

二维正交光楔列阵大焦斑均匀照明 光学系统的实验研究*

郑建洲** 蔡邦维 吕百达 翟群***

(四川大学激光物理与化学研究所 成都 610064)

提要 提出了一种二维正交光楔列阵均匀照明系统,可将非均匀分布激光光斑变换为尺寸连续可调分布均匀的方形光斑。报道了该系统的设计原理及实验研究结果,并对用于小焦斑均匀照明的可行性进行了论证。

关键词 二维正交光楔列阵,均匀照明,焦斑

1 引言

国内外对靶面均匀照明问题已经作了许多研究工作^[1~5]。近年来,为实现 X 光激光实验要求的线聚焦,我们已对多种一维线聚焦光学系统进行了研究。但是,激光核聚变某些物理实验,例如高压冲击波实验却要求均匀的二维点聚焦。为此,本文提出了用正交光楔列阵透镜与非球面透镜组合的光学系统,实现二维均匀点聚焦的新方案。用 CCD 数据处理显示装置对研制的光学系统的聚焦特性作了实验研究,结果表明,该系统结构紧凑,焦斑光强分布均匀,对入射不均匀激光不敏感,可在 x, y 二维方向连续调节光斑尺寸获得“平顶”分布的焦斑。只要合理选择参数,进一步提高光学元件的加工测试精度,可望实现几百微米量级的小焦斑均匀照明。

2 系统的设计原理

正交光楔列阵点聚焦均匀照明光学系统是在可变焦线光楔列阵均匀照明系统^[3]的基础上发展起来的。其原理如图 1 所示,其中 SWA_1, SWA_2 为相互正交的两组光楔列阵, F 是焦距为 f 的非球透面镜。二维正交光楔列阵系统能获得均匀照明的基本原理是入射光束被两个相互垂直、单元数为 N 的光楔列阵等分成 N^2 个正方形子束,各子束在“重迭焦面”上完全重迭会聚,非球面透镜再将其成像在靶面上,使光强分布不均匀的子光束相互补偿,在靶面上就得到了均匀分布的方形焦斑。改变 SWA_2 与非球面透镜 F 的间距 S_2 即可在一定范围内连续改变方形焦斑的尺寸。

由几何光学,光斑完全重迭的条件为

* 国家高技术惯性约束聚变委员会资助项目。

** 现在河北省师范大学物理系工作; *** 现在西南民学学院物理系工作。

收稿日期: 1996—07—04; 收到修改稿日期: 1996—10—14

$$L_1 = L_2 + S_1 \quad (1)$$

方形焦斑的位置由下式给出

$$Z_0 = \frac{L_2 - S_2}{1 + (L_2 - S_2)/f} \quad (2)$$

焦斑宽度为

$$l = \frac{d}{1 + (L_2 - S_2)/f} \quad (3)$$

式中 L_1, L_2 分别为 SWA_1, SWA_2 到重迭焦面的间距; S_1 为 SWA_1, SWA_2 的间距, S_2 为 SWA_2 到非球面透镜 F 的距离; d 表示光楔列阵单元的宽度。由(3)式可见, l 随 S_2 的改变而改变。

SWA_1, SWA_2 第 m 单元的楔角分别为

$$\alpha_{1m} = \frac{1}{n-1} \text{tg}^{-1} \left(\frac{x_m}{L_1} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_{2m} = \frac{1}{n-1} \text{tg}^{-1} \left(\frac{y_m}{L_2} \right) \quad (5)$$

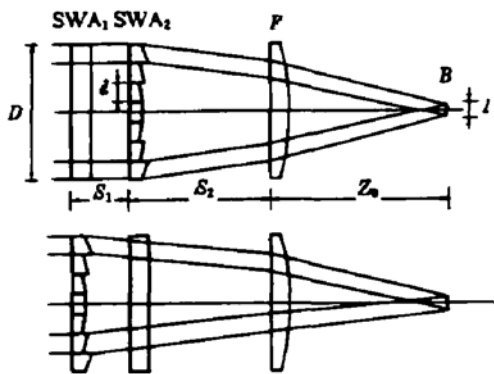


图1 二维正交光楔列阵光学系统的聚焦原理
Fig. 1 The focusing principle of the two-dimensional orthogonal segmented wedge array (SWA) system

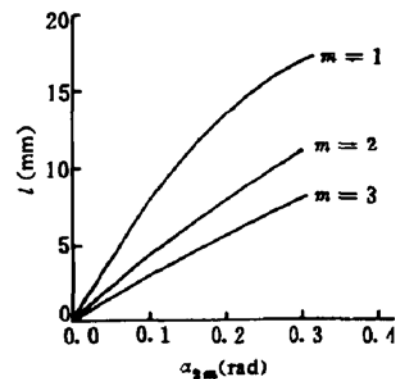


图2 SWA_2 各单元楔角 α_{2m} 与方形焦斑宽度 l 的关系, 其中, 非球面透镜的焦距为 200 mm
Fig. 2 The width of rectangular laser spot varies with the wedge angle α_{2m} of SWA_2 , where the focal length of the aspherical lens is 200 mm

