光楔的宽度 W_0 相等。设入射激光束的直径为 D , SWA 的列阵总数为

$$N = D/W_0 \quad (2)$$

柱透镜的焦距 F 取大一些为好,使相对孔径 $D/F \ll 1$,系统的像差小,成像质量高。

按照物理光学,焦线上的光强应是各单元列阵在焦线上产生的光场复振幅的相干叠加,其场分布由广义菲涅耳衍射积分方程求得。

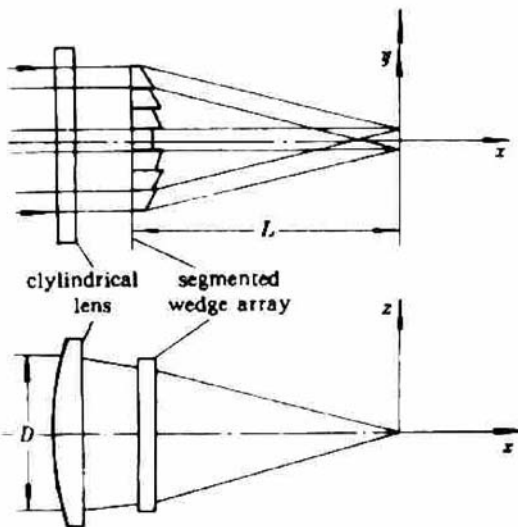


Fig. 1 Focusing configuration of a segmented wedge array (SWA) system

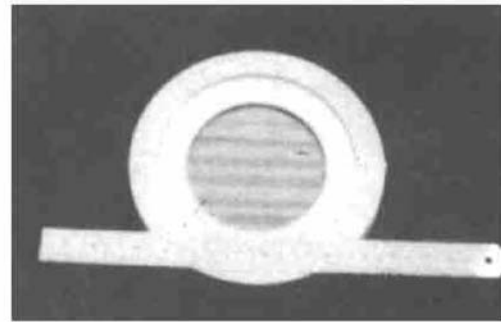


Fig. 2 Photograph of the seven-elements SWA

根据理论分析、权衡选择参数,我们研制的七列阵 SWA 如图 2 照片所示。列阵数 N 为奇数,中间那块子列阵是无楔角的平行平面,准直光通过中心不发生折射,仍为平行光。与 N 为偶数相比,此改进有利于工作面(靶面)的瞄准。单元光楔的几何尺寸为 $105 \times 15 \times 4 \text{ mm}^3$,材料为 K9 光学玻璃。为了保证各子束在同一位置会聚,对光楔的加工误差、拼接精度作了严格控制。经测试单元光楔的楔角及偏差依序列于表 1。角度测量用 JJC15 光学测角比较仪,测量精度 $\leq 15''$,角规经中国测试技术研究院测定,最大误差 $\pm 2''$ 。光楔的斜面、底面、侧面的平面度为 $\lambda/5 \sim \lambda/10$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 。相邻光楔侧面经高精度抛光后,采取光胶技术拼接成整体,既减少了光能损耗,又具有较强的抗光损伤能力。

Table 1 Parameters and errors of SWA

Wedge arrangement	α_3	α_2	α_1	α_0	α_{-1}	α_{-2}	α_{-3}
Wedge angle (deg.)	9.959	6.649	3.328	0.000	3.328	6.649	9.959
	-0.006	-0.003	-0.005	+0.003	-0.005	-0.003	+0.006
Side-parallelism error (deg.)	-0.003	+0.003	-0.008	+0.003	-0.011	-0.008	+0.011
Side-perpendicularity error (deg.)	+0.006	-0.003	+0.006	-0.008	+0.066	+0.006	-0.008

3 实验结果与讨论

测定 SWA 系统聚焦特性的实验装置如图 3 所示。单模 He-Ne 激光经望远镜扩束成口径 $\phi = 100 \text{ mm}$ 准直平行光后,垂直射入被测线聚焦系统,在焦面形成一定长度和宽度的细长焦线,用 GS-1 型全息干版和光电扫描探测器分别记录测量焦线的几何尺寸及光强分布。实验测定了单柱透镜和 SWA 系统的聚焦特性,并对二者作了比较及分析讨论。

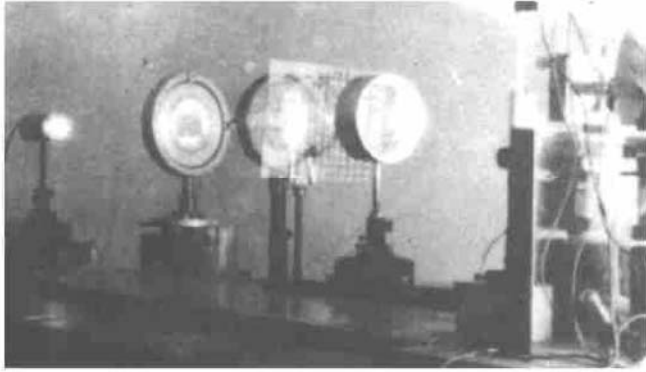


Fig. 3 Experimental arrangement

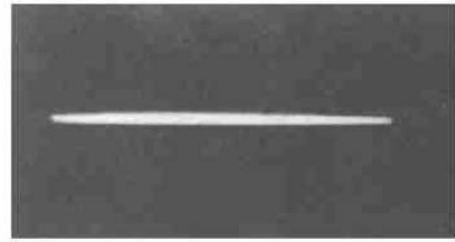


Fig. 4 Focus of a Shape of boat

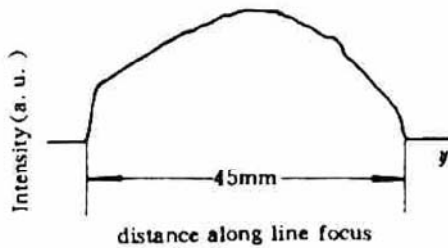


Fig. 5 The intensity variation along the line focus of a single cylindrical lens (SCL) system

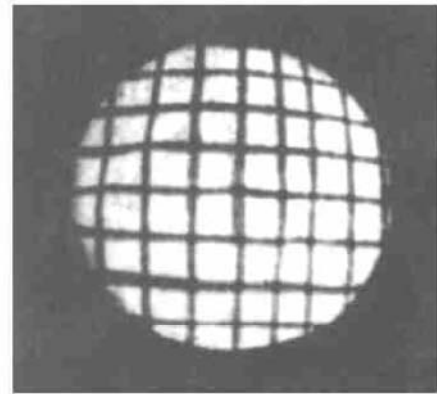


Fig. 6 A screen plate

3.1 单柱透镜与主聚焦镜组合系统的测定

实验用的负柱透镜口径 $D = 90 \text{ mm}$, 焦距 $F = 700 \text{ mm}$, 消球差主聚焦透镜 $D = 150 \text{ mm}$, $F = 720 \text{ mm}$, 摄得的焦线照片见图 4, 为“船形光斑”, 线长 45 mm 。图 5 是用岛津 CS-910 型扫描仪沿焦线长度方向测得的光强分布曲线, 不均匀性约为 50%, 均匀性很差。当在入射光场中, 插入一个用平板玻璃作成的网格板(图 6), 摄得的焦线照片如图 7 所示, 光强度曲线图 8 上的四个凹陷与网格板上的黑线相对应, 表明单柱透镜线聚焦系统光场分布受入射不均匀光场的同步调制。

3.2 SWA 系统聚焦特性的测定

测量装置如图 3 所示, 研制的七单元 SWA 有效通光口径 $D = 105 \text{ mm}$, 与焦面距离 $L = 500 \text{ mm}$, 各楔角值列于表 1, 正柱透镜直径 $D = 105 \text{ mm}$, 焦距 $F = 200 \text{ mm}$, 置于 SWA 后 300 mm 处, 同轴准直调整光路, 确定好后焦面的位置, 摄得的焦线照片如图 9 所示。图 10 是沿线

长扫描的光强分布曲线。由图可见,焦线细锐,边缘上升下降陡峭,无旁瓣,“塌边”较小,像质优良,线长 15 mm,与理论值吻合得很好,顶部最大起伏量小于 10%。当在入射光场中插进如图 6 所示的网格板,扰乱光场的均匀性,在焦面处仍然得到均匀焦线,只是由于部分光能被阻挡使整个照度相应下降,这一效果用单柱透镜系统是无法达到的。上述实验充分验证了研制的 SWA 系统能够有效地将非均匀圆截面光束变换成均匀的线聚焦光束。