其中, x_m, y_m 分别表示在 x 和 y 方向第 m 单元光楔中心到光轴间的距离, n 为材料的折射率。根据设计原理, 我们研制了七单元和九单元奇数光楔列阵, 中间单元均是无楔角的平行平板, 有利于靶面的准直装调。以七单元系统为例, 各单元光楔透镜的几何尺寸为 $105 \times 15 \times 4$ (mm), 材料为 K_9 玻璃, $n = 1.513$, 系统通光口径 $D = 105$ mm, 透镜焦距 $f = 200$ mm。为了改善列阵存在衍射调制的大尺度不均匀性, 我们采用了楔角偏差法^[4], 使各单元的衍射包络相互稍微错位, 从而有效地削弱了单元衍射产生的大尺度不均匀性。

由理论计算得出 SWA_2 各单元楔角 α_{2m} 与焦斑宽度 l 的关系如图 2 所示。

3 实验研究及结果分析

在实验中, 单模 He-Ne 激光经扩束器后成为口径为 $D = 105$ mm 的准直平行光, 垂直射入被测正交 SWA 点聚焦系统, 在靶面上形成一方形光斑。用 MTV-1881EX1/2"型 CCD 及处理显

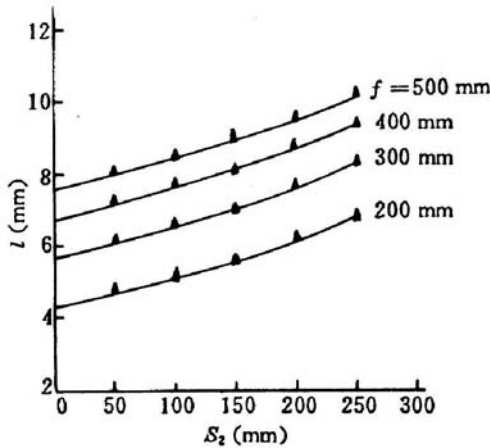


图 3 系统的焦斑宽度与焦距不同的非球面透镜 S_2 的关系

其中实线为几何光学计算值, Δ 为实验值

Fig. 3 The width of rectangular laser spot varies with the distance S_2 for different aspherical lenses
—: geometrical calculation results, Δ : experimental results

示系统和 GS-I 型全息干版, 测量记录焦斑的特性并对结果进行了讨论。

将被测的点聚焦均匀照明光学系统置于光路中, 同轴准直调整光路, 确定好最大方形焦斑位置, 减小 S_2 使方形焦斑逐渐缩小达最小值。实验值与理论计算结果比较如图 3 所示, 二者符合得很好。

用 MTV-1881EX1/2" CCD 摄得焦斑上的一维、二维光强分布如图 4, 可见, 焦斑为正方形, 边缘上升下降比较陡峭, 无旁瓣, 近于“平顶”光强分布。根据不均匀度的计算式

$$\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (6)$$

在曲线上取 10 点作平均得 x, y 二方向的不均匀度约为 $\bar{\eta}_x \approx 4.34\%$, $\bar{\eta}_y \approx 4.123\%$ 。能量损失约为 $\delta E_x \approx 10.28\%$, $\delta E_y \approx 10.30\%$ 。能量损失的原因主要

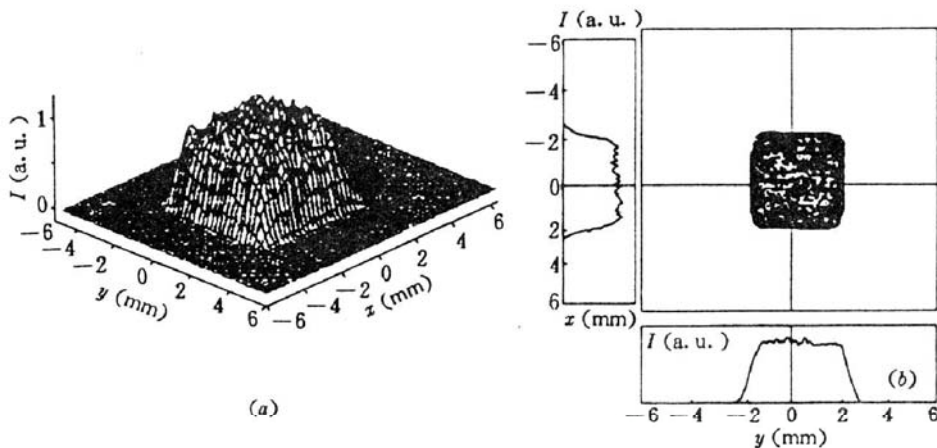


图 4 (a) 焦斑二维强度分布; (b) 沿 x, y 方向的焦斑强度分布

Fig. 4 (a) The 2D intensity distribution of the focal spot;