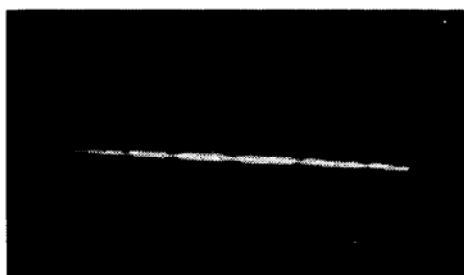


Fig. 7 Focus line image of a SCL system after a screen plate is inserted

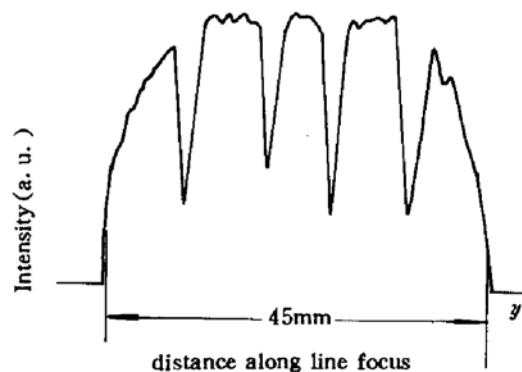


Fig. 8 Modulated intensity distribution after a screen is inserted

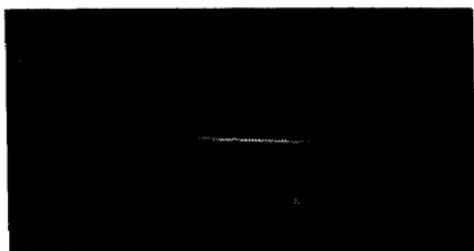


Fig. 9 Focus line image of a SWA system

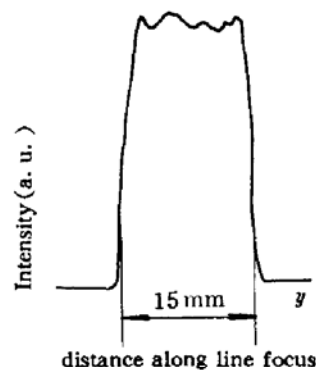


Fig. 10 Intensity distribution of a SWA along the line focus

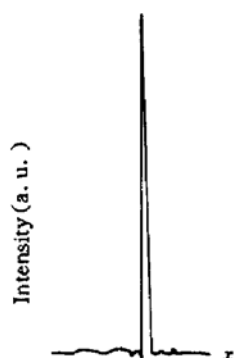


Fig. 11 Intensity profile of a SWA along the line width

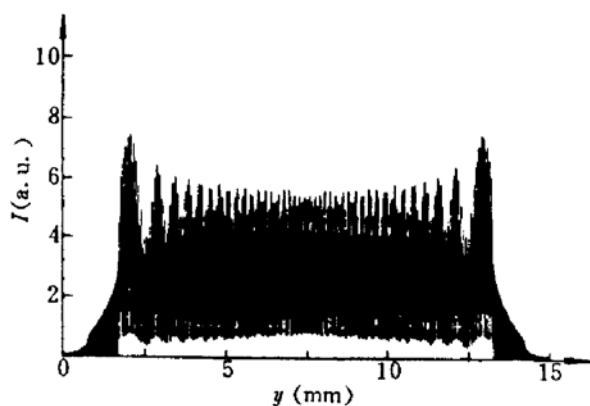


Fig. 12 The calculated intensity distribution of a SWA along the line focus

焦线的宽度采用狭缝扫描法测量,缝宽 $20 \mu\text{m}$,置于 3DU33 光电管前面,用步进电机驱动精密套轨丝杆沿焦线宽度方向扫描,得到的曲线(图 11)非常陡峭。扫描距离经标定后,测得的线宽平均值为 $\delta = 120 \pm 1.0 \mu\text{m}$ 。

如果在系统光学表面镀减反硬膜,并经预辐照处理,提高光负载能力,完全可用于强激光靶面均匀照明系统。

3.3 讨论

图 9 所示的焦线有虚光,这是由于组合系统的加工误差和像差所致,解决的办法是除进一步提高加工精度外,选取 $F_c \geq 1000 \text{ mm}$ 的柱透镜,可减小系统像差,改善成像质量。

对衍射积分方程作数值计算,结果如图 12 所示,表明通过 SWA 系统各子束在焦面会聚相互叠加干涉,产生细密度、小尺寸的光强起伏,起伏周期为

$$\Delta\omega_0 = \frac{\lambda}{\sin\theta} = \frac{\lambda L}{W_0}, \quad \lambda = 0.6328 \mu\text{m}$$

计算得 $\Delta\omega_0 \simeq 21 \mu\text{m}$, θ 是光楔光线的夹角。

如此细密的干涉条纹,迄今还没有合适的探测器精确测定。与此同时,各子列阵单元边缘还将产生衍射效应,焦线光场实际是受衍射包络调制的多光束干涉的综合结果,这是列阵系统所固有的特性。进一步消除由干涉和衍射效应引起的大小尺度光强起伏的方法有使用非相干光源^[5]、随机位相调制、光谱色散平滑等组合技术。但是要达到实用化要求,还有许多技术难关有待我们去突破。

致谢 参加本项工作的还有本校 90 届毕业生唐绍凡、赖晓同学。工作过程中得到邓锡铭、范滇元教授的指导、帮助和支持,作者对此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 陈万年,王树森,陈 斌等. 用于 X 射线激光实验研究的列阵柱面透镜线聚焦系统. 光学学报, 1991, 11(9): 829
- 2 邓锡铭,梁向春,陈泽尊等. 用透镜列阵实现大焦斑面的均匀照射. 中国激光, 1985, 12(5): 257
- 3 I. N. Ross, J. Boon, R. Corbett *et al.*. Design and performance of a new line focus geometry for X-ray laser experiments. *Appl. Opt.*, 1987, 26(9): 1584
- 4 D. M. Villeneuve, G. D. Enright, H. A. Baldis. Novel laser line focus geometry applied to X-ray lasers. *Opt. Commun.*, 1991, 81(1,2): 54
- 5 Baida Lü, Bin Zhang, Zhongyong Liu *et al.*. Modelling the cylindrical lens array line focus system illuminated by partially coherent light. *Opt. Commun.*, (to be published)

Production of a Segmented Wedge Array System for Laser Line Focus

Cai Bangwei Lü Baida Liu Zhongyong Zhang Bin Feng Guoying

(Department of Opto-Electronic Sic. & Tech., Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract The design of a seven-units segmented wedge array system for laser line focus and its characteristics are reported.

Key words laser line focus, segmented weage array, uniform illumination