(b) The intensity distribution of the focal spot along x and y directions

是加工时楔角的微小误差。离焦 $\Delta z = 2 \text{ mm}$, 测得的强度分布如图 5, 顶部起伏仍然很小, 不均匀度约为 $\bar{\eta}_x \approx 4.10\%$, $\bar{\eta}_y \approx 4.071\%$, 能量损失约为 $\delta E_x \approx 17.30\%$, $\delta E_y \approx 16.39\%$ 。离焦时, 能量损失增加的原因是由于单元光楔的非涅耳衍射分布彼此稍微错开, 产生“塌边”所致。为验证焦斑光强分布不受入射激光不均匀的影响, 我们在扩束准直器与被测系统之间, 放置一块使光强分布产生紊乱的扰动板^[6], 结果表明, 置于扰动板后, 只是由于部分光能被挡住使整个强度下降约 25%, 光强的均匀性基本不受影响, 均匀化效果较好。参见图 6。不均匀度 $\bar{\eta}_x \approx 6.82\%$, $\bar{\eta}_y \approx 5.545\%$ 。

列阵均匀照明系统的焦斑仍然存在多光束干涉效应引起的高频调制, 调制周期理论值为 $\delta_x = \delta_y = \lambda / \sin \theta = \lambda Z_0 / d$ 。采用 4 单元正交 SWA 组成被测系统由参数计算得 $\delta_x = \delta_y = 8.2$

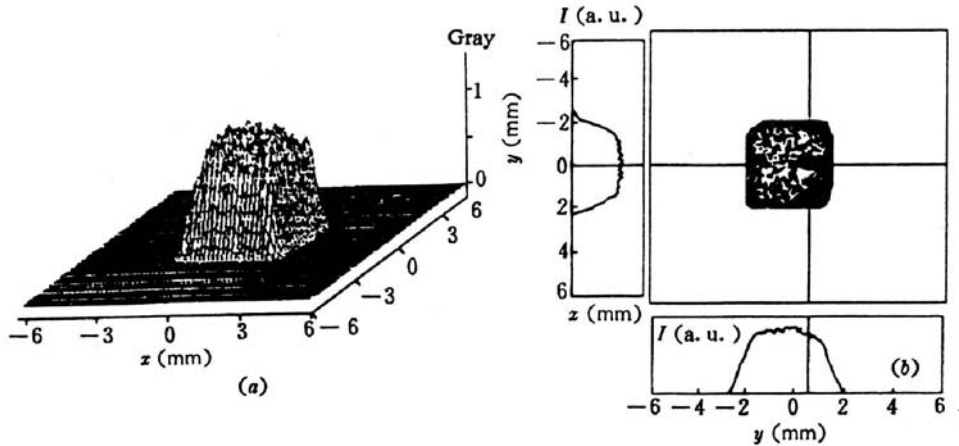


图 5 (a) 焦后 ($\Delta z = 2.0 \text{ mm}$) 焦斑二维强度分布; (b) 焦后 ($\Delta z = 2.0 \text{ mm}$) 分别沿 x, y 方向的焦斑强度分布

Fig. 5 (a) The 2D intensity distribution in the back focus ($\Delta z = 2.0 \text{ mm}$);

(b) The intensity distribution in the back focus ($\Delta z = 2.0 \text{ mm}$) along x and y directions

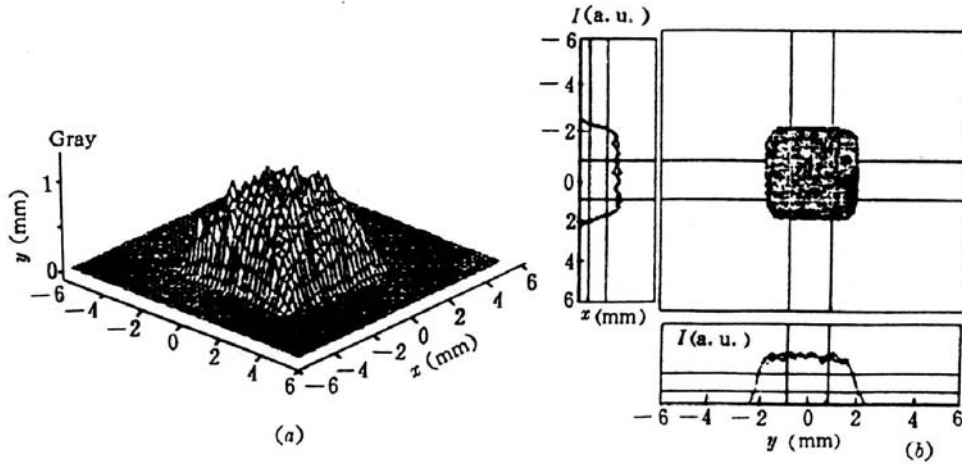


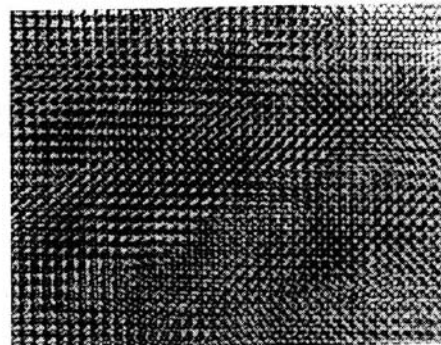
图 6 (a) 在 SWA 系统前插入一扰动板时的二维焦斑强度分布; (b) 沿 x, y 方向的焦斑强度分布

Fig. 6 (a) The 2D intensity distribution, when a screen plate is inserted into the front of the SWA system;

(b) The intensity distribution of the focal spot along x and y directions

图 7 由显微投影技术拍摄的放大 86 倍后进一步放大的正交 SWA 系统产生的多光束干涉斑纹照片

Fig. 7 The further magnified picture of the multi-beam interference speckle produced by the SWA system which was amplified about 86 times



μm 。如此细密的干涉条纹直接用现有的 CCD 系统是不能测定的。为此,我们成功地开发了显微放大测试技术,测得的多光束干涉斑纹如图 7 所示,图 7 是斑纹放大 86 倍用全息干版拍摄的再经放大冲洗后的照片。用 CCD 可摄得同样的图斑。实验测定相邻亮纹(暗纹)间距为 $\delta_x \approx \delta_y \approx 8.703 \mu\text{m}$,与理论值相符合。由图 7 可见二个次极大,与多光束干涉规律次极大数 $(N - 2)$ 相吻合,证实了结果的可靠性。这一技术的开发成功,为今后靶面均匀照明光学系统的改进提

高创造了测试条件。

原则上,这一新的技术方案可以推广用于更小焦斑(例如宽度小于 500 μm)的均匀照明。我们用二组正交的九单元列阵作了初步实验论证。结果表明,光斑尺寸可达到设计要求,但欲实现更好的均匀照明,对光学元件加工精度要求甚高。

4 结 论

4.1 用两组相互正交的光楔列阵透镜与非球面透镜组合的光学系统,能够在一定范围内焦斑尺寸可连续调节的均匀点聚焦。

4.2 与其它列阵光学系统一样,焦斑仍然存在细密的多光束干涉斑纹,若要进一步提高光强分布的均匀性,可用偏振和位相控制等技术,来抑制这种小尺度的不均匀性^[4]。

4.3 成功开发了多光束干涉斑纹的显微放大测量技术,为进一步改进、提高点聚焦靶面均匀照明光学系统的研究创造了测试条件。

4.4 与其它强激光靶面均匀照明平滑技术相比较,光楔列阵和非球面透镜加工技术和测试方法比较成熟,可靠性好。上述的点聚焦系统未引入任何粘结胶,抗光损阈值高,结构紧凑,是 ICF 靶面均匀照明中很有前途的技术方案。

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 D. M. Villeneuve, G. D. Enright, H. A. Baldis. Novel laser line focus geometry applied to X-ray laser. *Opt. Commun.*, 1991, 81(1,2): 54
- 3 蔡邦维,刘忠永,吕百达等. 焦线可控的光楔列阵均匀线聚焦系统. 中国激光, 1996, A23(1): 57
- 4 刘忠永,吕百达,蔡邦维等. 用偏振和有规位相分布抑制线聚焦系统中的小尺度不均匀性. 光学学报, 1995, 15(12): 1624
- 5 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明. 中国激光, 1985, 12(5): 257
- 6 蔡邦维,吕百达,刘忠永等. 光楔列阵线聚焦系统的研制. 中国激光, 1995, A22(6): 430

Experimental Study of Two-dimensional Orthogonal Segmented Wedge Array Optical System Applied to Uniform Illumination of Large Focal Spot

Zheng Jianzhou Cai Bangwei Lü Baida Zhai Qun

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract A two-dimensional orthogonal segmented wedge array (SWA) optical system for uniform illumination has been proposed for the first time, which enables us to transform a non-uniform laser spot into the rectangular uniform one with variable dimension. The design principle has been given and experimental results are reported and analysed. The further application to uniform illumination of the comparatively small focal spot has been discussed too.

Key words two-dimensional orthogonal segmented wedge array, uniform illumination, focal spot